

INFORMACIÓN y ACTUALIDAD ASTRONÓMICA

<http://www.iaa.csic.es/revista.html>

JUNIO 2008, NÚMERO: 25

LA QUÍMICA DEL UNIVERSO

VIDA HUMANA EN EL ESPACIO
MODELO ESTÁNDAR DE PARTÍCULAS

ANÁLISIS ARMÓNICO
AGUJEROS NEGROS



INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE ANDALUCÍA
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
IAA-CSIC

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



SUMARIO

REPORTAJES

La química del Universo y el origen de la vida ...3

Vida humana en el espacio ...7

HISTORIAS DE ASTRONOMÍA: Desmenuzando la materia ...10

Examen final al Modelo Estándar de Partículas ...12

CIENCIA: PILARES E INCERTIDUMBRES

Evolución del análisis armónico...15

DECONSTRUCCIÓN Y otros ENSAYOS

Las distintas escalas de un agujero negro ...16

ACTUALIDAD ...18

ENTRE BASTIDORES ...21

ACTIVIDADES IAA ...22

Nebulosa oscura de la Cabeza del Caballo, donde tiene lugar la formación de moléculas complejas en condiciones de muy baja temperatura ($-260\text{ }^{\circ}\text{C}$) y de baja densidad (solo unas diez mil partículas por centímetro cúbico). Fuente: Ryan Steinberg, Adam Block, NOAO, AURA, NSF.

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

Esta revista se publica con la ayuda FCT-08-0130 del Programa Nacional de Fomento de la Cultura Científica y Tecnológica 2008.

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.

La química del Universo y el origen de la vida

EL ESTUDIO DE LOS PROCESOS QUÍMICOS QUE TIENEN LUGAR EN EL UNIVERSO APORTA INFORMACIÓN ESENCIAL PARA AVERIGUAR CÓMO SURGIÓ LA VIDA EN LA TIERRA

Por Jesús Martín Pintado (DMIR-IEM-CSIC)

ENTENDER EL ORIGEN DE LA VIDA ES UNO DE LOS GRANDES RETOS que tenemos ante nosotros. Una de las preguntas clave es si la vida ha aparecido solo en la Tierra como resultado de unas condiciones favorables o es un hecho consustancial a las leyes físicas que rigen nuestro Universo. En la actualidad no tenemos la respuesta, e incluso aún hoy no conocemos cómo surgió la vida en la Tierra. En este artículo nos adentraremos en los secretos, muchos de ellos todavía muy bien guardados, de la evolución química del Universo que muestra cómo las moléculas fundamentales para la vida se pueden formar en las nubes moleculares interestelares.

Factorías de elementos pesados y de polvo interestelar

Todo comenzó hace unos 14.000 millones de años, con la gran explosión que dio origen al Universo con las leyes físicas que lo rigen. Cuando el Universo tenía unos 300.000 años y unos 4.000 grados de temperatura se produjo un hecho importantísimo para la química: los núcleos de hidrógeno, helio, litio y berilio capturaron los electrones y dieron lugar a los primeros átomos.

En esta época el Universo era químicamente demasiado pobre como para que se pudieran formar moléculas complejas relacionadas con la vida. Sin embargo, a medida que el Universo siguió expandiéndose y enfriándose tuvo lugar un fenómeno extraordinario y fundamental para la aparición de la vida: la formación de la primera generación de estrellas. En el interior de estas estrellas se generaron, por primera vez, los elementos químicos relevantes para la vida, tales como el car-

