

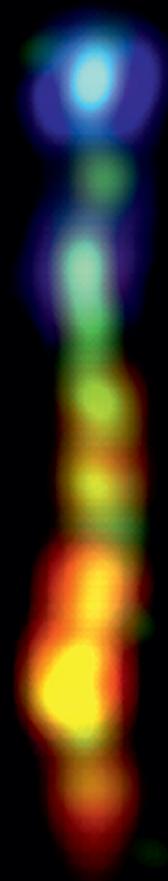
Cuásares

Gravedad cuántica

SKA

La imagen de arriba corresponde al cuásar del Trébol. Se trata de un único objeto cuya imagen aparece multiplicada por el efecto de lente gravitatoria, generado por la existencia de una galaxia entre el cuásar y nosotros, que curva y amplifica su luz. Fuente: NASA/CXC/Penn State/G.Chartas et al.

A la izquierda vemos el chorro del primer cuásar conocido, 3C273, descubierto en 1963. Los colores representan distintas longitudes de onda (rayos X en azul, luz visible en verde e infrarrojo en rojo; las áreas donde el visible y el infrarrojo se solapan aparecen en amarillo). NASA/JPL-Caltech/Yale Univ.



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

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

Instituto de Astrofísica de Andalucía

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

Depósito legal: GR-605/2000

ISSN: 1576-5598

SUMARIO

REPORTAJES

Cinco décadas estudiando cuásares...3

Un deseo llamado gravedad cuántica ...8

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS. SKA ...12

EL "MOBY DICK" DE... Guillem Anglada (IAA)...14

CIENCIA EN HISTORIAS...La controvertida historia de los tasaday... 15

ACTUALIDAD ...16

SALA LIMPIA ...22

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES. Galaxias luminosas en el infrarrojo...23

EFEMÉRIDES 2015

AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ

100 AÑOS DE RELATIVIDAD GENERAL

Este año coinciden la celebración del Año internacional de la luz y el centenario de la formulación de la teoría de la relatividad general, ambas muy relacionadas con el estudio del universo: a fin de cuentas, la transmisora de casi toda la información que disponemos sobre el cosmos es la luz, y la relatividad general constituye el marco para el estudio de numerosos escenarios astrofísicos.

Este número incluye dos reportajes que, en cierto sentido, ilustran ambas conmemoraciones: por un lado veremos cómo la luz de los cuásares ha ido desvelando, a lo largo de cinco décadas, las características de estos objetos. Y, por otro, averiguaremos por qué es necesario fundir las grandes revoluciones de la física -la relatividad y la cuántica- para explicar la gravedad.

3C 57, un cuásar rejuvenecido

Las observaciones de cuásares muestran que estos objetos no están activos toda su vida, sino que para que veamos sus manifestaciones es necesario alimentar de forma eficiente el agujero negro supermasivo central. En caso contrario, los cuásares se mantienen silenciosos a nuestros ojos, un fenómeno mucho más patente en los cuásares que son emisores intensos en radiofrecuencias. Por razones que aún no se han podido desentrañar, los cuásares que presentan su aspecto más espectacular en radio -con emisiones en estructuras bilobuladas en las que a veces se observan jets a distancias tan grandes como megapársecs- se dan en cuásares viejos y agujeros negros muy masivos (lo que denominamos cuásares de población B). Y esa puede ser una de las razones de que los cuásares radioemisores sean una población escasa entre los cuásares.

En un reciente estudio hemos analizado 3C 57, un cuásar bien conocido por ser una fuente muy intensa en radiofrecuencias. Sin embargo, presenta propiedades

extremas y contradictorias que no encajan con las características típicas de la población de cuásares radioemisores. A la vez que se detecta en 3C57 esa intensa emisión en radio, el cuásar muestra una muy alta tasa de acreción de material y presenta vientos intensos debidos a la presión de radiación, típicos de los cuásares que no emiten en radio (población A). De hecho, la detección simultánea de estos dos fenómenos, radioemisión intensa bilobulada y vientos del disco de acreción, es muy rara.

Los nuevos datos obtenidos en óptico y radio nos han permitido concluir que 3C57 está experimentando un rejuvenecimiento: el viejo cuásar está recibiendo una gran cantidad de gas nuevo, que lo lleva a comportarse como los cuásares jóvenes de población A y sus dos lóbulos, muy próximos aún a la fuente central, responden a una eyección relativamente reciente. Una vez termine este episodio volverá a mostrar las propiedades típicas de su población de origen.

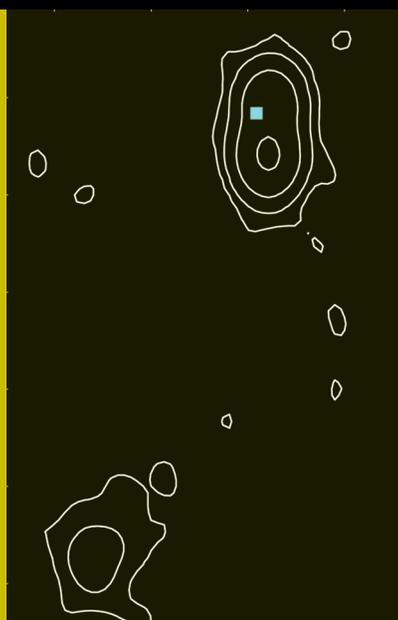
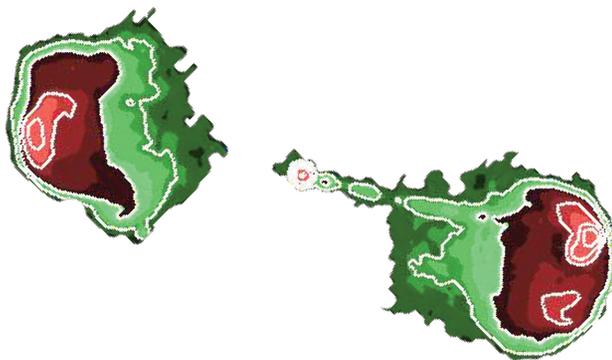


Imagen de contorno de los mapas de 3C 57 obtenidos con el Very Large Array. La marca azul señala la posición del cuásar en el catálogo PPMXL.

Cinco décadas estudiando los cuásares



TRAS MEDIO SIGLO ESTUDIANDO ESTOS OBJETOS, AÚN NO DISPONEMOS DE UN MODELO FÍSICO DE LAS REGIONES CENTRALES DE LOS CUÁSARES

Por Jack Sulentic (IAA), Ascensión del Olmo (IAA) y Paola Marziani (INAF-OAPD)

LAS ESTRELLAS EMITEN MUY DÉBILMENTE EN RADIO, de modo que el descubrimiento, en 1963, de algunas fuentes de radio que, aparentemente, coincidían con estrellas azules y débiles, supuso una verdadera sorpresa.

Además, algunos de estos primeros cuásares descubiertos, que aparecían en el óptico como estrellas azules, mostraban en radio una extensa estructura bilobulada. Se comprobó que la emisión en radio de los cuásares era extremadamente energética: la energía de muchos de los primeros cuásares hallados estaba miles de millones de veces por encima de la luminosidad del Sol

y, en ocasiones, era comparable a la luminosidad de una galaxia espiral gigante como Andrómeda (Messier 31).

Y una de las mayores ironías reside en que los primeros cuásares se hallaron por esa intensa emisión en radio, cuando ya en 1967 supimos que la gran mayoría de los cuásares (en torno a un 90%) son silenciosos en esas frecuencias.

Estas misteriosas radio estrellas fueron, eventualmente, observadas espectroscópicamente en los observatorios de Palomar y de Lick y los resultados aumentaron el asombro: en lugar del típico espectro de líneas de absorción, como el espectro solar, estas “fuentes de radio cuasi estelares” mostraban líneas anchas de emisión en su espectro. Claramente, no se trataba en absoluto de estrellas normales.

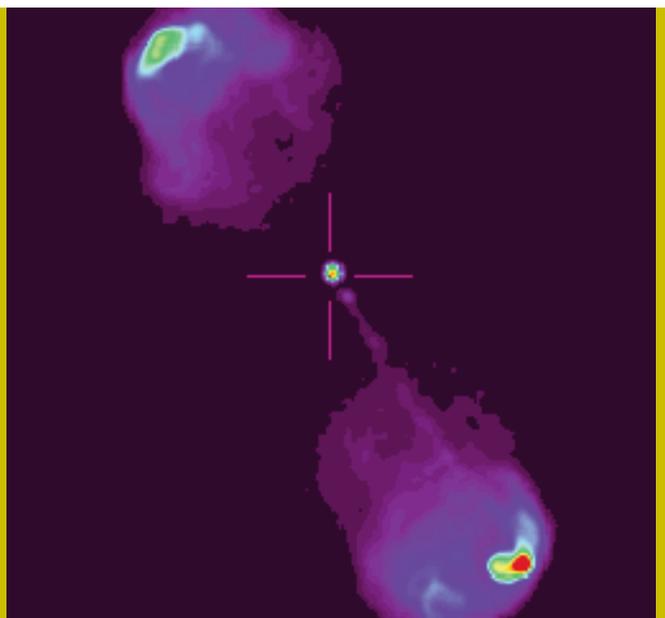
Al principio las líneas espectrales no se pudieron identificar, pero después de un tiempo se comprobó que se trataba de las líneas de hidrógeno con un gran corrimiento al rojo. Existen tres mecanismos físicos que pueden producir este fenómeno, en el que las líneas espectrales se desplazan hacia el extremo rojo del espectro electromagnético: el movimiento Doppler debido a que la fuente se aleja de nosotros, el corrimiento gravitatorio del gas debido a la

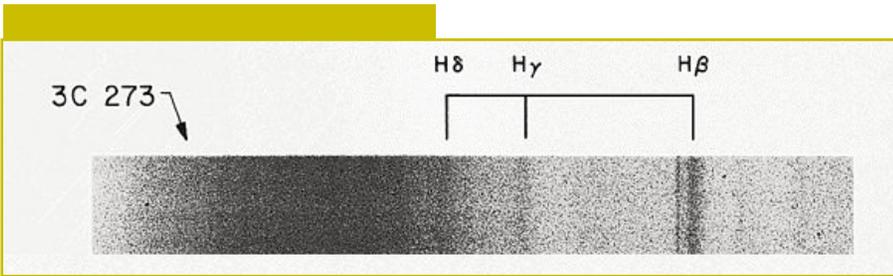
cercanía de un objeto muy masivo y la dispersión de la luz producida por el polvo.

El corrimiento de las líneas era interpretado como la señal de un distanciamiento progresivo debido a la expansión del universo, pero los corrimientos observados eran muy grandes: tanto, que indicaban que esas fuentes se hallaban muy lejos de la Vía Láctea... a miles de millones de años luz de distancia de la Tierra.

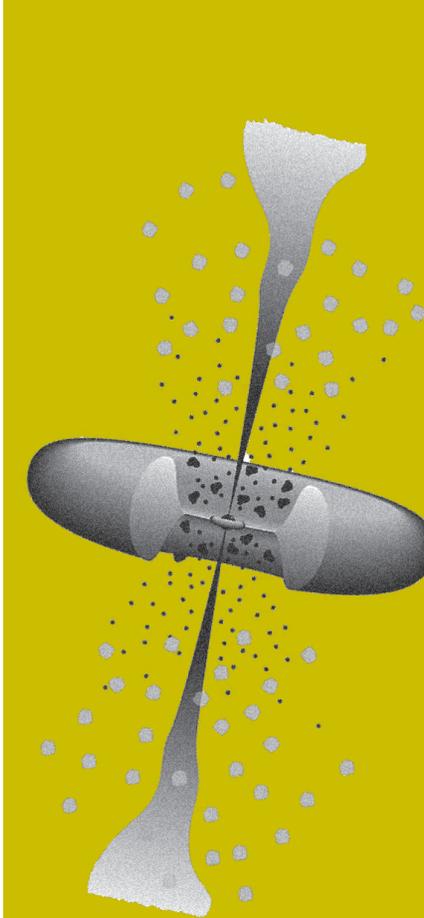
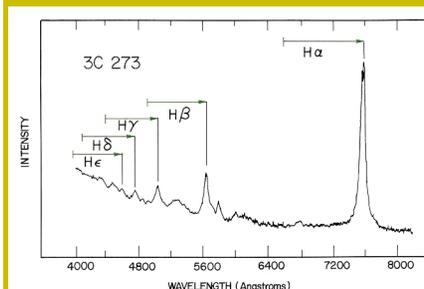
Y en aquellos primeros años la interpretación cosmológica del corrimiento al rojo no se daba por sentada (esta historia se recoge muy bien en la película *Universe: The Cosmology Quest*). La enorme distancia a la que parecían hallarse los cuásares implicaba que se trataba de fuentes extremadamente luminosas (cientos de miles de veces más luminosas que la Vía Láctea) pero con un tamaño muy reducido, de unas pocas veces el diámetro del Sistema Solar.

Izda: imagen en óptico de 3C47, uno de los primeros cuásares descubiertos. Se trataba de un objeto de apariencia estelar en el óptico pero con una emisión muy intensa en radio (de ahí el nombre original de cuásar, que procede de “quasi-stellar radio source”). Derecha: imagen en dos dimensiones de la emisión en radiofrecuencias de 3C47, donde se aprecia la estructura bilobulada y muy extendida. Menos del 10% de los cuásares conocidos presentan este tipo de emisión.





Comparación de un espectro antiguo (análogo, arriba) y moderno (digital, debajo) del cuásar 3C273. En 1963 los espectros se registraban en placas de cristal o papel fotográfico. En 1982 se introdujeron los detectores CCD, que aportaron datos mucho más precisos y observaciones más sensibles a muy bajos niveles de luz, donde pueden distinguirse las líneas de emisión anchas y estrechas.



Esquema que muestra los componentes básicos de un cuásar: un agujero negro supermasivo, un disco de acreción y un toroide de polvo. Se piensa que las líneas anchas de emisión que medimos en los espectros proceden del disco, ya que el agujero negro no puede observarse directamente. El toroide puede observarse en el infrarrojo.

A diferencia de las estrellas, los cuásares muestran distintas características espectroscópicas dependiendo del ángulo de visión.

1967-80: más descubrimientos e ideas

A lo largo de estos primeros años, las ideas sobre los cuásares fluían en abundancia pero carecíamos de los telescopios e instrumentos apropiados para observarlos. Era mucho más fácil obtener datos en radio, gracias al gran desarrollo que la radioastronomía estaba teniendo, que espectros ópticos. A eso se añadía que, desafortunadamente, menos del 10% de los cuásares emitían en radiofrecuencias.

Los cuásares se descubrieron veinte años antes del desarrollo de las cámaras CCD (ahora comunes en casi todos los instrumentos que se usan en astronomía óptica e infrarroja) y cuando la astronomía espacial se hallaba aún dando sus primeros pasos (UHURU, el primer telescopio de rayos X, fue lanzado en 1970). Además, los ordenadores e instrumentos electrónicos más sofisticados por entonces eran muy primitivos comparados con los estándares actuales.

Los espectros de los cuásares se registraban en placas de cristal (un detector no lineal con una eficiencia cuántica muy baja, del orden del 1-2%), y resulta hasta difícil imaginar, desde nuestra perspectiva actual, cómo pudo progresarse en el estudio de estos objetos. Pero, a pesar de las limitaciones, en torno a 1970 ya se había llegado a un consenso sobre su naturaleza.

El esquema se gestó en torno al único mecanismo físico que podía implicar tanta energía en un tamaño tan reducido: la caída de gas hacia un agujero negro supermasivo. Como no se puede ver el agujero negro directamente, el modelo se construyó a partir de observaciones indirectas y aceptando que la fuente de alimentación de estos objetos era un disco de acreción rodeando el agujero negro. En 1985 se añadió un nuevo elemento al modelo: un disco toroidal, o una especie de donut de gas y polvo que oscurece las regiones próximas al agujero negro e impide ver las líneas anchas de emisión en ciertos ángulos de visión. El modelo unificado de agujero negro, disco de acreción y disco toroidal se mostró como la solución a la compleja diversidad de cuásares observada, en el que las distintas manifestaciones eran producto de la dirección desde la que observamos el agujero negro.

En la imagen lateral se muestra un boceto

simplificado del modelo de cuásar empleado a día de hoy. Toda la diversidad de propiedades que se observan se halla, desde la década de los ochenta del siglo pasado, recogida bajo el término “núcleos activos de galaxias” (o AGNs de su acrónimo en inglés), lo que refleja el consenso alcanzado: todos los cuásares se hallan alojados en galaxias, se trata simplemente de núcleos hiperactivos de galaxias. De hecho, nuestra Vía Láctea muestra ciertos signos de actividad nuclear pero aún no está claro que haya albergado un cuásar a lo largo de su historia (muy posiblemente, su agujero negro no sea lo suficientemente masivo). Según prosperaba la teoría, fueron hallándose cuásares con corrimientos al rojo cada vez mayores (en el veinticinco aniversario de su descubrimiento habíamos pasado de un corrimiento de $z=3$ a $z=7$). Y cada salto en el corrimiento al rojo implica que estamos viendo objetos no solo más lejanos y luminosos, sino también que estamos observando un pasado del universo cada vez más remoto: a corrimientos de entre dos y tres ya estamos observando el brillo que emitieron los cuásares hace unos siete mil millones de años, cuando el universo tenía la mitad de su edad actual. El actual récord, de $z=7$, nos remite a cuando el universo solo tenía ochocientos millones de años.