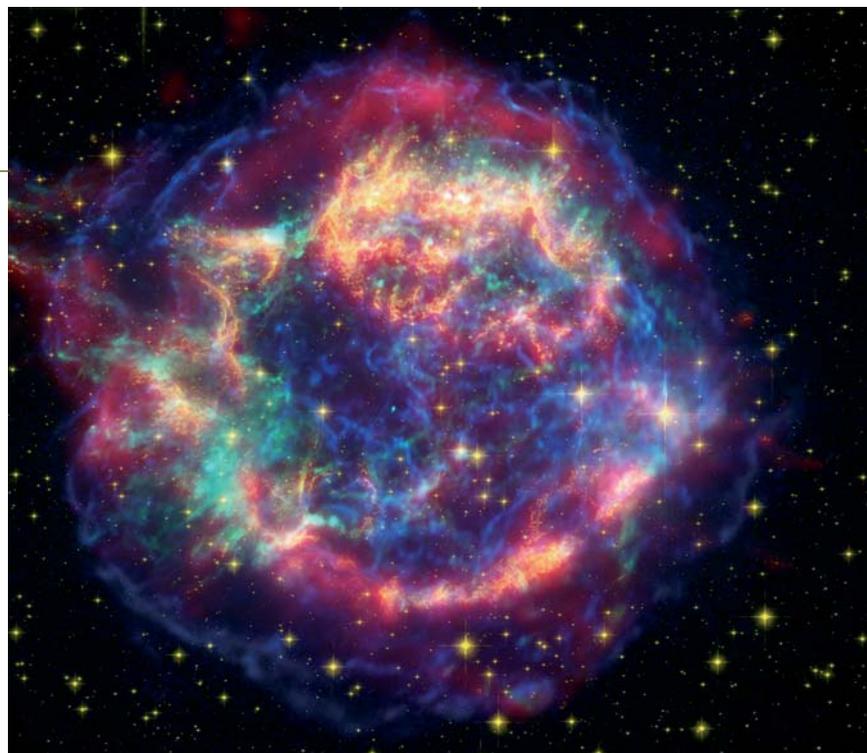


Imagen de la emisión en rayos X de la supernova Cassiopea A. Esta imagen muestra el gas caliente expulsado por la explosión de una estrella masiva. Fuente: NASA.

bono, el oxígeno, el nitrógeno y otros elementos minoritarios fundamentales para la formación de los planetas sólidos. En tan sólo diez millones de años estas estrellas explotaron, como las supernovas que observamos hoy en día, expulsando ingentes cantidades de elementos pesados al medio circundante.

Se piensa que en la muerte de estas estrellas se produjo otro hecho fundamental, la formación de los primeros granos de polvo. Al expandirse las capas eyectadas, estas se enfriaron formando en su interior

unos minúsculos granos de polvo compuestos fundamentalmente por grafito y silicatos. Los procesos que condujeron a la formación de los granos de polvo en la materia eyectada en las explosiones de supernova son, por el momento, desconocidos. Los granos de polvo, extraordinariamente pequeños, menores que una milésima parte de un milímetro, son los grandes almacenes de material orgánico. Se estima que contienen el 20% del oxígeno, el 50% del carbono y prácticamente todo el silicio y el hierro de la materia interestelar.

El nacimiento de la química en las nubes moleculares

Los minúsculos granos de polvo, los áto-



Radiotelescopio de 30 metros de diámetro del Instituto de Radioastronomía Milimétrica situado en la Loma de Dilar en Pico Veleta (Granada). Con este radiotelescopio se ha contribuido de manera fundamental a establecer la complejidad química del Universo.

debido a las colisiones entre tres cuerpos. Esto es posible gracias a que las densidades alcanzan el trillón de partículas por centímetro cúbico, muchísimo mayores que las existentes en el medio interestelar, que son del orden de diez mil partículas por centímetro cúbico. La gran pregunta es: ¿qué mecanismo produce una química interestelar tan rica en las inmensas y frías nubes oscuras -con temperaturas de unos 260 grados bajo cero- y prácticamente en el vacío en regiones protegidas de la radiación ultravioleta?