Los cuásares nos permiten vislumbrar el pasado del universo y su estudio hizo evidente que era muy distinto entonces: al aumentar la distancia aparecían más y más cuásares.

1970-2000: definiendo un cuásar

Con lo dicho hasta ahora, ¿podría decirse que lo sabemos todo de los cuásares? Más bien al contrario.

La imagen contigua con la estructura esquemática de un cuásar debe considerarse una hipótesis que aún se sostiene sobre evidencias muy débiles y que llamamos “hipótesis de trabajo”.

Ha habido varios intentos infructuosos de desarrollar un modelo físico de las regiones centrales de los cuásares, pero aún carecemos de una definición clara para estos objetos.

Cuando nos referimos a una estrella, tenemos una idea física muy clara de lo que estamos hablando. Pero con los cuásares es distinto porque los núcleos activos de galaxias presentan muy diversas manifestaciones.

En física se habla a menudo sobre la necesidad de establecer una definición operativa de un fenómeno para facilitar el desarro-

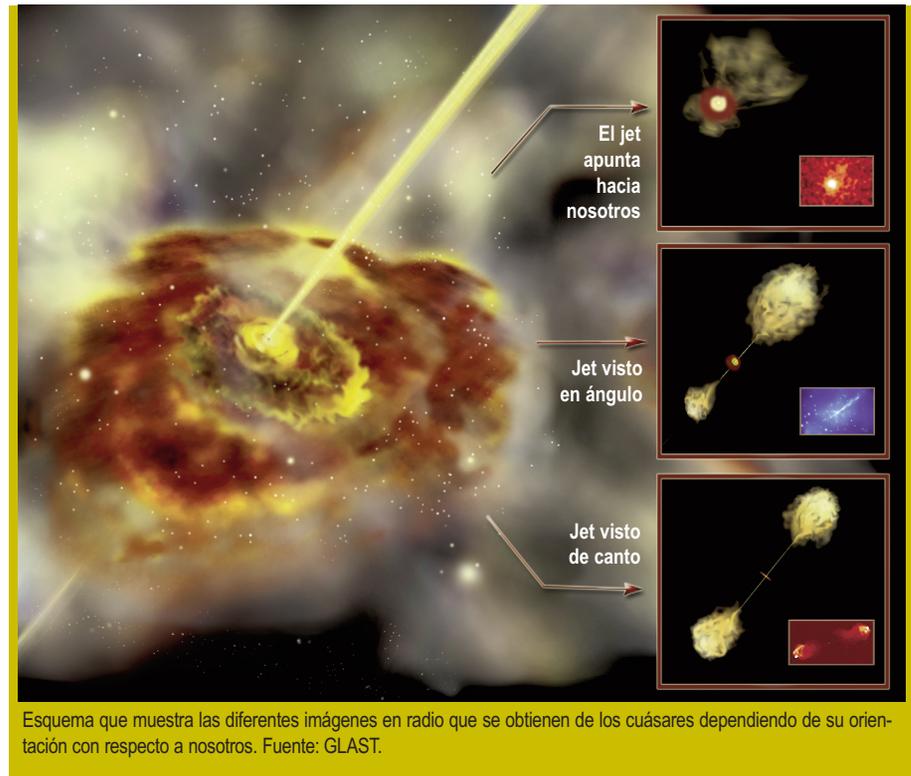
llo de modelos que recurran a las leyes conocidas de la física. En astronomía, donde las fuentes son remotas y las observaciones presentan grandes incertidumbres, las especulaciones teóricas surgen a menudo antes que las evidencias observacionales. Nuestro trabajo se ha centrado en obtener espectros de cuásares con la mejor señal a ruido posible para aportar un escenario más claro a partir del que desarrollar los modelos teóricos. Un trabajo que ha sido posible gracias a las observaciones realizadas a lo largo de varios años en el Observatorio de Calar Alto y, en los últimos años, al uso del Gran Telescopio Canarias (GTC). Toda esta historia, y una discusión muy completa sobre la nomenclatura, puede encontrarse en el volumen recientemente editado *Fifty Years of Quasars* (Springer).

Desde el lanzamiento del satélite UHURU en 1970, siete años después del descubrimiento de los cuásares, la astronomía en rayos X comenzó un renacimiento que afectó también al estudio de estos enigmáticos objetos.

La mejor definición “operativa” para los cuásares implica la presencia de una componente de ley de potencias en el espectro en rayos X de los cuásares. Es importante destacar que la compleja estructura de la región central compuesta por el agujero negro, el disco de acreción y el toroide no se puede resolver espacialmente en ningún cuásar. Incluso aunque en algunos de los cuásares más cercanos se pueda resolver parcialmente, no está claro que esa información nos permita un gran avance en nuestro conocimiento de la fuente central. Pero no todo está perdido: podemos usar la espectroscopía para determinar la estructura de muchos cuásares, estudiando el movimiento del gas -muchos son sorprendentemente accesibles hasta el horizonte de sucesos del agujero negro (las líneas de emisión se observan a distancias tan pequeñas como pocas semanas luz en muchas de las fuentes)-. La clave es siempre un buen espectro.

Contextualizante: ¿hacia un diagrama H-R de cuásares?

Dada la diversidad, en las distintas longitudes de onda, de las propiedades de los AGNs, resulta lógico que los grupos de investigación enfoquen su trabajo hacia uno u otro subtipo (blázares, galaxias Seyfert 1 con líneas estrechas, radiogalaxias, LINERs...), o incluso en observaciones en una longitud de onda particular. Una carencia importante en los estudios sobre



cuásares hasta los años noventa del siglo pasado fue la falta de un formalismo empírico que permitiera contextualizar, sobre todo espectralmente, la diversidad observada en los cuásares.

De hecho, era ampliamente aceptado que todos los cuásares eran lo mismo, es decir, que sus propiedades espectroscópicas eran similares. Y esa fue una de las razones por las que se abandonaron, a finales de los años 90, los intentos de desarrollar un

La estructura esquemática de los cuásares debe considerarse una hipótesis que aún se sostiene sobre evidencias muy débiles

modelo físico de los cuásares.

¿Sugeriría alguien que una estrella azul y caliente como Rigel y una estrella fría y roja como Betelgeuse, ambas en Orión, muestran un espectro similar al del Sol? ¡Claro que no! Y todavía actualmente algunos astrónomos describen todos los cuásares como espectroscópicamente semejantes. Nada más lejos de la realidad, y es muy posible que este error haya lastrado seriamente nuestro conocimiento de los cuásares.

Un buen ejemplo, además de sencillo, para contextualizar las distintas fuentes reside

en el diagrama H-R para las estrellas. Si los espectros estelares fueran semejantes este tipo de clasificación no sería útil, en caso de que fuera posible. Pero distinguiamos al menos siete tipos espectrales en las estrellas (O-B-A-F-G-K-M), organizados a lo largo de la secuencia principal, así como regiones específicas ocupadas por estrellas en distintos estadios evolutivos. El factor principal para la distribución de las estrellas en el diagrama H-R de temperatura y luminosidad es su masa y el Sol, Rigel y Betelgeuse se hallan en distintas regiones de este diagrama.

¿Puede el fenómeno de los cuásares, mucho más complejo y energético, contener una diversidad física tan escasa que una contextualización espectroscópica supone una pérdida de tiempo? ¿de dónde surge esta impresión? En parte refleja la falta de espectros de calidad antes de 1990. En 1989, la literatura especializada solo contenía unos sesenta cuásares con espectros adecuados para iniciar una clasificación, pero incluso estos mostraban ya una interesante diversidad. La carencia de buenos espectros alimentó la idea del parecido espectroscópico de estas fuentes, aunque puede que en contraste con el llamativo corrimiento al rojo de las líneas de emisión esto pareciera un asunto menor.

Nuestros propios estudios en 1989 y un muestreo más amplio que realizamos en 1996 (con muchos espectros obtenidos en el Observatorio de Calar Alto) nos conven-

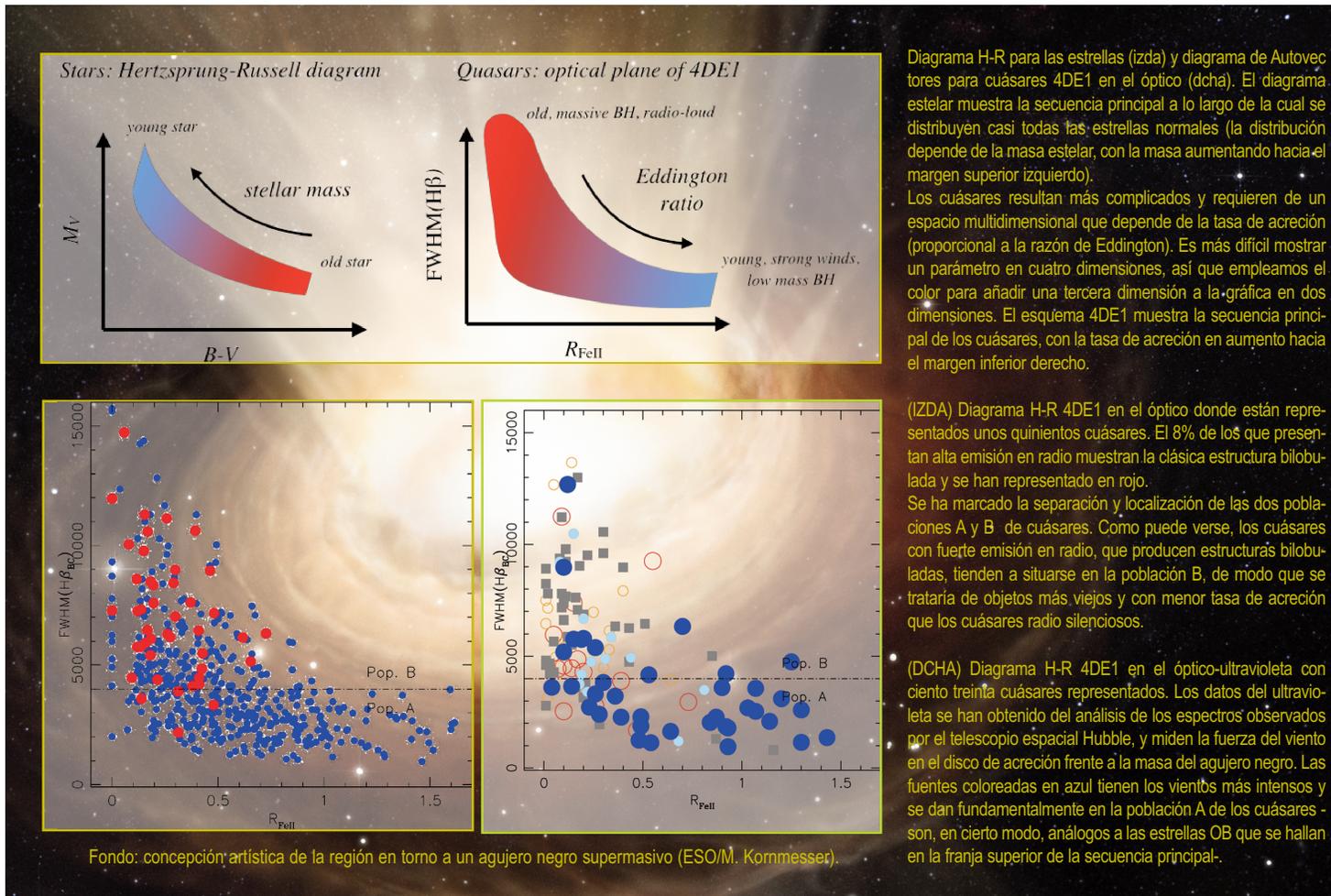


Diagrama H-R para las estrellas (izda) y diagrama de Autovectores para cuásares 4DE1 en el óptico (dcha). El diagrama estelar muestra la secuencia principal a lo largo de la cual se distribuyen casi todas las estrellas normales (la distribución depende de la masa estelar, con la masa aumentando hacia el margen superior izquierdo). Los cuásares resultan más complicados y requieren de un espacio multidimensional que depende de la tasa de acreción (proporcional a la razón de Eddington). Es más difícil mostrar un parámetro en cuatro dimensiones, así que empleamos el color para añadir una tercera dimensión a la gráfica en dos dimensiones. El esquema 4DE1 muestra la secuencia principal de los cuásares, con la tasa de acreción en aumento hacia el margen inferior derecho.

(IZDA) Diagrama H-R 4DE1 en el óptico donde están representados unos quinientos cuásares. El 8% de los que presentan alta emisión en radio muestran la clásica estructura bilobulada y se han representado en rojo. Se ha marcado la separación y localización de las dos poblaciones A y B de cuásares. Como puede verse, los cuásares con fuerte emisión en radio, que producen estructuras bilobuladas, tienden a situarse en la población B, de modo que se trataría de objetos más viejos y con menor tasa de acreción que los cuásares radio silenciosos.

(DCHA) Diagrama H-R 4DE1 en el óptico-ultravioleta con ciento treinta cuásares representados. Los datos del ultravioleta se han obtenido del análisis de los espectros observados por el telescopio espacial Hubble, y miden la fuerza del viento en el disco de acreción frente a la masa del agujero negro. Las fuentes coloreadas en azul tienen los vientos más intensos y se dan fundamentalmente en la población A de los cuásares -son, en cierto modo, análogos a las estrellas OB que se hallan en la franja superior de la secuencia principal-.

cieron de la necesidad de establecer un diagrama H-R de cuásares. Y en el año 2000 propusimos un formalismo de Autovectores en cuatro dimensiones (4DE1) para describir su diversidad. En contraste con las estrellas, objetos prácticamente esféricos y que muestran el mismo espectro independientemente del ángulo desde el que las observemos, los cuásares muestran propiedades que difieren enormemente dependiendo del ángulo de visión (ver imagen página anterior). Así, necesitamos más de dos dimensiones en nuestro diagrama de cuásares para separar los efectos de la dirección de observación de los efectos debidos a la física del objeto. Nuestro diagrama en cuatro dimensiones incluye dos medidas en el rango óptico del espectro así como otras dos medidas que se obtienen con observaciones en el ultravioleta y en rayos X. Centrémonos primero en la parte óptica del diagrama, que mide el movimiento del gas con baja excitación en las proximidades del agujero negro y la intensidad de la emisión del hierro II (FeII), que constituye un indicador de la densidad del gas. La imagen superior muestra la distribución de los cuásares en este plano, donde se pone de manifiesto que los cuásares no se sitúan aleatoriamente en él sino que presentan una secuencia principal bien definida, que

no es muy diferente a la de las estrellas en el diagrama H-R.

Entendiendo el diagrama H-R de cuásares Gran parte del trabajo posterior al año 2000 estuvo enfocado al estudio los dos parámetros ópticos así como a la secuencia principal que habían revelado. Una secuencia que en la imagen superior vemos extenderse desde el margen superior izquierdo, donde encontramos cuásares con líneas muy anchas y baja emisión de FeII, hasta el margen inferior derecho donde las líneas se estrechan y la emisión del hierro aumenta. La primera sorpresa se produjo al comprobar que los cuásares con la emisión en radio más intensa, que ahora sabemos son poco frecuentes, se localizan solo en la esquina de la región superior izquierda de la secuencia principal definida por todos los cuásares. En 2001 empezamos a modelar la distribución de cuásares en nuestro diagrama óptico y concluimos que se debía a dos factores: la orientación del cuásar con respecto a nuestra línea de visión y la tasa de acreción del objeto (el ritmo al que el agujero negro supermasivo central absorbe material). La tasa de acreción se expresa generalmente con la razón de Eddington, que “empuja” el gas hacia afue-

ra, y la fuerza de gravedad, cuyo efecto es el contrario -algo parecido a lo que ocurre en las estrellas-.

La masa del agujero negro, aunque importante, es secundaria en la distribución de fuentes en este diagrama. Curiosamente, los espectaculares cuásares con la emisión en radio más intensa (y muchas veces también muy extendida) presentan una razón de Eddington baja (poco crecimiento) y se sitúan al final del extremo superior de la secuencia principal. Estos objetos son, en cierto sentido, cuásares viejos y “hambrientos”.