La aparición de los hielos en el Universo

El polvo no solo apantalla el interior de las nubes oscuras de la radiación ultravioleta, tan dañina para las moléculas, sino que, a tan bajas temperaturas, los granos de polvo son pegajosos y pueden actuar como catalizadores de reacciones químicas. Todo átomo que choque con un grano de polvo se queda adherido a él. En las condiciones típicas de una nube interestelar, a cada grano de polvo se le pueden pegar unas cien moléculas en tan solo unos diez mil años. Estos átomos pueden moverse sobre la superficie de los granos y encontrarse con otros átomos, fundamentalmente de hidrógeno, para formar la molécula más abundante del Universo, el hidrógeno molecular; además, gracias a la hidrogenación del carbono, del oxígeno y del nitrógeno, se generan también otras moléculas simples como el CH_4 (metano), el NH_3 (amoníaco) y el H_2O (agua). Estas moléculas recubren el grano de un manto de hielo de agua, amoníaco, metano y monóxido de carbono. Así lo demuestran los espectros observados por el satélite infrarrojo *Infrared Space Observatory* de la Agencia Espacial Europea en la dirección de estrellas recién formadas.

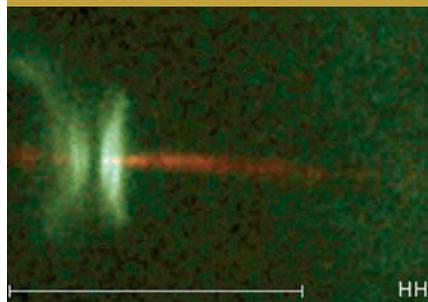
En este estadio de evolución la complejidad química de las nubes moleculares era ya extraordinaria. Existían moléculas de más de tres átomos, granos de polvo y mantos de hielos tremendamente ricos en compuestos moleculares. Los radiotelescopios han detectado que una complejidad química similar a la hasta ahora descrita

mos de carbono, el oxígeno y el nitrógeno generados en las primeras estrellas se incorporan a la materia interestelar, cambiando radicalmente la composición química de las aglomeraciones de gas donde tiene lugar la formación de la nueva generación de estrellas y planetas. Los pequeños granos de polvo absorben la radiación ultravioleta de las estrellas de manera que esta no penetra en las partes más internas de las nubes de gas y polvo. Así, estas aglomeraciones de gas aparecen como zonas oscuras en las que no se observan estrellas debido a que los granos de polvo absorben la radiación e impiden su observación en el dominio óptico.

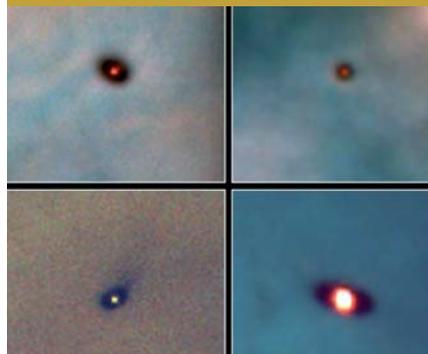
Solo se puede penetrar en el interior de las zonas más oscurecidas de estas nubes escudriñándolas en emisión de microondas con grandes radiotelescopios. Los trabajos pioneros en radioastronomía en 1968 detectaron, de manera inesperada, las primeras moléculas triatómicas del espacio interestelar. Moléculas como el amoníaco, el formaldehído y, sobre todo, el vapor de agua, son de hecho de gran relevancia en la química prebiótica. La detección de estas moléculas supuso un gran cambio en nuestra idea sobre la complejidad química en el Universo y un reto para establecer los procesos químicos que tienen lugar en el espacio interestelar.

En los laboratorios terrestres las reacciones químicas más importantes se producen

Imagen de una estrella de tipo solar en formación. Muestra la presencia del disco protoplanetario (zona oscurecida horizontal situada entre las dos nebuladas brillantes) y de los chorros de gas supersónicos (en verde) que se eyectan en la dirección perpendicular al disco. Fuente: NASA.



Discos (zonas oscuras) observados en la nebulosa de Orión. Los discos alrededor de las protoestrellas de baja masa tienen la misma composición química que la materia interestelar de la que se formó la estrella. Fuente: NASA.



podría existir cuando el Universo tenía tan solo unos mil millones de años.

La aparición de alcoholes en el Universo

Otro paso de gran importancia para la evolución hacia un incremento de la complejidad química es la formación y evolución de nuevas estrellas en el seno de estas nubes con una gran riqueza química.