Extendiendo nuestro trabajo para incluir los cuatro parámetros en nuestro esquema de Autovectores comprobamos que el otro extremo de la secuencia principal, donde se sitúan los cuásares con las tasas de acreción más altas, es distinguible en todas las dimensiones. Las fuentes en el extremo inferior de la secuencia principal muestran evidencias de vientos muy excitados, posiblemente procedentes del disco de acreción, y presentan un exceso en la emisión de rayos X en la región entre los 2 y los 10 keV (lo que denominamos rayos X blandos), quizá también conectado a la existencia de un disco de acreción caliente. El extremo opuesto, irónicamente donde los cuásares con alta emisión en radio producen sus fuegos artificiales, no se observan

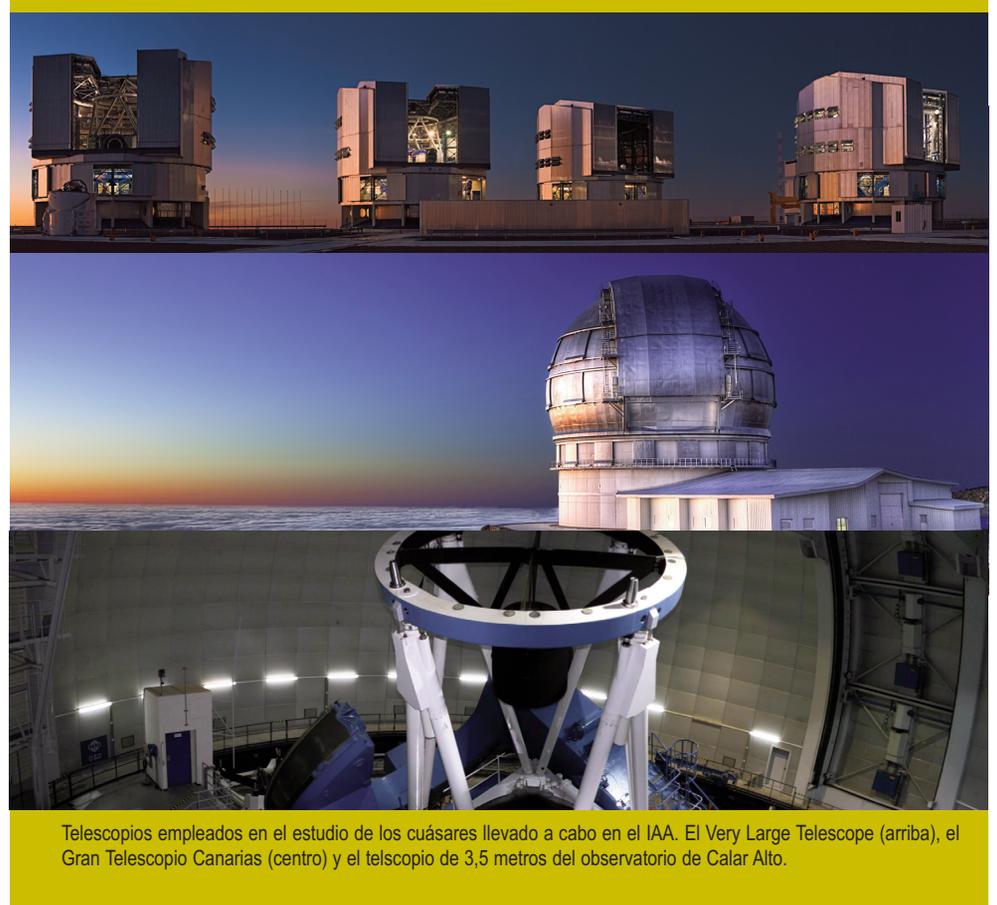
estos mismos vientos, que detectamos por grandes corrimientos al azul en la línea de CIV en el ultravioleta, ni tampoco presentan exceso de emisión de rayos X blandos. Esta contextualización 4DE1 aclara en gran medida nuestra imagen de la diversidad de los cuásares y la relación entre los distintos tipos. Con ella distinguimos los cuásares a ambos extremos de la secuencia principal denominándolos Población A (con una alta tasa de acreción de materia, más jóvenes y un agujero negro poco masivo) y Población B (baja tasa de acreción, más viejos y con agujero negro muy masivo).

Tenemos ahora una base mucho más robusta sobre la que construir los modelos físicos. Y también podemos establecer diferentes modelos para las dos Poblaciones (A y B) y, con los resultados de estos modelos, establecer un puente entre ambos tipos. Y, si finalmente no podemos erigir ese puente, entonces quizá las dos familias de cuásares constituyan tipos fundamentalmente distintos de fuentes, lo que podría deberse bien a la rotación de sus agujeros negros (¿rotación rápida para los de población A y más lenta en los cuásares de población B?) y/o al tipo de galaxia donde residen (¿espirales para la población A y elípticas en el caso de la población B?). Queda mucho trabajo por hacer con respecto a la morfología de las galaxias que albergan agujeros negros, y una parte de él se está desarrollando en el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Los próximos años del estudio de los cuásares prometen ser muy excitantes.

Trabajo en marcha en el IAA

Gran parte de nuestra investigación se ha centrado en los cuásares más cercanos, con un corrimiento al rojo típicamente menor de $z=0,8$, lo que los sitúa a unos tres mil millones de años luz.

En cuásares más distantes observamos una parte del espectro distinta, con el ultravioleta desplazado hasta el óptico, y en los que las líneas de emisión del óptico deben seguirse hasta el infrarrojo, lo que requiere telescopios muy grandes. A lo largo de unos diez años hemos empleado los telescopios de ocho metros del VLT, en Chile, para estudiar el espectro óptico e infrarrojo de cuásares con corrimientos al rojo de entre 1 y 3,7 (cuando el universo tenía entre un 50 y un 12% de la edad actual), y hemos hallado que tanto nuestra secuencia principal como la distinción entre población A y B existe también para estos cuásares a tan grandes distancias. A la vez estamos obteniendo espectros de buena calidad para cuásares con emisión muy



Telescopios empleados en el estudio de los cuásares llevado a cabo en el IAA. El Very Large Telescope (arriba), el Gran Telescopio Canarias (centro) y el telescopio de 3,5 metros del observatorio de Calar Alto.

intensa en radio, con el telescopio de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto, con el objetivo de comprender la dicotomía entre la alta y la baja emisión en radio que nos ha desconcertado desde el mismo descubrimiento de los cuásares en 1963-4.

A lo largo de los últimos cinco años España ha operado el Gran Telescopio Canarias en el Observatorio de La Palma, y nuestro grupo de investigación lo ha empleado para una comparación muy especial. Los estudios de cuásares realizados en el pasado se concentraban bien en cuásares locales de baja luminosidad o en monstruos lejanos cientos de veces más luminosos que cualquier cuásar local. Por lo que nos planteamos: ¿no hay a grandes distancias cuásares parecidos a los que observamos en el universo local? Y si los hubiera, ¿se parecen espectroscópicamente a los cercanos?

Los cuásares de luminosidades similares a los locales son muy difíciles de detectar a grandes distancias, y más aún si queremos estudiar su espectro. Pero, por primera vez, el GTC ha hecho posible que obtengamos espectros de alta calidad para cuásares parecidos a los locales a una distancia de $z=2,5$, cuando el universo tenía menos de la mitad de la edad actual. Cada espectro requiere un mínimo de una hora de exposición y sería una medición imposiblemente larga para telescopios menores.

Con el GTC hemos sido capaces de regis-

trar el espectro de veintitrés posibles candidatos a cuásares muy lejanos pero con luminosidad parecida a las fuentes locales, y hemos confirmado que, en efecto, las dos poblaciones (A y B) existen y en proporciones similares. Sin embargo, hallamos una intrigante diferencia, ya que los cuásares lejanos muestran un menor contenido de elementos pesados (silicio, hierro, magnesio...) que sus análogos locales. De modo que no son exactamente iguales, y la diferencia refleja la propia evolución del universo. El gas de los cuásares se ve enriquecido por los elementos pesados generados en las distintas generaciones de estrellas, y muchas estrellas han explotado como supernovas desde $z=2,5$, enriqueciendo el medio a su alrededor, de modo que resulta lógico que esperemos más elementos pesados en los cuásares del universo local. Y el Gran Telescopio Canarias ha confirmado esta expectativa.

Tenemos muchos más proyectos en el estudio de cuásares con el VLT y con el GTC. Entre los objetivos que nos planteamos, quizás el más ambicioso reside en emplear los cuásares de la población A más extrema, con las mayores tasas de acreción de materia y mayor razón de Eddington como candelas estándar. Si podemos estimar su luminosidad independientemente de su distancia podremos emplearlos para cartografiar la estructura del universo.

UN DESEO LLAMADO GRAVEDAD CUÁNTICA

¿POR QUÉ HAY QUE ACERCAR LA RELATIVIDAD Y LA CUÁNTICA? ¿CÓMO DE CERCA ESTAMOS DE CONSEGUIRLO?

Por Carlos Barceló (IAA-CSIC)

SIEMPRE HEMOS VIVIDO EN EL MISMO MUNDO, O POR LO MENOS NO HEMOS NECESITADO HASTA EL MOMENTO PARA EXPLICAR NUESTRO MUNDO que sus reglas fundamentales hayan ido cambiando. Lo que sí hemos cambiado en varias ocasiones es nuestra forma de imaginarlo y entenderlo. Cuando a un niño se le esconde un muñeco poniéndole encima una caja invertida, al principio imagina que ha desaparecido, que las cosas pueden desaparecer, le parece lógico y no le preocupa. Más adelante comienza a sospechar que quizá sea mejor imaginar que las cosas no desaparecen, que simplemente no se ven, pero que permanecen en el mismo lugar. Solo le hace falta hacer el experimento de, valientemente, levantar la caja para corroborar que la nueva explicación, la nueva teoría, funciona. Pues bien, las civilizaciones, a través de los científicos, sus eternos niños, funcionan exactamente igual. Cuando algo resulta extraño por cualquier razón, se busca una nueva teoría que haga ese algo más natural y consistente con los otros algos. Este algo es en muchas ocasiones un fenómeno observado, ya sea directamente en la naturaleza o en un laboratorio. En otras, este algo puede ser de naturaleza teórica o incluso estético-metafísica, por ejemplo, una inconsistencia lógica, una hipótesis extraña o una falta de armonía. Existe una manera de entender nuestro mundo, que llamaré mecanicista, que creo sigue siendo en la actualidad la más sencilla

para los profanos en física, y para algunos profesionales entre los que reconozco me encuentro. Imaginemos que el mundo está hecho de trocitos de materia repartidos por el espacio y moviéndose con el tiempo. Este espacio no es más que lo que nuestra intuición sugiere: un cubo vacío de tres dimensiones, muy grande o quizá infinito, donde la suma de los ángulos de los triángulos es obviamente 180 grados. Por su parte, el tiempo es un marcador universal del devenir de todos los acontecimientos. El que esta descripción sea sencilla no significa que sea simple: de hecho, el funcionamiento completo de este mundo podría dar lugar a situaciones de gran complejidad.

A principios del siglo XX esta imagen mecanicista del mundo empezó a resultar insatisfactoria para los científicos. Una nueva teoría del mundo estaba a punto de nacer... Pero hubo sorpresa: al final en vez

de una nacieron dos teorías mellizas. Cada una de estas teorías cuestionaba distintos aspectos del mundo mecanicista.

LA LUZ COMO DETONANTE DE LAS REVOLUCIONES

En el marco mecanicista la materia puede entenderse como constituida por elementos básicos discretos irreductibles (hipótesis atómica), o como una serie de substancias continuas. Dentro de las diversas substancias que pueblan el espacio se sabía desde antaño de la existencia de una singular, a la vez que ubicua: la luz. Para imaginar un mundo mecanicista como el que describía arriba, nada más sencillo que tomar una hipótesis atómica para toda la materia incluyendo la luz. Construir un mundo mecánico fundamental con elementos discretos y continuos en interacción es algo que suele dar lugar a problemas de consistencia, cuando no producir una sensación de falta de armonía. Por lo tanto, en primera instancia, mejor pensar que todos los elementos tienen la misma naturaleza ya sea discreta, como digo la que se me antoja más sencilla, o continua.

Durante mucho tiempo, y siguiendo las ideas de Newton, la luz era imaginada como constituida por corpúsculos elementales, luego perfectamente encajable en un mundo mecánico discreto. En la práctica estos corpúsculos parecían viajar a una velocidad fija y enorme, aunque dentro de la conceptualización mecanicista nada indica que no pueda conseguirse que viajen a más velocidad. Sin embargo, durante el siglo XIX la luz afianzó una descripción ondulatoria (por ejemplo, a través del experimento de la doble rendija de Young y sus franjas de interferencia, un fenómeno típicamente ondulatorio): la luz se comportaba como una onda en un estanque especial, hecho de una substancia hipotética llamada éter luminífero. La hipótesis atómica para la materia no lumínica, hipótesis que se afianzó con la entrada en el siglo XX, conllevaba por tanto un problema de consistencia con la materia lumínica. Como veremos, esta hipótesis atómica mecanicista tuvo una existencia efímera.

LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

La teoría cuántica nació al cuestionar por razones experimentales la naturaleza de los constituyentes elementales de la materia no lumínica. Pero también puede decirse que surgió para intentar conciliar las descripciones de las materias lumínica y no lumínicas. Para explicar principalmente los experimentos con espectros atómicos (la esencia



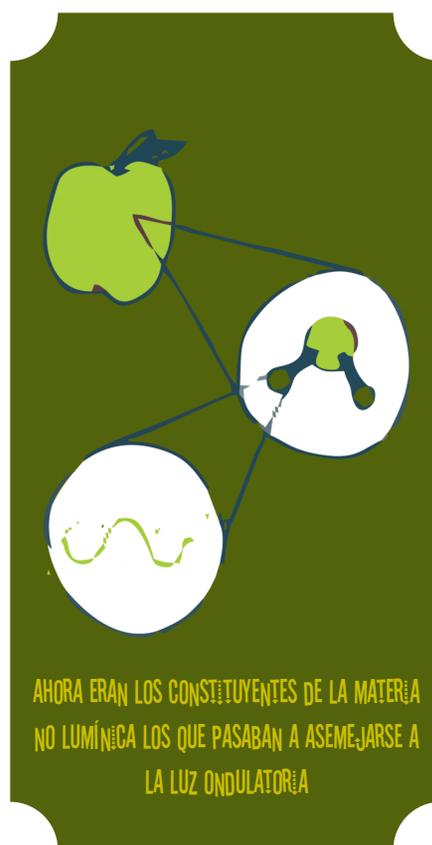
de la interacción luz-materia no lumínica) era mejor dejar de concebir los constituyentes de la materia no lumínica (las partículas elementales) como diminutas bolitas con una posición y una velocidad determinadas. En la interpretación más estándar de la mecánica cuántica, estos descriptores de la configuración de una partícula no son propiedades que “poseen” las partículas, sino que aparecen solamente cuando en un experimento se pregunta sobre ellos. Además, solo aparecen de forma complementaria: hay propiedades que no pueden aparecer simultáneamente, como son la posición y la velocidad (o momento) de una partícula. Es como si situar una partícula en una posición precisa determinada hiciera que su velocidad se desdibujara. En esta nueva teoría, eran ahora los constituyentes de la materia no lumínica los que pasaban a asemejarse a la luz ondulatoria: dejaban de ser imaginados como partículas puntuales para parecerse más a ondulaciones en estanques especiales, algo más plástico y con capacidad para distribuirse por el espacio.

Ahora bien, estas ondas no lumínicas no se conceptualizan como ondas con una realidad física completa, sino más bien como ondas de probabilidad. A partir de conocer la onda asociada a una partícula de materia –su configuración en el espacio a un tiempo dado– se puede conocer probabilísticamente qué sucedería si pasado un tiempo se hiciera un experimento para conocer un determinado descriptor de la situación o estado de la partícula. Desde la perspectiva cuántica la materia clásica de nuestra conceptualización mecanicista no es más que el resultado de colocar juntas una infinidad de partículas elementales cuánticas de tal forma que en promedio se comporten de manera (casi) completamente determinada. Dada una descripción mecanicista de un sistema de materia, se dice que el sistema es cuantizado cuando se genera una versión cuántica de los ingredientes del sistema original. A esta nueva descripción cuántica se suele llegar siguiendo unas reglas de cuantización bien establecidas. La teoría cuántica de la materia supuso una revolución en nuestra forma de entender la materia. Crucial para lo que sigue, sin embargo, es destacar que en esta teoría cuántica el espacio y el tiempo seguían siendo los viejos conocidos del modelo mecanicista.

LA REVOLUCIÓN RELATIVISTA

En paralelo con el desarrollo de la teoría cuántica se dio otra revolución. La teoría de la relatividad nació al explorar qué suce-

dería si la velocidad de la luz fuera en realidad un límite infranqueable (el postulado de la luz). En la nueva dinámica, los conceptos de espacio y tiempo del modelo mecanicista se antojaban innecesarios y sin valor operacional. La simultaneidad de dos sucesos que ocurren en lugares distantes pasaba a ser una cuestión dependiente del observador, dejaba de haber un tiempo universal. El concepto de separación espacial entre objetos también pasaba a tener un carácter no universal (solamente un nuevo concepto, el intervalo espaciotemporal, tenía un sentido invariante y universal).



A esta primera revolución relativista (conocida como relatividad especial), le siguió una segunda que involucraba la interacción gravitatoria (relatividad general). Según Newton todos los cuerpos con masa se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia –es la fuerza que mantiene a los planetas en sus órbitas y a nosotros pegados a la Tierra–. Esta fuerza se transmitía a distancia de forma instantánea, es decir, a velocidad infinita, y entraba en contradicción con la idea de que ninguna información pudiera viajar a más velocidad que la luz. La búsqueda de una teoría relativista de la gravitación nos llevó mucho más lejos de lo que podía sospecharse en un inicio. Esta búsqueda se convirtió en sinónimo de replantear completamente la

descripción del espacio y el tiempo. El espacio y el tiempo del mundo mecanicista ejercen efectos sobre la materia (al definir qué es un movimiento inercial) pero no se ven afectados por ella. Esta situación insatisfactoria es modificada en la teoría de la relatividad general. El espacio y el tiempo dejan de ser externos e inmutables para conformar un sistema plástico y dinámico, el espaciotiempo, en relación directa con la materia que contiene. El fenómeno gravitatorio se reducía nada menos que a entender la estructura geométrica del espaciotiempo. El espaciotiempo se curva en presencia de materia de una forma precisa que especifican las ecuaciones de Einstein. En zonas apartadas de la materia esta curvatura se hace cero, dando lugar al espaciotiempo plano de la relatividad especial.