Las estrellas de gran masa, como las que se observan en Orión, emiten mucha radiación ultravioleta que altera drásticamente la composición química del gas que las rodea. En el entorno más cercano a la estrella, la radiación ultravioleta fotodisocia las moléculas, ioniza los átomos, evapora los mantos helados de los granos de polvo e incluso destruye parcialmente el núcleo de los granos. Sin embargo, en las zonas de las nubes un poco más alejadas de la estrella, donde penetra solo una parte de la radiación ultravioleta, los mantos helados están también sometidos a ciertas dosis de radiación ultravioleta. Esta radiación disocia las moléculas de los hielos de agua, amoníaco y metano y propicia la formación sobre los granos de moléculas orgánicas mucho más complejas. Este estado de evolución del Universo fue de gran importancia, ya que se pudieron formar los alcoholes, no sólo el más simple, el alcohol metílico, sino también más complejos como el alcohol etílico.

Actualmente se han identificado más de 130 moléculas, algunas de ellas con más de trece átomos. De ellas cabe destacar el amoníaco, el agua, el ácido cianhídrico, el formaldehído y el cianoacetileno.

Nacimiento de las estrellas de tipo solar y sus planetas

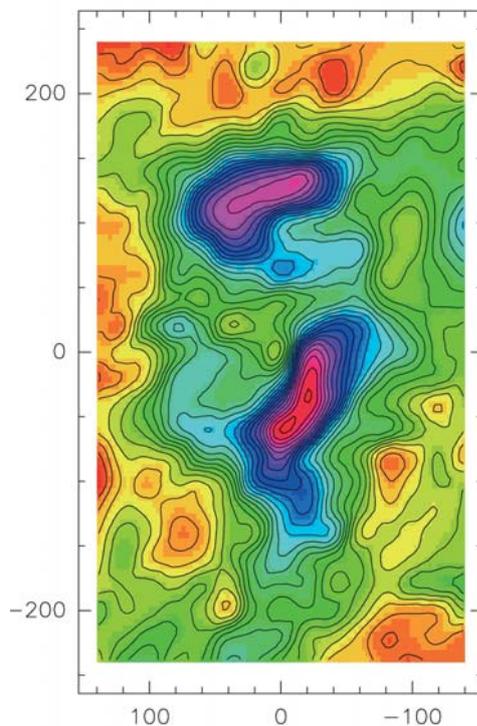
En el seno de estas nubes moleculares tiene lugar el colapso de la materia para formar las estrellas de tipo solar. La formación de una estrella no es el resultado de un proceso simple, sino que viene acompañada de la presencia de un disco de acrecimiento en rotación y de un flujo bipolar que expulsa materia. Dentro de los discos que giran alrededor de las protoestrellas se forman grandes conglomerados, de aproximadamente un kilómetro de tamaño, de material rocoso en su parte interna y de hielos, granos de polvo y gas en la parte externa, conocidos como planetesimales.

Objetos similares a estos conglomerados se pueden observar ahora en el Sistema Solar. Concretamente, los asteroides podrían considerarse como planetesimales rocosos y los cometas como planetesima-

Imagen de la galaxia M51 tomada con el telescopio espacial de la NASA. Los filamentos oscuros que se encuentran en los brazos espirales corresponden a grandes concentraciones de gas molecular y polvo en los que tienen lugar la formación de las nuevas estrellas.



Distribución del alcohol etílico en una nube molecular gigante situada en el núcleo central de la Vía Láctea. Fuente: Jesús Martín-Pintado (DMIR-IEM-CSIC).



les helados. Los estudios de los cometas muestran que las moléculas que se evaporan de sus núcleos tienen abundancias muy similares a las encontradas en el medio interestelar, e incluso en algún cometa se han detectado moléculas complejas orgánicas como el metanol.