EL IMPERIO DEL CAMPO

El resultado de este periodo revolucionario fue por una parte la teoría cuántica, que tiene un concepto de materia modificado pero un concepto de espacio y tiempo mecanicista, y la teoría relativista, que tiene un concepto mecanicista de materia pero un concepto modificado de espacio y tiempo. Visto así es inmediato desear hacer una teoría que contenga ambos conceptos, los de materia y espaciotiempo, modificados. También es directo intuir que ya que ninguna de estas teorías se hizo pensando en la otra, combinarlas podría no ser sencillo.

Un primer intento por acercar relatividad y cuántica se hizo imponiendo solamente el requisito de velocidad máxima a la teoría cuántica, es decir, dejando a un lado la gravedad, o lo que es lo mismo, la plasticidad del espaciotiempo en relación a la distribución de materia. Así se llegó, después de un impás llamado teoría cuántica relativista en el que se descubrieron nuevas inconsistencias, a lo que hoy se conoce como teoría cuántica de campos relativistas (a la que nos referimos hoy día cuando hablamos sobre teoría cuántica fundamental). Esta síntesis de ideas proporciona una visión uniforme de las materias lumínica y no lumínica. A cada tipo de constituyente elemental le corresponde un campo (una entidad continua, asimilable a un tipo de estanque). Las excitaciones ondulatorias de cada uno de estos campos corresponden a las diferentes partículas elementales, ya sean fotones para la luz o diversos tipos de fermiones (electrones, quarks, etc.) para la materia no lumínica. Estos campos son cuánticos, lo que significa que su forma no está perfectamente determinada, solamente

a un nivel probabilístico. Esta teoría proporciona un marco explicativo muy poderoso sobre la estructura de la materia y se ve refrendada en los laboratorios de altas energías diariamente.

Volviendo la mirada a la gravedad, la geometría del espaciotiempo, vemos que ella también puede considerarse un campo. Por tanto, se puede decir que la física contemporánea imagina el mundo como un serie de campos en interacción donde uno de ellos, el gravitatorio, desempeña el papel especial de contenedor o soporte del resto. Hasta aquí todo maravilloso, el problema es que el campo gravitatorio de la relatividad general no es cuántico y el resto sí.

INCONSISTENCIA CLÁSICO CUÁNTICA

Como ya hemos apuntado, las ideas de la mecánica cuántica material se pueden trasladar del espacio y el tiempo usado en la descripción mecanicista a un espaciotiempo relativista, siempre que este espaciotiempo sea fijo y externo a la teoría cuántica. El punto crucial es que en la mecánica cuántica estándar el espaciotiempo no es cuántico. La relatividad general nos dice, sin embargo, que el espaciotiempo debe su forma a la distribución de materia que contiene. Pero entonces, ¿cómo puede ser compatible tener un espaciotiempo perfectamente determinado si la materia que lo determina en última instancia es cuántica y, por tanto, no perfectamente determinada? En general, parece que tener entidades clásicas y cuánticas en interacción conlleva inconsistencias. Por ejemplo, un famoso análisis de Eppley y Hannah de 1975 mostraba cómo una interacción clásico-cuántica en gravedad llevaría a violaciones de la conservación del momento, del principio de incertidumbre o del postulado de la luz. Estas inconsistencias llevan a pensar en la necesidad de cuantizar la gravedad o, lo que es lo mismo, la estructura del espaciotiempo.

Desde un punto de vista exclusivamente lógico se podría concluir igualmente que evitar inconsistencias necesita de la existencia de una teoría clásica para la materia, que maneje los hilos de la mecánica cuántica, o una teoría híbrida en la que no hubiera ni aspectos puramente clásicos ni cuánticos. La primera vía ha suscitado muchos argumentos de imposibilidad (teoremas que dicen esencialmente que no se puede reducir lo cuántico a lo clásico); además, volver a formulaciones clásicas para la materia se antoja anticuado. Por su parte, la segunda vía viene siendo explorada pero de forma muy minoritaria y no



tiene todavía una formulación precisa y completa.

Probablemente el sabor fundamental de lo cuántico y la previsión de que incorporaría aspectos discretos a la descripción del espaciotiempo –cosa atractiva, entre otras cosas, por su potencial eliminación de infinitos en teoría de campos (ver más adelante) y por sugerir la existencia de un límite al desmenuzamiento del mundo en ingredientes más y más pequeños– han estado detrás de que la vía más explorada haya venido siendo la cuantización de la gravedad. Sin embargo, creo que es bueno tener presente que gravedad cuántica podría ser cualquier teoría que contuviese de forma armónica lo cuántico y lo espaciotemporal.

PROBLEMAS CON LA CUANTIZACIÓN

La forma más directa de cuantizar la gravedad era seguir las reglas del resto de teorías de campos cuánticos sobre un espaciotiempo plano. La cuantización perturbativa, como viene a llamarse, evidenció dificultades considerables cuando se aplicó a la gravedad. Cuando se calcula por medio de las teorías cuánticas de campos estándar el valor de magnitudes medibles en laboratorio, en vez de dar lugar directamente a números reales finitos (3.33, 7.5, etc.) aparecen divergencias, números infinitos. No obstante, existe un procedimiento matemático con una sólida base física y conocido

como renormalización con el se pueden controlar estos infinitos y extraer de ellos los resultados finitos buscados (por ejemplo, estos cálculos dan lugar en el caso del campo electromagnético cuántico a resultados muy precisos). Sin embargo, se demostró que la teoría cuántica del campo gravitatorio es no renormalizable perturbativamente, es decir, los infinitos que aparecen en los cálculos no pueden ser absorbidos en un número finito de parámetros, lo que los hace parecer incontrolables. La gravedad empezó así a adquirir fama de arisca y el problema de cuantizar la gravedad fama de difícil, a la vez que fundamental.

El problema debía ser abordado de forma más sutil o indirecta. Antes de pasar a describir algunas de las estrategias alternativas de cuantización de la gravedad que se han venido y vienen investigando, creo adecuado hacerse una pregunta como si de abogado del diablo se ejerciera:

¿TENEMOS QUE PREOCUPARNOS?

Consistencia y más consistencia. Tener una forma satisfactoria y armónica de imaginar el mundo no es desdeñable, pero ¿qué pasaría si en la práctica no hubiese ningún fenómeno que requiriese del uso simultáneo de la mecánica cuántica y de la relatividad general? Dado un fenómeno, solamente habría que catalogarlo en primera instancia como cuántico o gravitatorio y a partir de ahí tendría una explicación satisfactoria. Sin embargo, no parece que este sea el caso. Existen al menos tres situaciones en las que entender el fenómeno parece requerir poseer una teoría de gravedad cuántica, entendida en su forma más amplia.

EL COLAPSO ESTELAR. La relatividad general nos dice que cuando una estrella colapsa bajo su propia gravedad hay un momento en que nada puede detener el colapso, lo que conduce a la formación de un agujero negro. En el interior de un agujero negro astrofísico cantidades ingentes de materia acabarían compactándose en regiones de tamaño subatómico. Es de esperar que entender cómo se comportan estas regiones requiera apelar tanto a la gravedad (situación con mucha materia y por tanto con gran curvatura espaciotemporal), como a la cuántica (situación con elementos microscópicos). La gravedad cuántica debería tener la llave para desentrañar el comportamiento de tales regiones extremas, que pueden afectar a toda la física del agujero negro, especialmente a su horizonte de sucesos.

UN ORIGEN EXPLOSIVO PARA EL UNIVERSO. El universo que habitamos parece ser el producto de la expansión de una de estas regiones extremas, una que contendría un embrión completo de universo. De nuevo, entender el desarrollo embrionario del universo necesita de la gravedad cuántica.

LA ENERGÍA OSCURA. Observaciones en la última década indican que las galaxias se expanden en la actualidad de forma acelerada, contrariamente a como se espera debido a la gravedad estándar. Es como si el universo estuviera lleno de una materia repulsiva, denominada energía oscura. Resulta que el vacío cuántico se comporta gravitatoriamente justo como este tipo de materia. Quizá entender el comportamiento del universo a gran escala requiera entender la naturaleza del vacío a escala microscópica, una vez más un maridaje entre lo cuántico y lo espaciotemporal.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

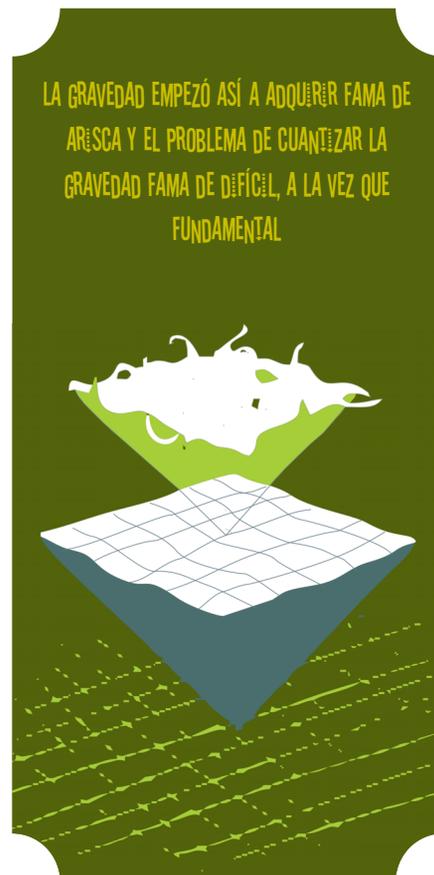
El problema de la gravedad cuántica se viene atacando desde diferentes perspectivas desde hace ya más cuarenta años. En este tiempo hemos avanzado enormemente en el entendimiento de los diferentes problemas estructurales que han ido apareciendo. Aún así, podemos decir que a día de hoy no hay una teoría de gravedad cuántica completamente satisfactoria.

Hay un problema central y recurrente en los distintos intentos por construir una teoría de gravedad cuántica. Debido probablemente a cómo nació, la teoría cuántica se encuentra a gusto cuando hay estructuras fijas a priori en la construcción. Por el contrario, la relatividad general parece repudiar este tipo de estructuras. Parece necesario aliviar esta tensión. Unas aproximaciones al problema se inclinan por salvaguardar en lo posible las nociones cuánticas, otras por salvaguardar las relativistas. La receta perfecta probablemente esté aún por llegar. Sin entrar en detalles técnicos (y sin pretender que se entiendan completamente dado lo breve de las reseñas), voy a mencionar algunas de estas aproximaciones para dejar un sabor del tipo de estructuras bajo análisis.

GRAVEDAD CUÁNTICA DE LAZOS. Es un tipo de cuantización no perturbativa que parte de la inexistencia de estructuras espaciotemporales fijadas a priori (a veces se habla de independencia del fondo). La geometría del espacio es discreta teniendo estados donde las áreas y volúmenes aparecen solo en uni-

dades de unas áreas y volúmenes elementales. Todavía no se sabe controlar completamente la versión espaciotemporal. El nombre lazos le viene de la forma de lazo de una de las variables fundamentales que aparece en su descripción matemática.

TEORÍA DE SUPERCUERDAS. Esta teoría supone que los constituyentes elementales son cuerdas (no partículas) enrolladas microscópicamente hasta hacerse pasar por partículas. Sorprendentemente, una de las excitaciones de una cuerda cerrada se comporta precisamente como un elemento espaciotemporal (un gravitón). Es por esto que la teoría de



cuerdas se considera una teoría de gravedad cuántica. La teoría además contiene de forma unificada la materia y el espacio-tiempo. Utiliza como elemento fiduciario el espaciotiempo plano de la relatividad especial. Aunque es una teoría con un alto nivel de consistencia, tiene el grave problema de que su dinámica puede ser tan compleja que no es fácil extraer de ella predicciones claras.

SALVAGUARDA ASINTÓTICA. Dijimos que la gravedad cuántica perturbativa no era renormalizable. Sin embargo, aún podría ser renormalizable no perturbativamente. Esto sucedería si la teoría tuviera un punto fijo del llamado flujo de renormalización, algo que

no se conoce todavía. En la actualidad se está viendo que los múltiples infinitos que aparecen en la cuantización perturbativa pueden ser más manejables de lo que se pensó inicialmente. Las técnicas de integral de camino son fundamentales en esta aproximación.

GRAVEDAD EMERGENTE. Esta aproximación parte de la hipótesis de que quizá la gravedad no tenga que ser cuantizada, sino que solamente tenga sentido clásico, y que los ingredientes que subyacen a la materia cuántica y al espaciotiempo pudieran tener una naturaleza muy distinta a la de los campos con los que estamos acostumbrados a tratar. Esta aproximación al problema recoge lecciones sobre cómo aparecen distintos comportamientos colectivos en la física de la materia condensada.

EPÍLOGO

Posiblemente gran parte de la dificultad en construir una teoría de gravedad cuántica tenga su origen en la inaccesibilidad de los fenómenos gravito-cuánticos a la observación y experimentación. Sin una retroalimentación experimental es difícil progresar paso a paso. Además, difícilmente se llegará a una teoría única exclusivamente por argumentos de consistencia formal. El juez supremo en todas las cuestiones físicas es siempre la naturaleza y a ella tendremos que recurrir finalmente. Afortunadamente, también aquí se ha avanzado mucho y quizá pronto tengamos observaciones con un marcado carácter gravito-cuántico (por ejemplo, se espera tener pronto la fotografía del horizonte de un agujero negro).

Las observaciones a su vez requieren del aparato teórico: sin las gafas teóricas adecuadas los hechos pueden fácilmente pasar desapercibidos. No sabemos a qué altura del camino estamos por lo que lo mejor es seguir caminando. La búsqueda de la gravedad cuántica tiene el sabor romántico de la búsqueda de Shangri-La, El dorado o el Santo Grial, una última frontera desde donde todo se verá iluminado. Es una debilidad humana creer en últimas fronteras, y una debilidad maravillosa pues nos motiva a emprender caminos realmente arduos que solo al tiempo empiezan a verse salpicados de sabiduría. Si de algo estoy seguro es de que la gravedad cuántica no será la última frontera de la física. Sin embargo, les puedo asegurar que el camino hacia este deseo de unidad es iluminador y apasionante.

Ilustraciones procedentes de la web <http://whystringtheory.com/>

EL SQUARE KILOMETRE ARRAY (SKA) SERÁ EL MAYOR RADIOTELESCOPIO DEL MUNDO, CON UN KILÓMETRO CUADRADO DE ÁREA COLECTORA, FORMADO POR MILES DE RECEPTORES UBICADOS EN ÁFRICA Y AUSTRALIA, ORGANIZADOS EN TRES CONFIGURACIONES QUE PERMITIRÁN OBSERVACIONES PROFUNDAS Y DE GRAN DETALLE DEL CIELO, TOMADAS EN MUCHO MENOS TIEMPO QUE LOS RADIOTELESCOPIOS ACTUALES. UNO DE SUS OBJETIVOS PRINCIPALES SERÁ EL ESTUDIO DEL HIDRÓGENO CÓSMICO, LA MATERIA PRIMA DE ESTRELLAS Y GALAXIAS, A LO LARGO DE LA HISTORIA DEL UNIVERSO. LOS DATOS QUE OBTENDRÁ TENDRÁN UN IMPACTO DIRECTO EN ÁREAS COMO LA FÍSICA FUNDAMENTAL, LA ASTROFÍSICA Y LA ASTROBIOLOGÍA.

SQUARE KILOMETRE ARRAY

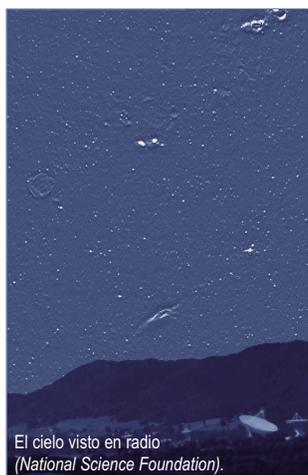
SKA

1

RADIOASTRONOMÍA

La capacidad de un telescopio de distinguir por separado dos fuentes en el cielo (resolución angular) depende directamente de la longitud de onda e inversamente de la apertura del telescopio. Por ello una buena resolución en las largas longitudes de onda de radio requiere de un telescopio de enorme apertura, lo que hace posible la técnica conocida como interferometría, en la que las distintas antenas trabajan de forma conjunta. El SKA será el interferómetro más grande y sensible del mundo, con una extensión de miles de kilómetros y un área combinada equivalente a un kilómetro cuadrado (de ahí el nombre de *Square Kilometre Array*).

El SKA observará en una gama de frecuencias de 50 MHz a 20 GHz, equivalente a longitudes de onda de entre cuatro metros y tres centímetros, lo que le permitirá observar el átomo de hidrógeno, esencial en radioastronomía.



El cielo visto en radio
(National Science Foundation).

El átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón, y ambos tienen una propiedad conocida como "espín", una especie de giro. Los espines del protón y electrón pueden ser paralelos o antiparalelos entre sí, lo que corresponde a diferentes estados de energía. Al cambiar de estado de energía el átomo de hidrógeno puede emitir energía con una longitud de onda de 21 cm (equivalente a 1.420 MHz) que se observa en radio. Las señales de radio interactúan poco con la materia que atraviesan, y por este motivo permiten estudiar áreas del espacio ocultas por el polvo cósmico, imposibles de observar con telescopios ópticos.