Elementos caídos del cielo y síntesis prebiótica

Como sugirió Juan Oro en el año 1961, los impactos de grandes planetesimales en las primeras etapas de formación de la Tierra pudieron actuar en ocasiones como agentes destructores de la vida, pero también aportaron grandes cantidades de elementos esenciales para ella. De hecho, la química prebiótica parece sustentarse en un pequeño número de moléculas precursoras. El histórico experimento de Miller-Urey demostró la capacidad de generar aminoácidos a partir de una atmósfera reductora con moléculas simples como metano y amoníaco sometidas a descargas eléctricas.

Los experimentos de Juan Oro también muestran que una sopa prebiótica, que

contenga ácido cianhídrico y amoníaco disueltos en agua, da lugar a los aminoácidos (elementos esenciales de las proteínas) y, más importante aún, a la adenina. Esta molécula juega un papel central en la vida ya que es una de las cuatro bases nitrogenadas del ácido desoxirribonucleico (ADN) y del ácido ribonucleico (ARN)



Concepción artística del interferómetro que operará a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas *Atacama Large Millimeter Array*. Se prevé que este instrumento, que Europa y Estados Unidos construyen en colaboración, esté operativo en el año 2012.

Perspectivas futuras

Algunos de los pasos fundamentales que hemos esbozado hasta ahora son simplemente hipótesis. Pero en los próximos años, el estudio de la aparición y evolución de la vida centrará el desarrollo de nueva instrumentación y de misiones espaciales. Así, por ejemplo, la posibilidad de vida en Marte se abarcará en profundidad gracias a los programas de exploración de este planeta planeados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por la NASA. Asimismo, el telescopio espacial Herschel de la ESA abrirá por primera vez la ventana del infrarrojo lejano y permitirá estudiar la abundancia del agua en el Universo. La construcción, entre Europa, Norteamérica

y es un componente de la adenosina trifosfato, la molécula que provee de energía a las células. Asimismo, en experimentos más recientes se han llegado a formar además las otras tres bases del ADN: guanina, timina y citosina.

Estos experimentos demuestran que los compuestos necesarios para iniciar la química prebiótica se generan en grandes cantidades en el medio interestelar y que es muy factible que fueran suministrados a la Tierra por los cometas y asteroides durante los quinientos millones de años de intenso bombardeo que siguió a la formación del Sistema Solar. Estos compuestos se disolvieron en los océanos dando lugar a la sopa prebiótica.

Los meteoritos y la complejidad química prebiótica en el espacio

Hemos visto que las nubes moleculares son inmensos laboratorios que generan los compuestos moleculares básicos que, disueltos en agua, pueden dar lugar a las moléculas esenciales de la vida: los aminoácidos y las bases nitrogenadas. Afortunadamente, la constante aportación de material orgánico desde el espacio nos permite profundizar aún más en la composición química de la materia interestelar y de la materia del Sistema Solar. En la actualidad caen a la Tierra varios cientos de toneladas de material extraterrestre, la mayoría en forma de pequeñas partículas de polvo y de meteoritos. Estos meteoritos de tamaños intermedios permiten analizar con detalle la composición química orgánica de la materia extraterrestre.

Los meteoritos como el Murchison, el Orgueil y el Allende muestran una gran riqueza de compuestos químicos formados en condiciones abióticas. Concretamente, en el meteorito Murchison se han identificado un gran número de compuestos orgánicos, entre los que cabe destacar al menos

79 aminoácidos, ocho de ellos correspondientes a los veinte de los que se compone la vida en la Tierra. Además, se han detectado dos de las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos; la adenina y la guanina. Más importante aún es la identificación de ácidos grasos que no aparecen de manera simple en la química prebiótica realizada en laboratorios terrestres. En condiciones alcalinas, estos ácidos grasos pueden crear las membranas de las primeras células rudimentarias.

A la vista de nuestros conocimientos actuales sobre la complejidad química del medio interestelar es muy posible que no solo los compuestos básicos como el agua, el amoníaco, el ácido cianhídrico y el cianoacetileno, sino también los aminoácidos, las bases nitrogenadas y los ácidos grasos que constituyen las proteínas, los ácidos nucleicos y las membranas de las protocélulas, podrían haber sido suministrados por el polvo interestelar, los meteoritos y los cometas.

Se sabe que las primeras evidencias de vida en la Tierra datan de hace unos 3.800 millones de años, en la época en la que la Tierra aún estaba siendo bombardeada con gran intensidad. Todo parece indicar que la vida arraigó con rapidez en la Tierra e incluso es posible que apareciera antes, pero que no prosperara debido a las inhóspitas condiciones. Esto podría indicar que los cometas, los asteroides y el polvo interplanetario pudieron suministrar compuestos ya muy complejos que dieron lugar a un rápido desarrollo de la vida debido a la presencia de agua líquida.



Choque de un meteorito de gran tamaño cuando ya se habían formado los océanos en la Tierra. La aportación de material orgánico extraterrestre a la sopa prebiótica pudo jugar un papel fundamental en la aparición de vida en la Tierra.

Japón, del interferómetro a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas *Atacama Large Millimeter Array* (ALMA) nos permitirá hacer un censo mucho más completo de las moléculas existentes en el medio interestelar y comprender mejor los procesos que dieron lugar a la formación y evolución de los planetas y la complejidad química necesaria para entender la aparición de la vida.

Además, el siglo que acaba de empezar será, sin lugar a dudas, muy productivo en la investigación de las ciencias de la vida. Con toda seguridad, en los próximos años se desarrollarán proyectos interdisciplinares que incluyan a astrónomos, biólogos, químicos y geólogos y que traerán consigo descubrimientos fundamentales para el avance de nuestro conocimiento del origen de la vida.



Un ambiente hostil

LA CONQUISTA DEL ESPACIO EXIGIRÁ AL HOMBRE ADAPTARSE A UN MEDIO QUE NO ES EL SUYO

Por Emilio J. García
(IAA-CSIC)

"EL ESPACIO, LA ÚLTIMA FRONTERA...", así comenzaba una de las series televisivas míticas en la historia de la Ciencia Ficción: *Star Trek*. En dicha serie, la tripulación de la nave espacial *Enterprise* campaba alegremente de planeta a planeta surcando el espacio interestelar, sin más problema que el que acarrearía un encuentro con alguna belicosa civilización extraterrestre.

El viejo anhelo humano de escapar de la Tierra y conquistar el espacio. Y, aunque todavía quede lejos poder replicar las andanzas del capitán Kirk y compañía, ya se habla de un viaje tripulado a Marte, e

incluso de una posible base lunar permanente. Pero la cosa no es tan sencilla. Un largo viaje, y ya no digamos una base permanente en el espacio, conllevan un importante obstáculo: el propio cuerpo humano. Nuestro organismo está muy bien adaptado a su entorno, el planeta Tierra, pero el espacio es un medio muy diferente. De hecho se trata de un ambiente extremadamente hostil. ¿Han probado a sacar a un pez del agua? Pues algo parecido.

Casi sin peso

La imagen que suele aparecer en televisión de los astronautas de la Estación Espacial Internacional (EEI) es la de unos hombres y mujeres sanos y sonrientes flotando grácilmente en una claustrofóbica estancia. Y es que, orbitando a unos 330 km de la Tierra, la gravedad que experimentan es un 12,5% menor que la que sentimos en la superficie de nuestro planeta. Puede parecer relajante, pero al liberarse de su peso terrestre el cuerpo experimenta una importante pérdida de masa mus-

cular y ósea (por esto los astronautas deben practicar un ejercicio continuado). Como consecuencia aumenta la presencia de calcio en la sangre, lo que puede llegar a provocar serios problemas en el riñón. Además, se ha observado que en estas condiciones se produce una importante atro-

Al liberarse de su peso terrestre el cuerpo experimenta una importante pérdida de masa muscular y ósea

fía del sistema inmunológico -nuestro seguro contra enfermedades- que puede incluso conducir a la apoptosis, o el suicidio celular. Los experimentos con ratones parecen indicar que una posible solución residiría, curiosamente, en limitar, mediante una inyección de anticuerpos, el efecto de la osteopontina, una proteína estructural



Foto: ESA

relacionada con la pérdida ósea y la atrofia del sistema inmunológico.