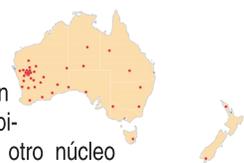
El SKA constará de varios miles de receptores que estarán repartidos entre una región central, el núcleo, y una extensa región con la forma de los brazos de una espiral, un diseño que optimiza las diferentes configuraciones: proporciona numerosas separaciones y ángulos (líneas de base) entre antenas, lo que permite producir imágenes de gran

2

EMPLAZAMIENTO

resolución espacial.

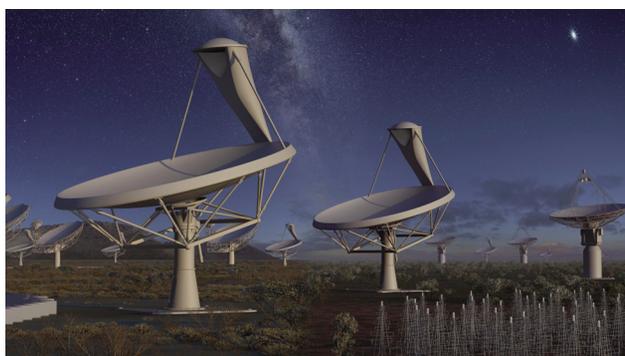
Estará ubicado en dos regiones: un núcleo estará en Murchison (Australia), con la espiral llegando a Nueva Zelanda y Tasmania, y otro núcleo estará en Karoo (Sudáfrica), y la espiral abarcará Botswana, Ghana, Kenia, Madagascar, Mauricio, Mozambique, Namibia y Zambia. La sede de la Organización SKA está en el Reino Unido.



3

TECNOLOGÍA

El SKA utilizará varios miles de platos que operarán en altas frecuencias, y otros varios miles de telescopios llamados "redes de dipolos" que operarán en bajas y medias frecuencias. Sus señales astronómicas se combinarán para emular un telescopio con un tamaño igual a la máxima separación entre los telescopios individuales, como si de un radiotelescopio gigante se tratara. Actualmente existen dos telescopios precursores que están poniendo a prueba distintas tecnologías para el SKA: ASKAP y MeerKAT, ubicados respectivamente en Australia y en Sudáfrica, y que se integrarán con SKA.



4

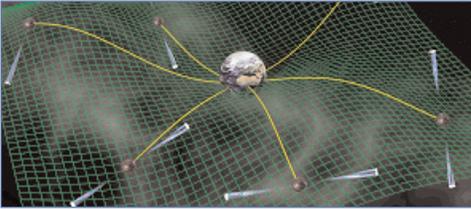
CONSTRUCCIÓN



El núcleo de la organización del SKA está formado por once países miembros: Australia, Canadá, China, Alemania, Italia, India, Nueva Zelanda, Sudáfrica, Suecia, los Países Bajos y el Reino Unido. Asimismo, alrededor de cien organizaciones de veinte países participan en el diseño y desarrollo del proyecto SKA, que culminará con un diseño detallado del telescopio en 2016, lo que permitirá la construcción de la primera fase del SKA entre 2017 y 2023. Para ello se han formado consorcios internacionales con expertos de todo el mundo que incluyen una amplia gama de actividades industriales, de ingeniería y científicas distribuidas en paquetes de trabajo: Ensamblaje, integración y verificación; Platos; Infraestructura; Estaciones de redes de dipolos de baja frecuencia; Estaciones de redes de dipolos de media frecuencia; Controlador del telescopio, Transporte de señal y datos; Procesador central de señal; Procesador de datos científicos.

DESAFIANDO A EINSTEIN

No sabemos si las predicciones de la relatividad general se mantienen en presencia de campos gravitacionales extremadamente fuertes, como los que existen en la vecindad de los púlsares y de los agujeros negros. Con el SKA se buscarán sistemas binarios de púlsar y agujero negro para estudiar el impacto del campo gravitatorio en forma de perturbaciones en el tejido del espaciotiempo. El SKA podrá medir con precisión el tiempo entre cada señal de los púlsares, estudiando las desviaciones del tiempo entre pulsos como posibles perturbaciones en el espaciotiempo.



MAGNETISMO CÓSMICO

Los campos magnéticos están por todas partes. Son un elemento clave para el inicio de la formación de estrellas, así como para la evolución de las galaxias y los cúmulos de galaxias, y controlan la densidad y distribución de los rayos cósmicos en el medio interestelar. Pero sabemos muy poco sobre los campos magnéticos primordiales: ¿cuándo y cómo se generaron? Cuando la radiación polarizada de un objeto distante atraviesa, en su camino hacia la Tierra, una región magnetizada, las propiedades de la radiación se alteran, fenómeno conocido como "rotación de Faraday". Esta rotación es una medida directa del campo magnético.

La capacidad de SKA para detectar señales muy débiles y obtener múltiples medidas de todo el cielo permitirá medir la rotación de la emisión de radio polarizada y así estudiar detalladamente el magnetismo de todo tipo de objetos.

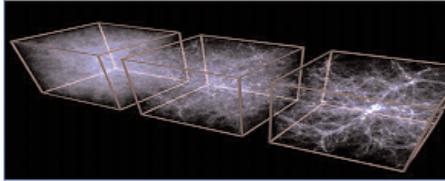
6 SKA EN ESPAÑA Y PAPEL DEL IAA

INTERÉS Y PREPARACIÓN CIENTÍFICA PARA SKA

La comunidad científica española mostró su interés por el SKA durante la reunión de la RIA (Red de Infraestructuras de Astronomía) "Ciencia y Oportunidades Tecnológicas en la era de SKA", celebrada en mayo de 2011, así como con la creación de la Red española del SKA, financiada por el MICINN. La comunidad española está implicada en las áreas científicas clave de SKA, participando en más de catorce capítulos del libro "Astrofísica Avanzada con el Square Kilometre Array", así como en trabajos preparatorios mediante los radiointerferómetros precursores de SKA (e-Merlin, EVLA, ASKAP, etc).

La SKA Organization (SKAO) se asesora a través de los grupos de trabajo asociados a los casos científicos de SKA, e investigadores del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) participan en varios de ellos, además de coordinar la edición del

5 PROYECTOS CLAVE



SONDEANDO EL AMANECER CÓSMICO

Nuestra comprensión de la cosmología se ha expandido mucho en los últimos años, con telescopios como WMAP y Planck proporcionando "fotos de la infancia" del universo, cuando tenía una edad de trescientos mil años. En los siguientes quinientos mil millones de años las estructuras colapsaron bajo la gravedad y se formaron las primeras galaxias. Un importante reto para la cosmología reside en explorar ese amanecer cósmico, el momento en que las primeras galaxias se formaron. La sensibilidad del SKA permitirá estudiar el período que comienza 380.000 años después del Big Bang, cuando el universo era esencialmente oscuro, hasta que las primeras galaxias comenzaron a brillar.

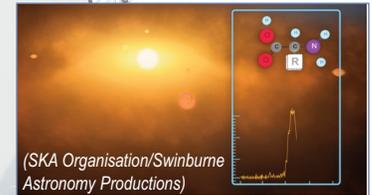
LA ENERGÍA OSCURA Y LA EVOLUCIÓN GALÁCTICA

Nuestro universo parece estar en expansión acelerada, pero desconocemos la causa, que se viene identificando con una hipotética "energía oscura", presente en todo el universo y responsable de su aceleración.

La capacidad del SKA para detectar señales muy débiles permitirá cartografiar la distribución del hidrógeno neutro y llevar a cabo el más profundo y detallado estudio de los efectos gravitacionales de las galaxias y los cúmulos de galaxias en la trayectoria de las ondas de radio, y ayudará a vislumbrar cómo evolucionaron las primeras galaxias.

LA CUNA DE LA VIDA

¿Estamos solos en el universo? La existencia de vida en otros mundos es un tema fundamental en la astronomía y en la biología, y una cuestión importante para la humanidad. Los astrobiólogos utilizarán el SKA para buscar aminoácidos, los componentes básicos de la vida, mediante la identificación de sus líneas espectrales en frecuencias específicas. SKA sería además capaz de detectar señales de una civilización extraterrestre tecnológicamente avanzada, de intensidad comparable a la de nuestras transmisiones de televisión, a decenas de años luz.



(SKA Organisation/Swinburne Astronomy Productions)

Spanish SKA White Book, en el que se presentará la ciencia de interés para la comunidad española que SKA permitirá realizar. España es también un miembro del *SKA Communications and Outreach Network* (SKA-CON), representada por las Unidades de Comunicación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA) y de la Universidad de Valencia.

TECNOLOGÍA

Desde noviembre de 2011 el IAA lidera el Estudio de viabilidad de la participación española tecnológica en el SKA (VIA-SKA), con participación de siete centros académicos y ocho universidades. Tras un sondeo detallado de las capacidades de centros tecnológicos y empresas españolas, clasificadas por dominios y paquetes de trabajo de SKA (hay registradas más de cuarenta empresas), el interés tecnológico de centros y empresas españolas en SKA quedó confirmado en la reunión "SKA: Posición estratégica y futuras oportunidades para la industria española", celebrada en Madrid en noviembre de 2012. A partir de la memoria presentada por VIA-SKA a la RIA, esta recomendó la exploración de la posibilidad de participar en el proyecto SKA como

miembro de pleno derecho antes del comienzo de la fase de construcción, dado el interés de la comunidad científica y la industria en el SKA. En octubre de 2014 el IAA organizó el Spanish SKA day, la primera conferencia española en torno al SKA que ha reunido a científicos, ingenieros de centros académicos y empresas.

Los investigadores españoles participan en diferentes grupos de trabajo de SKA desde 2012, y actualmente nueve centros de investigación españoles y once empresas están contribuyendo a los esfuerzos de diseño del SKA en seis paquetes de trabajo, con una participación estimada en dos millones de euros reconocida por la Junta Directiva del SKA. Desde octubre de 2013 un representante del gobierno español viene siendo invitado regularmente a participar en las reuniones de dicho comité.

España ha venido posicionándose para lograr el máximo retorno científico del SKA, así como para contribuir en paquetes de trabajo del SKA de relevancia tecnológica y alto potencial de innovación, esfuerzo que podrá ser aprovechado si nuestro país se convierte en miembro de pleno derecho de la que será la mayor infraestructura científica sobre la Tierra.



el "Moby Dick" de...

... Guillem Anglada (IAA)

HH30: El jet que no tenía cabeza

En los años 50 del siglo pasado, George Herbig y Guillermo Haro descubrieron en la vecindad de algunas estrellas jóvenes unas extrañas nebulosidades, que actualmente se conocen como objetos Herbig-Haro (HH). Inicialmente se creyó que los objetos HH contenían embriones estelares, pero después se constató que eran material expulsado por las estrellas en formación, que se movía a velocidades de más de 300.000 km/h.

En la década de los 80 los detectores CCD reemplazaron a las placas fotográficas, revelando que estos objetos HH eran las partes más brillantes de unos chorros colimados (*jets*) que emergían de las estrellas jóvenes a velocidades supersónicas. El jet asociado a HH30 fue uno de los primeros jets descubiertos (en 1983), gracias al telescopio de 2,2 m de Calar Alto.

Mi interés en el jet de HH30 empezó en 1993 cuando, conversando con Robert Estalella, Rosario López y Angels Riera, Alejandro Raga nos comentaba que le llamaba la atención que ese jet no tuviera "cabeza". Se refería a que sus modelos hidrodinámicos predecían la formación de un "choque de proa" (la "cabeza") donde el jet impacta con el medio interestelar, de modo análogo a lo que ocurre en la proa de un barco que surca el mar. Entonces no nos imaginábamos que HH30 se convertiría en un "Moby Dyck" cuya persecución nos ocuparía durante bastantes años.

Propusimos observar el jet de HH30 con el detector de gran campo recién instalado en el telescopio Isaac Newton, a fin buscar su cabeza en una zona más amplia que la abarcada por las imágenes anteriores. Obtuvimos una imagen donde se veían unas nebulosidades lejanas, alineadas con el jet, que parecían corresponder a su cabeza algo desfigurada, después de haber recorrido una larga distancia. Pero para probarlo teníamos que demostrar que estas nebulosidades se movían, alejándose de la estrella (invisible) donde se origina el jet, de modo que hacía falta una segunda imagen. Nos negaron el tiempo de observación en el Isaac Newton pero la conseguimos con el telescopio de San Pedro Mártir (México). La comparación de ambas imágenes sugería que, efectivamente, las nebulosidades se habían movido y en la dirección correcta. El resultado era esperanzador, pero la diferente cali-



Guillem Anglada nació en Ciutadella (Menorca). Se doctoró en Ciencias Físicas en la Universidad de Barcelona en 1989. Ha sido Profesor Titular interino en la Universidad de Barcelona, Investigador Titular B en la UNAM y *Visiting Scientist* en el *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*. Actualmente es Investigador Científico del CSIC en el Instituto de Astrofísica de Andalucía.

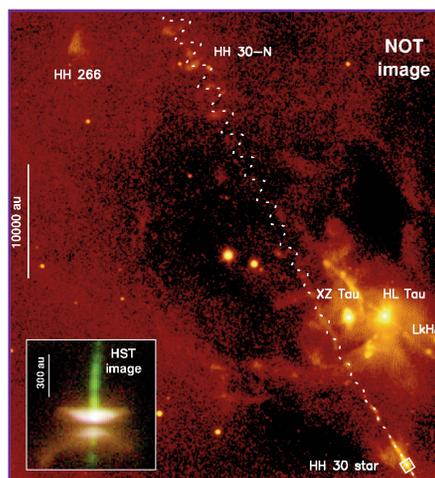
dad de las imágenes dificultaba la comparación, y quedaban dudas...

En 1998, con Pepa Masegosa, propusimos usar el instrumento ALFOSC en el telescopio NOT (La Palma) para hacer un seguimiento durante varios años y medir bien el

Sin embargo, a mí me intrigaba la forma serpenteante del jet que se apreciaba en nuestras imágenes. Acababa de publicarse un artículo que analizaba las posibles causas de la curvatura de los jets, entre ellas el movimiento orbital en un sistema binario de estrellas. Pero las ecuaciones de aquel artículo no lograban explicar la trayectoria del jet de HH30. Descubrí que el artículo omitía el efecto de la fuerza centrífuga, un problema que Alejandro resolvió correctamente poco después. Entonces las cosas empezaron a tener sentido. Las nuevas ecuaciones ajustaban perfectamente la trayectoria e inferimos que la estrella donde se originaba el jet tenía una compañera separada 18 UA (1 UA es la distancia de la Tierra al Sol).

Poco después, un grupo francés descubrió que el disco tenía una cavidad central. Al conocer nuestro trabajo, atribuyeron aquella cavidad al efecto de las fuerzas de marea del sistema binario, y con ello lograron calcular la separación que debería existir entre las estrellas. Obtuvieron justamente el mismo valor de 18 UA que con nuestro estudio del jet. Quedaban pocas dudas de que la estrella donde se originaba el jet tenía una compañera cercana.

Pero esto entraba en conflicto con la interpretación que se había dado a los resultados del telescopio espacial. El radio del disco visto con el telescopio espacial era 250 UA, ¡mucho mayor que la separación entre la estrellas! Por tanto, ese disco debería ser un disco circumbinario (alrededor del sistema binario), no un disco circunestelar (alrededor de una sola estrella). El arquetipo de sistema disco-jet resultó no serlo. El "verdadero" disco asociado al jet de HH30 tiene que ser cincuenta veces menor que el que observó el telescopio espacial. Hasta ahora nadie ha visto este disco ni el sistema binario, ocultos (en luz visible) por el disco mayor. Pero esto no supone un obstáculo para las ondas de radio y con los nuevos radiointerferómetros ultrasensitivos esperamos encontrarlos. Aunque las cosas no siempre son lo que parecen, y puede que esta nueva búsqueda también depare sorpresas...



HH30 visto por el NOT y por el telescopio espacial Hubble.

movimiento de esas débiles nebulosidades. Obtuvimos un par de imágenes espectaculares, con las que se podía mejorar mucho la medición. Alejandro, impaciente, preparó rápido un borrador para su publicación, pero yo era partidario de esperar a tener el juego completo de resultados. Entonces las cosas se torcieron. Por las características del objeto, el momento idóneo para observarlo era la luna nueva de noviembre. Pero el mal tiempo impidió conseguir una tercera imagen en los seis años siguientes. Finalmente, publicamos el trabajo en 2007 con solo dos imágenes, un retraso que Alejandro aún no me ha perdonado.

Entre tanto, el jet se había hecho famoso. El telescopio espacial Hubble obtuvo una imagen en la que se veía la silueta del disco de acreción donde supuestamente se originaba el jet. Esta imagen hizo las delicias de los teóricos, quienes hasta entonces no habían tenido una confirmación observacional tan clara de esos discos. La silueta del disco mostraba un perfil acampanado, tal como establecen los modelos, y HH30 se convirtió en el icono del sistema disco-jet, que se supone caracteriza las primeras etapas de la formación de una estrella como el Sol.

La controvertida historia de los tasaday

POR EMILIO J. GARCÍA (IAA)

En junio de 1971, un pequeño grupo de hombres se interna en lo más profundo e inexplorado de la jungla de la isla filipina de Mindanao. Comanda el grupo el controvertido Manuel Elizalde Jr., perteneciente a una de las familias más adineradas de Filipinas, educado en Harvard y con fama de iconoclasta. Elizalde ocupa la jefatura de la PANAMIN, la agencia creada por él mismo bajo el auspicio de presidente Ferdinand Marcos para proteger a las minorías étnicas y culturales de las islas.

El equipo lleva tiempo persiguiendo entre la selva un rumor, algo que un cazador mencionó en una ocasión a Elizalde: la existencia en plena jungla de una tribu muy primitiva, aislada, sin apenas contacto alguno con el exterior desde hace miles de años.

Elizalde y su grupo cumplen su objetivo y encuentran lo que tan ansiosamente buscaban: un pequeño grupo de hombres, mujeres y niños, que se cubren con hojas, duermen en cuevas, se alimentan exclusivamente de lo que les ofrece el bosque y practican un dialecto desconocido incluso para las aldeas vecinas. Son los tasaday.

El descubrimiento de los tasaday constituye un verdadero bombazo. Los antropólogos están absolutamente fascinados con ellos: no practican la agricultura, su dialecto es desconocido y además no conocen el tabaco, un test que se utiliza para medir el aislamiento de una tribu. Es como si el tiempo se hubiera congelado en plena edad de piedra.

Una tribu sin contacto con el resto de la humanidad, que creía que su bosque era todo el universo existente y ellos sus únicos pobladores, y cuyo lenguaje no incluye palabras para el concepto de guerra o violencia. Es el idealismo de lo natural, de la pureza, es el edén encontrado... y Elizalde es su protector y así se encarga de mostrárselo al mundo.

Se sucede una avalancha de visitas de antropólogos, periodistas y curiosos. Los tasaday aparecen en todos los medios, son protagonistas de numerosos documentales e incluso portada del *National Geographic*. Celebridades como Charles Lindberg o Gina Lollobrigida los visitan como si de una exhibición de feria se tratara.

Y Elizalde aparece como el gran héroe. Sin

embargo, pronto surgen las primeras dudas: ¿dónde están los huesos de sus muertos que supuestamente abandonan en el bosque? ¿por qué no hay basura en sus cuevas acumulada durante siglos? ¿cómo explicar su supervivencia con una dieta tan extremadamente baja en calorías? ¿cómo justificar la ausencia de enfermedades propias de la endogamia? ¿cómo es posible asumir su aislamiento si apenas a tres horas de distancia a pie existe un poblamiento rural grande?

para ver qué ha ocurrido con los tasaday. Y no dan crédito a lo que ven. Los tasaday no viven en cuevas ni visten taparrabos de hojas. Al contrario, habitan chozas y visten con vaqueros y camisetas: ¿dónde está la tribu del edén perdido?

Para colmo, algunos tasaday confiesan haber sido pagados por Elizalde para vestir como indígenas primitivos y posar ante periodistas y antropólogos cuando realmente eran miembros de aldeas cercanas.

El escándalo era mayúsculo. Para muchos, el hallazgo de los tasaday había sido un plan del inefable y totalitario gobierno de Ferdinand Marcos para ensalzar el prestigio de Filipinas, y Elizalde había sido su ejecutor. El edén era un fraude.

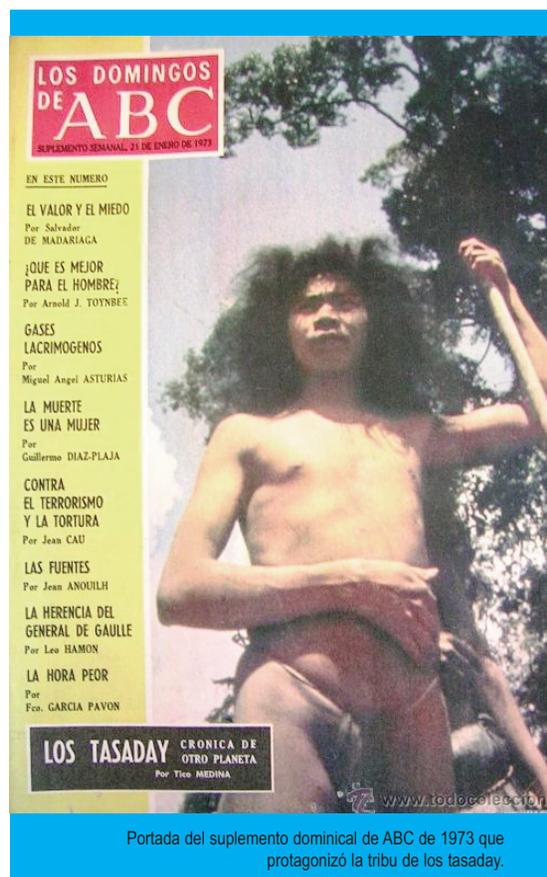
Elizalde, exiliado desde 1983 en Costa Rica, monta en cólera y comienza una campaña a favor de los tasaday. Incluso hace que algunos de sus miembros se desplacen para que demandaran a todo investigador que se atreviera a defender la idea de fraude: ¡la primera tribu primitiva que impone un pleito por difamación!

Sin embargo, algunos científicos comienzan a encontrar pruebas a favor de la veracidad de los tasaday. El semiólogo Lawrence Reid, tras convivir con ellos durante largos periodos, demuestra que el dialecto tasaday no solo es diferente a los de alrededor, sino que mantiene raíces comunes con el que se hablaba en el valle de Kulaman en Manobo desde hacía ciento cincuenta años. Para Reid, los tasaday se separaron de esta comunidad hacía cerca de doscientos años y habían permanecido realmente aislados desde entonces.

Y, para mayor controversia, los tasaday que habían confesado el fraude rectifican y aseguran esta vez que les habían presionado para decir que todo era falso cuando no era así, y todo a cambio de tabaco y ropas.

Y no era algo de extrañar. En aquellos años el nuevo gobierno filipino se había embarcado en una campaña de demonización de todo lo que el gobierno de Marcos había hecho anteriormente, y los tasaday habían sido una de las joyas de la corona.

Actualmente se piensa que los tasaday no son un tribu de la edad de piedra, pero sí gente muy primitiva y aislada, que vivían muy cerca de la naturaleza, en su edén particular, hasta que fueron descubiertos.



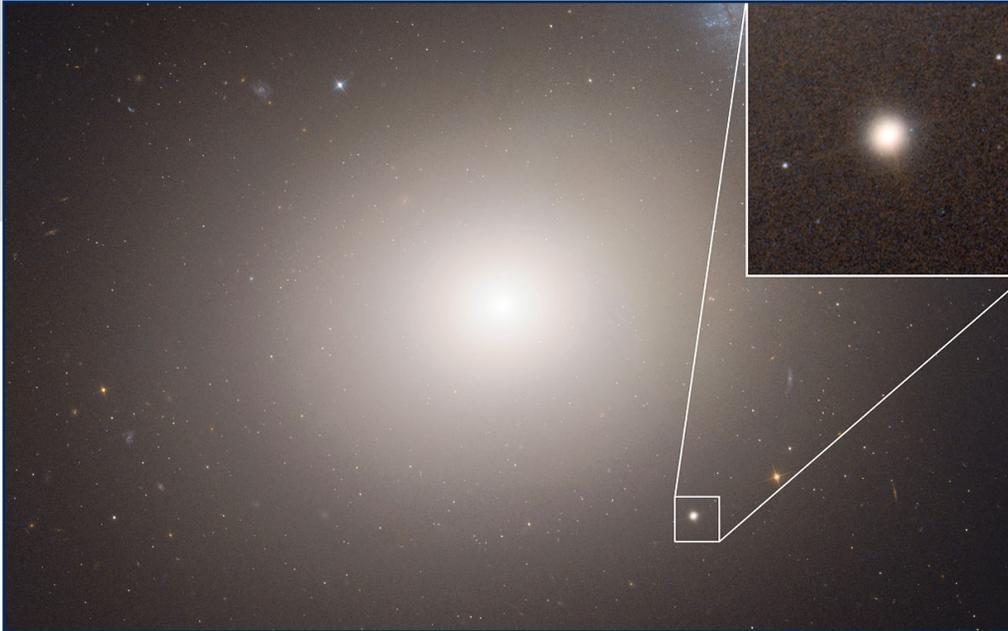
Portada del suplemento dominical de ABC de 1973 que protagonizó la tribu de los tasaday.

Un aislamiento forzoso

Los antropólogos piden al gobierno más tiempo para investigar, pero Elizalde, supuestamente en aras de la preservación de los tasaday, decide crear una zona reservada alrededor de ellos que cerca con un muro y con la vigilancia de soldados armados. Expulsa a los antropólogos y periodistas, prohíbe las visitas y somete a los tasaday a un nuevo y mucho más duro aislamiento del que han vivido nunca.

Y así permanecen una década, hasta que en 1986 el gobierno del matrimonio Marcos cae derrocado. Ese mismo año, el antropólogo y reportero suizo Oswal Iten y el reportero filipino Joey Lozano se adentran en la jungla

Un objeto exótico en un lugar inesperado



Observaciones de la galaxia enana ultracompacta M60-UCD1 han revelado la existencia de un agujero negro supermasivo en su núcleo



► Los agujeros negros continúan fascinándonos y sorprendiéndonos, por más que se hable ellos. Los descubrimientos astronómicos relacionados son muy frecuentes y suelen tener un impacto importante tanto en la comunidad científica como entre el público general a través de los medios de comunicación. Entre estos resultados cabe destacar tres de especial relevancia, obtenidos en los últimos veinticinco años :

- 1) Nuestra galaxia, la Vía Láctea, contiene un agujero negro supermasivo* en su centro, con una masa equivalente a unos cuatro millones de soles.
- 2) Muchas galaxias contienen agujeros negros supermasivos en el centro.
- 3) La masa del agujero negro está íntimamente relacionada con ciertas propiedades de la galaxia que lo alberga, como la luminosidad, la masa y la forma en que se mueven las estrellas.

Los tres resultados tienen una impli-

cación importante: los agujeros negros supermasivos parecen jugar un papel fundamental en la formación y la evolución de las galaxias. Hasta hace poco estos entes astronómicos (o más bien sus efectos) eran estudiados por una comunidad científica reducida en el contexto particular de las galaxias activas, es decir, galaxias donde el agujero negro central está siendo alimentado y presenta signos de una actividad frenética, en contraposición a la mayoría de las galaxias, como la nuestra, donde el agujero negro se halla latente. Las cosas han cambiado: los agujeros negros supermasivos deben ser tenidos en cuenta en cualquier teoría y estudio observacional que trate de explicar cómo se forman y evolucionan la mayoría de las galaxias.

En septiembre de 2014 un equipo de investigadores de la Universidad de Utah (EEUU) publicó un trabajo con resultados en principio desconcertan-

Arriba, imagen del telescopio espacial Hubble de la galaxia elíptica Messier 60, que mide unos 120.000 años luz y contiene unos cuatrocientos miles de millones de estrellas. El recuadro señala la posición de M60-UCD1, que orbita en torno a ella. (NASA, ESA and A. Seth - University of Utah, USA-)

Debajo, concepción artística del agujero negro supermasivo en M60-UCD1 (NASA, ESA, D. Coe, G. Bacon -STScI-).

tes: el hallazgo de un agujero negro gigantesco en un lugar bastante improbable, el centro de una de las galaxias más diminutas conocidas.

Se trata de una galaxia muy pequeña y compacta llamada M60-UCD1. Su diámetro, unos trescientos años luz, es trescientas treinta veces menor que el de la Vía Láctea. En este pequeño volumen se aglomeran ciento cuarenta millones de estrellas. Comparando con los más de cien mil millones de la Vía Láctea, M60-UCD1 es, pues, diminuta.

Los autores estudiaron cómo se mueven las estrellas en la zona más interna y midieron la asombrosa velocidad de 400.000 kilómetros por hora. Esto implica la existencia de un objeto de masa enorme, equivalente a unos veintitún millones de soles, en un volumen tan pequeño que la explicación más razonable apunta a un agujero negro supermasivo. M60-UCD1 pasó a formar parte de la galería de galaxias famosas, al convertirse en la galaxia más pequeña conocida con un agujero negro supermasivo.

Pero las sorpresas no habían terminado, pues la masa medida resultó ser mucho mayor de lo esperado. Para muchas galaxias se cumple la regla de que, cuanto mayor es la masa de todas las estrellas que contienen, mayor es la del agujero negro central. Así, esperaríamos que M60-UCD1, mucho menos masiva que la Vía Láctea, contuviera un agujero negro también mucho menor. Sin embargo no es el caso. En la Vía Láctea el agujero negro tiene una masa aproximadamente una diezmilésima parte (0.01%) de la masa de las estrellas, mientras que en M60-UCD1 es el 15%. En lugar de veintitún millones, esperaríamos una masa de un millón y medio de soles.

¿Por qué una galaxia diminuta tiene un agujero negro gigante?

Los autores proponen que en el pasado M60-UCD1 tenía más masa que en la actualidad. Pero hace unos diez mil millones de años chocó con la galaxia vecina M60, mucho mayor, lo que provocó su desgarramiento. M60 le arrebató un gran parte de las estrellas y la materia oscura en las zonas más externas y vulnerables.

M60-UCD1 quedó de este modo convertida en la galaxia diminuta y compacta que vemos hoy, pero conservó el gran agujero negro central. El futuro de M60-UCD1 no es nada halagüeño. Los investigadores creen que podría fusionarse completamente con M60. Esta alberga su propio agujero negro monstruoso (más de mil veces mayor que el de nuestra Vía Láctea) que, así mismo, fagocitará el que habita en el centro de M60-UCD1.

Montserrat Villar (CAB, CSIC-INTA)

*El término supermasivo se refiere a los agujeros negros más grandes, es decir aquellos que existen en el centro de muchas galaxias. Pueden tener una masa equivalente a un millón de soles y hasta más de mil millones de soles.

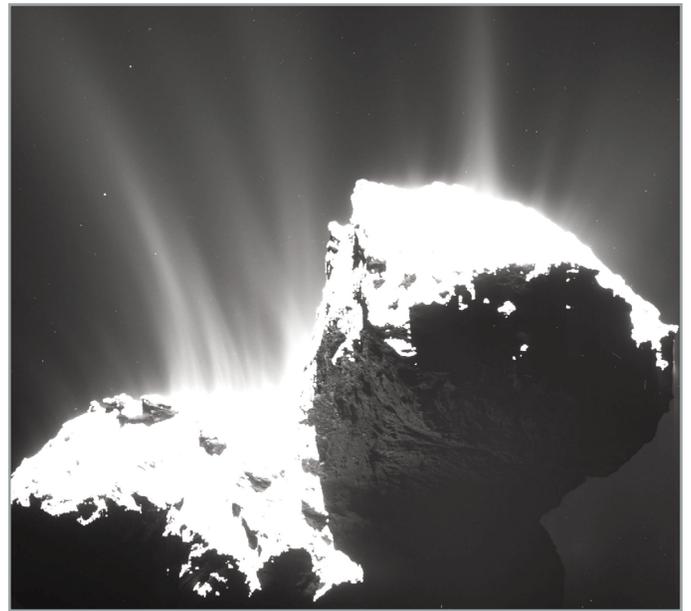
Tierra y el Sol), una distancia mucho mayor de lo esperado. Hasta la fecha, la actividad de 67P procede sobre todo del cuello del cometa, donde se han observado distintos chorros de polvo, aunque también se han hallado puntos de actividad menores en los lóbulos.

El análisis del polvo llevado a cabo por el instrumento GIADA ha permitido distinguir, además de las partículas expulsadas a través de los chorros, una nube de partículas que gira en torno al núcleo. Además, se ha calculado la proporción entre polvo y hielo, que en los modelos suele distribuirse a partes iguales, y se ha hallado una proporción de

polvo significativamente mayor, de entre dos y seis veces superior a la de hielo.

“Las medidas tomadas por GIADA, a una distancia que triplica la de la Tierra al Sol y donde la actividad del cometa es muy baja, nos han demostrado el perfecto funcionamiento del instrumento y permiten esperar unos resultados magníficos a partir de ahora, cuando el cometa aumente su actividad y, por tanto, la emisión de partículas”, concluye José Juan López Moreno, investigador del IAA-CSIC que participó en el desarrollo del instrumento.

Silbia López de Lacalle (IAA)



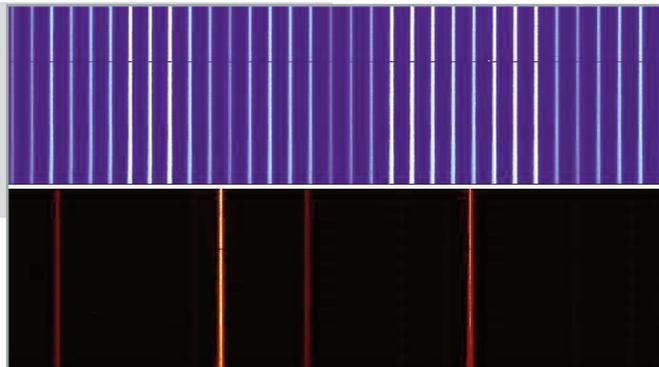
Chorros de polvo emergiendo del núcleo del cometa. Fuente: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA.

Un peine de luz para conocer el universo

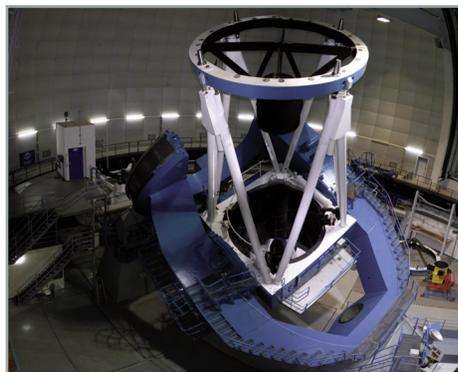
El Observatorio de Calar Alto (CAHA) acoge un innovador instrumento óptico desarrollado por el Instituto Leibniz de Astrofísica (AIP) y el centro innoFSPEC

► Gracias a la espectroscopía hemos conocido la composición del Sol o la expansión del universo, y su potencial para la obtención de resultados revolucionarios ha motivado la búsqueda de métodos de calibración de alta precisión para los espectrógrafos. Y el “peine de frecuencias ópticas” o “peine de luz” se presenta como la opción más prometedora. Investigadores del Instituto Leibniz de Astrofísica en Postdam (AIP) y el centro alemán innoFSPEC han desarrollado un prototipo que ha sido probado con éxito en el Observatorio de Calar Alto (CAHA).

La espectroscopía descompone la luz de los objetos celestes en un patrón de líneas que corresponden a los elementos químicos que componen el objeto. Y para analizar esas líneas es necesario calibrar el espectrógrafo empleando una fuente de luz conocida, como las



Comparación del espectro del peine de luz (arriba) con el de una lámpara de neón que muestra las ventajas del primero al producir más líneas de emisión y más regulares que la lámpara convencional. Izda: telescopio de 3,5 metros del observatorio de Calar Alto.



lámparas de helio o neón. Sin embargo, estas fuentes de luz planteaban problemas de precisión.

“El peine de luz se obtiene mediante la superposición de haces de luz láser y, en lugar de generar un espectro continuo, como un arcoiris, el resultado muestra líneas de diferentes colores separadas por intervalos negros y regulares, de ahí el nombre”, apunta Jose Boggio,

investigador de innoFSPEC responsable del proyecto.

La técnica se conoce desde 2005, año en el que dos investigadores estadounidenses y uno alemán recibieron el premio Nobel por su desarrollo. “Esta tecnología era prácticamente inaccesible hasta hace poco, por compleja y costosa, pero innoFSPEC ha conseguido simplificarlo y adecuarlo a los

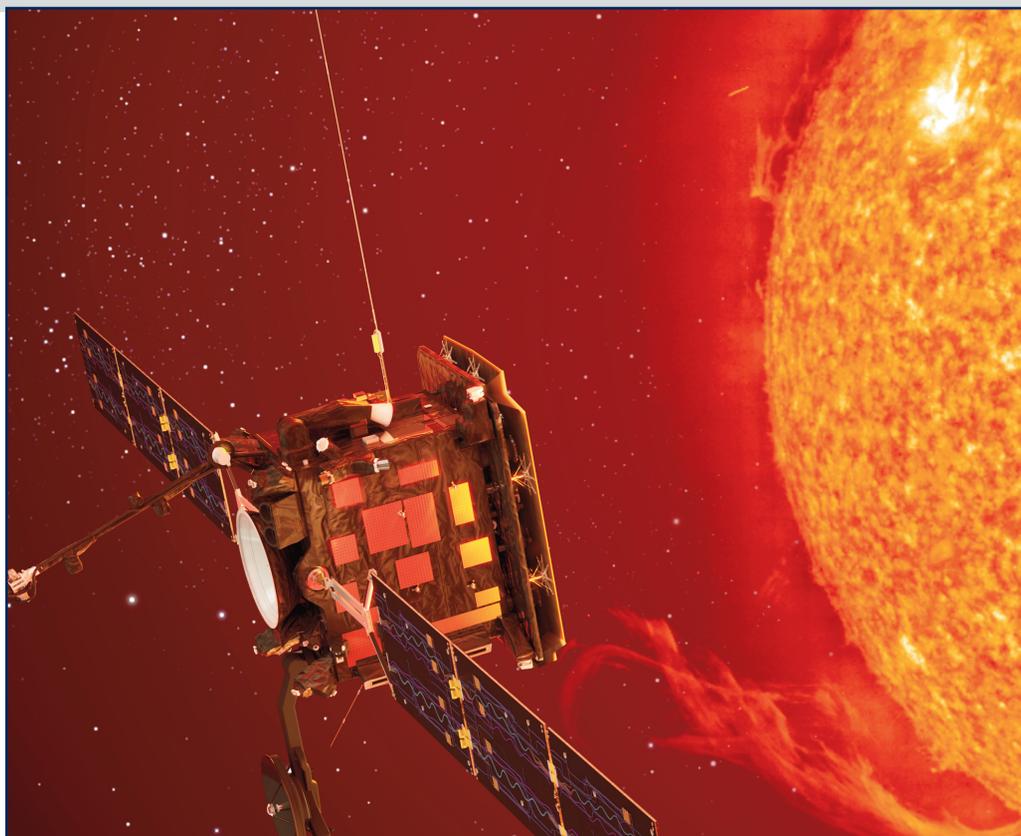
requerimientos de la observación astronómica, lo que sin duda supondrá un hito en los estudios espectroscópicos”, asegura Jesús Aceituno, vicedirector del Observatorio de Calar Alto (CAHA). Tras su desarrollo en las instalaciones de innoFSPEC, el peine de luz se probó en una campaña de observación con el espectrógrafo PMAS instalado en el telescopio de 3,5 metros del Observatorio de Calar Alto. Según Roger Haynes, jefe del grupo de investigación de innoFSPEC, su éxito supone un nuevo estándar en precisión de los datos astronómicos.

“El peine de luz es como una regla de medir óptica, mucho más estable y regular que las lámparas convencionales -señala Andreas Kelz, investigador del AIP participante en el proyecto-. Gracias a este método, podremos determinar la velocidad de rotación de las galaxias o la composición química de las estrellas con una precisión inigualable”.

El Observatorio Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto está situado en la Sierra de Los Filabres, norte de Almería (Andalucía, España). Es operado conjuntamente por el Instituto Max-Planck de Astronomía en Heidelberg, Alemania, y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC) en Granada, España. Calar Alto proporciona tres telescopios con aperturas de 1.23m, 2.2m y 3.5m. Un telescopio de 1.5m, también localizado en la montaña, es operado bajo el control del Observatorio de Madrid.

Un instrumento coliderado por el IAA girará en torno al Sol a bordo de la misión Solar Orbiter

Solar Orbiter (ESA) se situará en órbita en torno al Sol para estudiar, gracias a sus instrumentos de medida local y sondeo remoto, tanto la física solar como la influencia del Sol en el medio interplanetario



► La misión Solar Orbiter (ESA) presenta varias características extraordinarias: a diferencia de la mayoría de los vehículos espaciales, que se sitúan en órbita en torno a la Tierra, Solar Orbiter girará en torno al Sol en una órbita con una distancia mínima al astro similar a la de Mercurio, lo que le proveerá de una perspectiva única y le permitirá observar los polos del Sol. Además, sus instrumentos tomarán medidas locales y remotas, lo que aportará la primera visión completa tanto de la física solar como de la heliosférica. El instrumento SO/PHI, coliderado por el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), es el mayor y quizá el más complejo a bordo de la nave.

La misión, cuyo lanzamiento está previsto para julio de 2017, trazará cinco órbitas en torno al Sol en dos años y medio. “La mecánica orbital que acercará la nave a las proximidades del Sol es compleja y bellísima: se basa en sucesivas asistencias gravitatorias de la Tierra y Venus, e irá elevando el plano orbital de modo que podamos acceder a las latitudes altas del Sol y obtener la primera vista de calidad del campo magnético de los polos”, apunta Jose Carlos del Toro Iniesta, astrónomo del IAA y coinvestigador principal del instrumento SO/PHI.

El objetivo del instrumento SO/PHI reside en la realización de un cartografiado preciso del campo magnético solar, responsable de prácticamente todos los fenómenos que observamos en el Sol, como las manchas, las tormentas solares o el viento solar (un flujo continuo de partículas eléctricamente cargadas que emanan del Sol y viajan por el espacio interplanetario). SO/PHI

SO/PHI: el campo magnético al detalle

medirá también la velocidad del plasma en la fotosfera, la capa más interna de la atmósfera del Sol, y origen del viento solar. SO/PHI es heredero del instrumento IMaX, diseñado en España para la misión SUNRISE, y constituye el instrumento más pesado y que más energía consume de Solar Orbiter (treinta kilogramos y treinta vatios). El instrumento, que incluye dos telescopios, se ha diseñado para la toma de imágenes, la polarimetría y la espectroscopía. “Hará todo lo que se puede hacer en astronomía con la luz”, destaca Del Toro (IAA-CSIC). SO/PHI resulta además singular porque, en lugar de enviar los datos originales, hará la ciencia a bordo: un dispositivo diseñado en el IAA-CSIC, con una velocidad equivalente a unos cincuenta ordenadores trabajando en paralelo, convertirá esas medidas en mapas de las magnitudes físicas solares; las primeras

se destruirán para liberar memoria y los segundos se enviarán a tierra.

“Nunca un instrumento espacial ha trabajado así” -apunta Jose Carlos del Toro (IAA-CSIC)-. Se trata de un riesgo que no se quiere asumir, pero era el único modo. La distancia a la que se hallará la nave reduce el envío de datos a un mega por día, y hay que distribuirlo entre los diez instrumentos. En los periodos de observación SO/PHI generará unos trescientos veinte gigas por minuto, de modo que la única forma de hacer viable el instrumento consistía en analizar la información en vuelo”. SO/PHI está siendo desarrollado por un consorcio internacional (45% Alemania, 40% España, 10% Francia y el resto otros países). La coordinación de la parte española se lleva a cabo desde el Instituto de Astrofísica de Andalucía, y participan también el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y las universidades de Valencia, de Barcelona y la Politécnica de Madrid.

Solar Orbiter: aportaciones científicas

La misión Solar Orbiter se aleja de sus predecesoras porque acometerá el estudio conjunto de la física solar y del medio interplanetario: observará cómo influye el Sol en su entorno y cuál es el origen de esa influencia. La misión seguirá una órbita elíptica en torno al Sol y en la ventana de máximo acercamiento corrotará con él, lo que permitirá una comprensión sin igual de las estructuras solares al combinar gran resolución y continuidad temporal. Además, proporcionará la primera visión de calidad del campo magnético polar, fundamental para entender el cambio de polaridad magnética que tiene lugar en el Sol cada once años y cuyo funcionamiento se desconoce. Finalmente, la misión empleará la técnica de la heliosismología para conocer qué ocurre en el interior del Sol.

Silbia López de Lacalle (IAA)

El proyecto GLORIA pone a disposición de los internautas trece telescopios robóticos distribuidos en tres continentes



GLORIA, que cuenta con licencias copyleft para la libre distribución de sus contenidos y materiales, se engloba en el programa Ciencia Ciudadana de la Unión Europea

► El proyecto GLORIA (*GLObal Robotic telescope Intelligent Array for e-science*) ya brinda a internautas la posibilidad de estudiar el cielo desde observatorios profesionales. Al telescopio de observación solar y los cuatro nocturnos de observación en tiempo real que ya estaban en funcionamiento, se suman ahora ocho nuevos telescopios nocturnos de observación programada por colas pertenecientes a la red, ya completamente operativa. "GLORIA (<http://gloria-project.eu>) está

superando el reto de construir la primera red mundial de telescopios de acceso libre, que permitirá a cualquier usuario producir conocimiento científico", destaca Alberto Castro-Tirado, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) y científico responsable del proyecto.

GLORIA, que arrancó en octubre de 2011, atraviesa su ecuador con la activación, en modo de observación directa en tiempo real, de cuatro telescopios situados en España, uno en la

República Checa y otro en Nueva Zelanda. A lo largo de las próximas semanas se irán abriendo los telescopios restantes, y en marzo la red completa estará operativa.

El proyecto se fundamenta en la filosofía de inteligencia colectiva: cuantos más ojos miren al cielo, más se podrá aprender de él. Los usuarios podrán investigar sobre los experimentos propuestos, que incluyen el estudio de la actividad solar y la detección y caracterización de exoplanetas y asteroides, entre otros, o proponer sus propias líneas de investigación. Y podrán hacerlo bien programando observaciones y solicitando tiempo en los telescopios o bien empleando la base de

datos GLORIA o la del Observatorio Virtual Europeo.

La red ofrece también el software libre y la metodología para que cualquiera pueda robotizar su telescopio y conectarlo a la red, de modo que un único portal web agrupará numerosos telescopios a lo largo del globo.

Finalmente, el proyecto hace especial hincapié en la divulgación y está desarrollando actividades para despertar el interés por la astronomía, sobre todo entre los jóvenes y los niños. La amplia red de telescopios y su localización en los dos hemisferios ya ha permitido la retransmisión de eventos como el tránsito de Venus de 2012, el eclipse total de Sol de 2013 o el eclipse de luna del 15 de abril de 2014 desde distintas localizaciones, como Tenerife y Cuzco (Perú).

GLORIA es un proyecto de tres años financiado por el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea. Comenzó en octubre de 2011 e implica a trece instituciones de ocho países y está liderado por España, donde participan la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), el Instituto de Astrofísica de Andalucía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (IAA-CSIC), el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), la Universidad de Málaga (UMA), y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial a través del Centro de Astrobiología (CAB/INTA-CSIC).

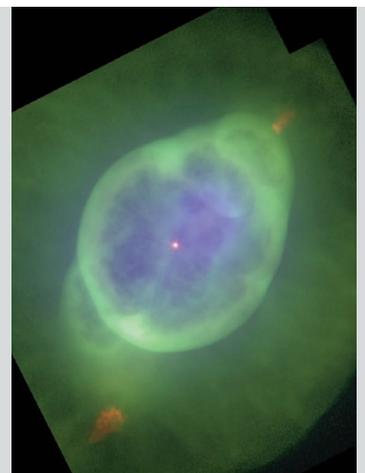
EN BREVE:

El "fantasma de Júpiter", visto por XMM y Hubble

► Las nebulosas planetarias, objetos que resultan de la muerte de una estrella de baja masa, recibieron su nombre por su apariencia redondeada, similar a la de los planetas. Y el caso de NGC 3242 resulta especialmente singular porque recibió el curioso apodo de "el Fantasma de Júpiter" dado que cubre en el cielo una región equivalente a la del planeta Júpiter.

La imagen muestra cómo los intensos vientos liberados por la estrella moribunda, la enana blanca central, dan forma a la estructura de doble concha de la nebulosa. El resplandor azul de la burbuja interior representa la emisión de rayos X producida por gas caliente, cuya temperatura asciende hasta los dos millones de grados debido al choque de los vientos estelares (con ráfagas de unos 2.400 kilómetros por segundo) con el gas que circunda la estrella.

El color verde representa concentraciones más frías de gas observadas en luz óptica a través de la emisión de oxígeno, y revela el borde interno del cascarón en contraste con el gas más difuso que compone la región externa. Las dos estructuras en forma de llama, visibles en rojo en la parte superior derecha e inferior izquierda de la burbuja interior, son bolsas de gas aún más frío, visto también en luz óptica a través de la emisión de nitrógeno.



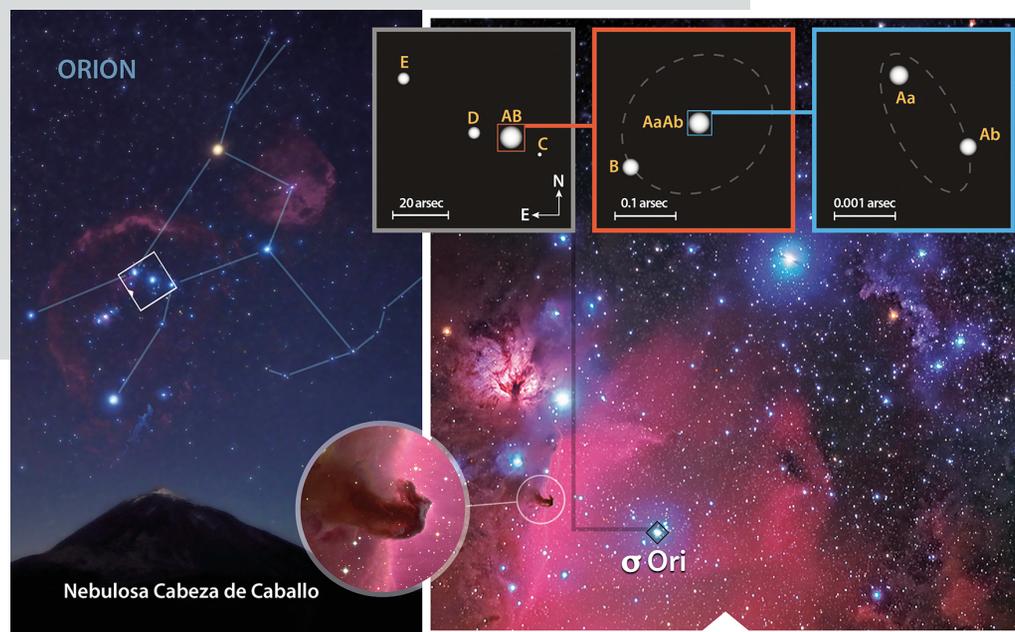
Se determinan las características de la estrella múltiple “sigma Orionis”

Un estudio detallado sobre este sistema estelar múltiple liderado por astrofísicos españoles ha permitido determinar el periodo, la masa y la emisión de fotones de alta energía de las principales estrellas del sistema

► Hace unos tres millones de años, cientos de estrellas se formaron a partir de una densa nube de polvo y gas en la constelación de Orión (“el Cazador”). La estrella que atrajo la mayor parte de la masa fue sigma Orionis (sigma Ori), hoy la cuarta estrella más brillante del Cinturón de Orión y la que ilumina la célebre nebulosa Cabeza de Caballo. A la vez que sigma Orionis, se formó a su alrededor una gran cantidad de estrellas de diferentes masas, enanas marrones y planetas aislados (objetos con una masa similar a la del planeta Júpiter, pero que flotan libres en el cúmulo estelar). Los objetos más pequeños del Cinturón de Orión tienen diez mil veces menos masa que sigma Orionis.

Conocer con qué frecuencia nacen y evolucionan las estrellas de baja masa, las enanas marrones y los planetas aislados, implica conocer primero qué le ocurre a sus vecinos estelares de gran masa y azules. Con este objetivo, un equipo internacional de astrónomos liderado por los investigadores españoles Sergio Simón-Díaz (IAC/ULL), José Antonio Caballero (CAB, CSIC-INTA), y Javier Lorenzo (Universidad de Alicante), y con participación del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), ha estudiado con detalle la estrella múltiple sigma Orionis.

Las estrellas de gran masa influyen, entre otras cosas, en nuestra propia composición química, en la distribución espacial de las estrellas, en el diseño de los brazos espirales en las galaxias o, curiosamente, en el



número de estrellas poco masivas. “Este último efecto -explica Sergio Simón-Díaz, primer autor del artículo- se debe a que las estrellas de baja masa y las enanas marrones (objetos intermedios entre las estrellas más pequeñas y los planetas más grandes) son solo ‘las sobras del banquete’ de las estrellas de gran masa”.

La estrella sigma Orionis tiene tres millones de años y es cinco veces más caliente que el Sol. Esta altísima temperatura hace que la estrella tenga un color azulado, en contraste con las estrellas menos masivas, de color rojizo. “En 2011 -recuerda José Antonio Caballero- demostramos que sigma Orionis es en realidad una estrella múltiple que consta de seis estrellas azules en lugar de cinco como se pensaba hasta entonces: dos de ellas son estrellas de gran masa muy próximas, que giran una alrededor de la otra con un período orbital de unos 143 días. Una tercera estrella algo menos masiva orbita a unas cien unidades astronómicas (cien veces la distancia media entre el Sol y la Tierra) de las anteriores, con un período mucho más largo, de unos 157 años. Finalmente, el cúmulo se completa con otras tres estrellas ligera-

mente más frías y menos masivas, todo ello acompañado por numerosos restos estelares”.

Ahora, estos investigadores junto con otros once colaboradores en España, Alemania, Chile, EEUU, Bélgica y Hungría, han observado en detalle el trío central de estrellas (sigma Ori Aa, sigma Ori Ab y sigma Ori B) y han medido todos sus parámetros físicos con una precisión sin precedentes. “El período del par más cercano, de aproximadamente 143 días, se ha podido determinar ahora con un error de solo once minutos -señala Simón-Díaz-, lo que hace factible programar observaciones específicas en ciertas fases, por ejemplo, con telescopios espaciales de rayos X en el periastro, es decir, el punto en el que las dos estrellas centrales tienen una separación menor”.

Estrellas “devoradoras”

El estudio también ha permitido determinar de forma precisa las masas de las tres estrellas con diferentes métodos. “En total, la masa del trío supera las cuarenta masas solares”, subraya Simón-Díaz. “Estas determinaciones, junto con observaciones interferométricas en curso, son una excelente entrada para los modelos teóricos que tratan

de explicar la estructura y el destino de esas ‘estrellas devoradoras’”. “Hemos medido también -añade Caballero- el número de fotones de alta energía emitidos por el trío en su conjunto. Esos fotones procedentes de sigma Orionis Aa, Ab y B son los que ‘peinan las crines’ de la Nebulosa Cabeza de Caballo y anuncian el inicio de un nuevo banquete de estrellas de alta masa en la región. En unos pocos millones de años, cuando sigma Orionis Aa (y quizás Ab) explote como una supernova y limpie la región vecina, seguirá existiendo una gran cantidad de estrellas más frías y pequeñas, además de unas pocas estrellas grandes, masivas y muy calientes, que se encontrarán en ese momento inmersas dentro de las nubes cercanas a la Nebulosa Cabeza de Caballo”. Y el ciclo de vida de las estrellas continuará.

SALA limpia



por Miguel Abril (IAA)

la respuesta:

¿Cuál de estos materiales no se usa para imprimir en 3D?

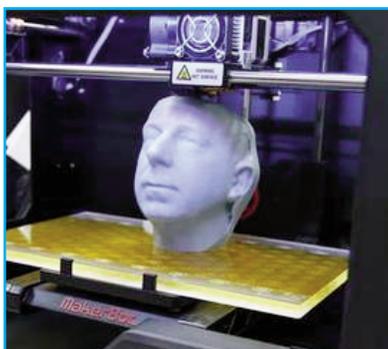
- A. Sal
- B. Polvo lunar
- C. Cemento
- D. Guano
- E. Titanio

El guano es caca. Pis. Todo junto, porque son excrementos de pájaros, y los pájaros no distinguen. Es una porquería, sí, pero una porquería muy rica en nitrógeno, lo cual hace que sea muy útil como abono de los campos y lo suficientemente valiosa como para haber dado nombre a una guerra en el siglo XIX entre Perú, Bolivia y Chile (la guerra del guano y el salitre) y haber estado a punto de desencadenar otra entre Perú y Estados Unidos. A pesar de ello, sigue siendo una guarrada, así que de momento a nadie se le ha ocurrido usarlo como material de base para imprimir en 3D. "Hay gente *pa tó*", decía el torero, menos pa esto, de momento. Las otras cuatro opciones propuestas son ciertas. Los materiales usados más habitualmente para imprimir en 3D son distintos tipos de plásticos y algunos metales. La técnica para imprimir en plástico es sencilla: basta con fundir el material de un carrete e ir aplicándolo capa a capa siguiendo el patrón digital generado por un programa de diseño. Lógicamente, con los metales como el titanio la cosa se complica, porque no es posible

fundir el material y hacer que se solidifique en contacto con el aire, como sucede con los plásticos. Pero es que el término "impresión 3D" es mucho más amplio de lo que habitualmente se cree, y engloba gran variedad de técnicas clasificadas en cinco grupos, algunos con nombres tan chulos como "soldadura con rayo de electrones" o "fotopolimerización". Todas tienen en común que se trata de técnicas aditivas, en contraste con las técnicas sustractivas que se han usado tradicionalmente, en las que se parte de un bloque de material que se va desbastando y rebajando hasta llegar a la pieza final. Las técnicas aditivas ofrecen dos ventajas principales. La primera, que permiten mucha más flexibilidad en el diseño, ya que no están limitadas por el alcance de las herramientas. La segunda, que solo se usa el material necesario para la pieza, sin tener que descartar el que se va eliminando en el proceso de fabricación. Vamos, que son como los marranos: no se desaprovecha nada. Pero aparte de plásticos y metales se usan muchos otros materiales. Escogimos la sal

para sembrar la confusión en la respuesta (miles y miles de mensajes me han llegado al correo diciendo que la opción A era la falsa), pero también se están fabricando ya objetos con madera, papel, hormigón, nylon, acrílico o fibra de carbono. La sal, en concreto, se usa sobre todo para elementos de arquitectura y objetos de decoración. Aunque las imágenes que se pueden encontrar en la red son bastante deprimentes, como si el diseñador se hubiera quedado anclado en los setenta, las posibilidades son

poco tiempo... ¡podremos comer sin ningún remordimiento hamburguesas con forma de lechuga! Sin embargo, en el contexto de esta nuestra revista favorita tal vez la más interesante sea la opción B: imprimir con polvo lunar. Como es lógico, no es una técnica que se use habitualmente, pero es una idea que parece completamente viable (de hecho, la NASA ha apostado fuertemente por ella) y que aportaría indudables beneficios en la exploración espacial. Ahora que parece que se ha despertado de nuevo el interés por viajar a nuestro satélite y que se ha emprendido de una vez por todas el proyecto de llegar a Marte, la impresión 3D con material autóctono permitiría construir módulos de vivienda, pistas de alunizaje o amortizaje, calzadas y casi todo el resto de infraestructuras necesarias sin necesidad de transportar todos los materiales desde la Tierra, con el consiguiente ahorro en coste y en tiempo. Fascinante, ¿verdad? Bueno, pues he dejado lo mejor para el final: ya está al alcance de cualquiera imprimir una figura de acción a su imagen y semejanza. Basta con realizar unas cuantas fotos con el móvil y procesarlas mediante una simple aplicación, por ejemplo el programa 123D Catch. Ahora sí que podemos gritarlo a los cuatro vientos: ¡el futuro ya ha llegado!



infinitas, puesto que el único límite es la imaginación. En construcción se están utilizando, entre otros, cemento y hormigón, no solo para fabricar bloques de construcción, sino casas enteras con impresoras gigantes. Pero en lo que a materiales respecta, tal vez la idea más retorcida sea la de imprimir comida usando... pues eso, pasta hecha con comida. Así que parece que, en

la pregunta:

Entonces... ¿la famosa revolución que va a traer la impresión 3D consiste en que dentro de poco todos vamos a poder tener un mini-yo en nuestra mesilla de noche? ¡No! Algo mucho más grande va a ocurrir. O eso dicen algunos. Algunos otros pensamos que a algunos de esos algunos se les va

la olla más que a Michio Kaku en el Dragón Khan. He pensado varias formas de plantearos la pregunta para describir en qué consiste la revolución 3D, pero en todas me hacía *spoiler* a mí mismo, así que mejor os lo cuento en el próximo número. Por tanto, esta vez no hay opciones múltiples, solo una pregunta: ¿podréis esperar?



Howard Wolowitz, de la serie *The Big Bang Theory*, con su mini-yo creado con una impresora 3D.

GALAXIAS LUMINOSAS EN EL INFRARROJO

Pilares científicos

En 1983, con el lanzamiento del telescopio espacial infrarrojo IRAS, se descubrió un nuevo tipo de galaxias que brillaban, en el rango infrarrojo del espectro, cientos e incluso miles de veces más que el resto de galaxias conocidas. Las teorías existentes hasta ese momento no eran capaces de explicar unas luminosidades tan extremas. Hoy conocemos con bastante detalle qué son y qué sucede en estas fuentes, denominadas galaxias luminosas en el infrarrojo, o LIRGs. Sabemos, por ejemplo, que tienen enormes cantidades tanto de gas molecular, material a partir del que se forman nuevas estrellas, como de polvo interestelar. Es precisamente este polvo el que, tras calentarse, reemite su energía en el infrarrojo (de forma análoga a cuando miramos un cuerpo humano a través de una cámara térmica). Pero... ¿qué mecanismo calienta todo ese polvo? La primera imagen que nos viene a la cabeza cuando pensamos en una galaxia es la de una vasta colección de estrellas, unas veces formando majestuosos brazos espirales y otras en un gigantesco enjambre elíptico,

que esperan su final lenta y pacíficamente. Sin embargo, la mayoría de las LIRGs no se parece en nada a esa tranquila escena. Por una parte, cambios en la dinámica del gas molecular presente en estas galaxias producen violentos brotes de formación estelar, que son episodios relativamente repentinos en los que el ritmo al que se forman nuevas estrellas es muy elevado. Tanto la radiación proveniente de las nuevas estrellas como las explosiones de las más masivas al llegar al final de su vida (supernovas) calientan intensamente el polvo interestelar.

Por otra parte, en algunas de estas galaxias existe lo que se llama un núcleo activo de galaxia, o AGN por sus siglas en inglés. Los AGN son la manifestación de un agujero negro supermasivo que se encuentra en las regiones centrales de las galaxias y que absorbe con fuerza todo el gas que se acerca, formando a su alrededor, a modo de torbellino, un disco de gas que por pura fricción alcanza temperaturas elevadísimas y calienta el polvo circundante. Tal es la violencia de estos fenómenos que hasta en la literatura científica se les llegó a aplicar el término de "monstruos cósmicos".

Pero, ¿por qué es importante comprender la física de las LIRGs? Muchas de estas galaxias son en realidad el producto de interacciones, colisiones y fusiones de otras galaxias menores. En este sentido, podemos ver las LIRGs como una fase clave en la evolución de "pequeñas" galaxias espirales en su proceso de convertirse en enormes galaxias elípticas. Al observar un gran número de estos objetos, cada uno en una etapa evolutiva, lo que estamos viendo en realidad son diferentes fotogramas de una película que tenemos que ordenar. Según este modelo, la interacción entre galaxias dispara los brotes de formación estelar, que serían el mecanismo dominante durante las fases iniciales del proceso de fusión, mientras que en una etapa más avanzada sería el disco de acrecimiento alrededor del agujero negro central el motor principal de las LIRGs.

Ordenar las escenas de esta película nos sirve tanto para entender mejor todos los procesos intermedios como para saber cómo evolucionó el universo hasta convertirse en lo que es hoy y qué ocurrirá en el futuro, incluyendo el destino de nuestra Vía Láctea.

Incertidumbres

Apenas treinta años después de su descubrimiento, los astrónomos han conseguido desarrollar una teoría para comprender los fenómenos físicos extremos que ocurren en las LIRGs. Sin embargo, en ciencia ocurre con frecuencia que cada vez que se desvela un pequeño misterio aparecen muchos nuevos interrogantes. Y las LIRGs no son una excepción.

Aunque hemos identificado los dos procesos principales que producen la energía en estas galaxias, los brotes de formación estelar y los AGN, en realidad están interrelacionados. Algunos estudios

apuntan a procesos de retroalimentación a través de chorros, vientos estelares y eyecciones de materia. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, estos mismos fenómenos podrían ser también responsables de todo lo contrario, es decir, procesos de extinción en la formación estelar. Comprender estos mecanismos es uno de los principales campos abiertos en el estudio de las LIRGs.

Por otro lado, a pesar de que el modelo evolutivo es sólido en términos generales y está apoyado por simulaciones numéricas por ordenador, hay observaciones recientes que ponen a prueba este modelo. Así, conocemos LIRGs en etapas evolutivas tempranas cuya luminosidad está, sin embargo, dominada por el AGN.

Y también a la inversa: galaxias totalmente fusionadas que siguen dominadas por la formación estelar.

Finalmente, aunque hemos observado en detalle un número significativo de LIRGs en nuestra vecindad galáctica, la inmensa mayoría se encuentra a distancias cosmológicas, donde los procesos físicos podrían ser diferentes y donde nuestras observaciones aún no han sido capaces de darnos respuestas definitivas.

Afortunadamente, nuevos instrumentos y telescopios están comenzando a arrojar luz sobre estos interrogantes, colocando nuevas piezas de un puzzle que, por otra parte y por suerte para los amantes de los rompecabezas, es cada día un poco más grande.

Imagen de fondo: la galaxia ultraluminosa en el infrarrojo IRAS 22491-1808
Fuente: ESA/Hubble & NASA

AGENDA

<http://www-divulgacion.iaa.es/ciclo-lucas-lara>

CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA. CICLO LUCAS LARA

26 feb | Mirjana Povic (IAA)
19h

¿Por qué nos importan las formas de las galaxias?

Las conferencias Lucas Lara tienen lugar los últimos jueves de cada mes. Se retransmiten a través de internet en www.sonovoz.es

LOS VÍDEOS DE LAS SESIONES ANTERIORES ESTÁN DISPONIBLES EN:
<http://www-divulgacion.iaa.es/ciclo-lucas-lara>



RECOMENDADOS

www.luz2015.es

AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ

El 20 de diciembre de 2013, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), proclamó 2015 como el Año Internacional de la Luz y las Tecnologías basadas en la Luz. Esta celebración pretende comunicar la importancia de la luz y sus tecnologías asociadas en áreas tan diversas como la energía, la educación, la salud o la comunicación.

El objetivo de este portal, constituido por el Comité Español para la celebración del Año Internacional de la Luz y gestionado por la Sociedad Española de Óptica, consiste en difundir todas las actividades y materiales que se desarrollen a lo largo de 2015.

DECONSTRUYENDO LA LUZ



luz.iaa.es



“DECONSTRUYENDO LA LUZ” es un proyecto audiovisual con el que el IAA-CSIC celebrará el Año Internacional de la Luz 2015, y que cuenta con el apoyo del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO), la Fundación Española de Ciencia y Tecnología (FECYT), el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Fundación DESCUBRE.

EL RADIOSCOPIO

<http://radioscopio.iaa.es>

El Radioscopio es un programa de divulgación científica realizado y producido desde Canal Sur Radio en colaboración con el Instituto de Astrofísica de Andalucía. Presentado y dirigido por Susana Escudero (RTVA) y Emilio J. García (IAA), este programa aborda la divulgación de la ciencia con humor y desde una perspectiva original y rigurosa.

CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS

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