Por si esto no basta, debemos recordar que el cuerpo humano es un conjunto de fluidos corporales como sangre, suero y agua, y que en la Tierra existe un equilibrio entre la gravedad que empuja dichos fluidos "hacia abajo" y la presión arterial y venosa que los bombea "hacia arriba". En el espacio este equilibrio se rompe y se produce una nueva distribución de los fluidos en el organismo, lo que provoca que el rostro y el torso de los astronautas se hinchen y sus piernas adelgacen. Este cambio lleva al cerebro a creer que existe un exceso de volumen de sangre en el cuerpo que debe eliminar, lo que provoca anemia, déficit inmunitario y atrofia cardiovascular. Actualmente existen programas para estudiar y analizar estos efectos en los astronautas de la EEI.

Y ya que mencionamos el cerebro, sin duda una de las mayores incógnitas reside en conocer la respuesta de nuestra materia gris ante un largo periodo en el espacio. Nuestro cerebro es un órgano que, durante millones de años, ha evolucionado inmerso en el campo gravitatorio terres-



Cristales de zeolitas crecidas en condiciones terrestres y los mismos cristales crecidos en condiciones de microgravedad.

MICROGRAVEDAD

Todos los miembros y laboratorios de la EEI se encuentran en condiciones de microgravedad, término que no hay que confundir con el de "ingravedad" o "gravedad cero". Paradójicamente, la microgravedad se consigue cuando la única fuerza existente es la de la gravedad, es decir, cuando el cuerpo se encuentra

en lo que se denomina "caída libre". En su movimiento orbital, la EEI está en una permanente caída hacia la Tierra, compensada por la curvatura de esta, algo similar a si nos dejáramos caer desde una torre de altura infinita. Estas condiciones de microgravedad son excepcionales a la hora de sintetizar productos

tanto materiales (componentes eléctricos, plásticos, etc.) como biológicos (proteínas, cultivos celulares, etc.) en condiciones no reproducibles en Tierra, lo que convierte la EEI en un banco de pruebas excepcional para multitud de campos de aplicación terrestre como ingeniería, medicina, biotecnología, etc.

tre. Aunque no seamos conscientes de ello, el cerebro recibe y procesa constantemente información acerca de la gravedad terrestre. Por ejemplo, la gravedad nos marca qué es "arriba" y "abajo", percibimos la orientación de nuestro propio cuerpo en el espacio, sentimos el peso de los objetos..., incluso el peso de nuestras articu-

laciones nos informa de dónde se encuentran nuestras extremidades sin tener que mirarlas. Pero en ausencia de gravedad todo esto se pierde. El cerebro intenta entonces aplicar patrones de comportamiento válidos en gravedad terrestre a un medio carente de ella y surge el llamado "mal del espacio": desorientación, dolor

de cabeza, mareos, vómitos, trastornos del sueño y de la percepción, etc. Afortunadamente el cerebro aprende rápido y estos síntomas suelen desaparecer a los pocos días.

Pero precisamente esta gran capacidad de adaptación del cerebro a un nuevo medio podría implicar cambios mucho más profundos. El investigador del Instituto de Neurobiología Ramón y Cajal (CSIC) Javier de Felipe participó en el proyecto *NeuroLab*, diseñado por la NASA para comprobar los efectos en el cerebro de un viaje espacial de larga duración. Los resultados demostraron que, en una prolongada ausencia de gravedad, se producen alteraciones y modificaciones en los circuitos que conectan las células neuronales. Lo más fascinante es que estos cambios se sitúan principalmente en la corteza cerebral, la parte del cerebro donde se localizan aspectos que nos definen como seres humanos, como el lenguaje, la capacidad para imaginar, para pensar... Según aventura de Felipe, cambios tan profundos podrían ser irreversibles y llevar, en un futuro espacio colonizado, al desarrollo de una nueva especie - el homo sapiens spatii - perfectamente adaptado al cosmos, pero incapaz ya de habitar en el planeta Tierra.

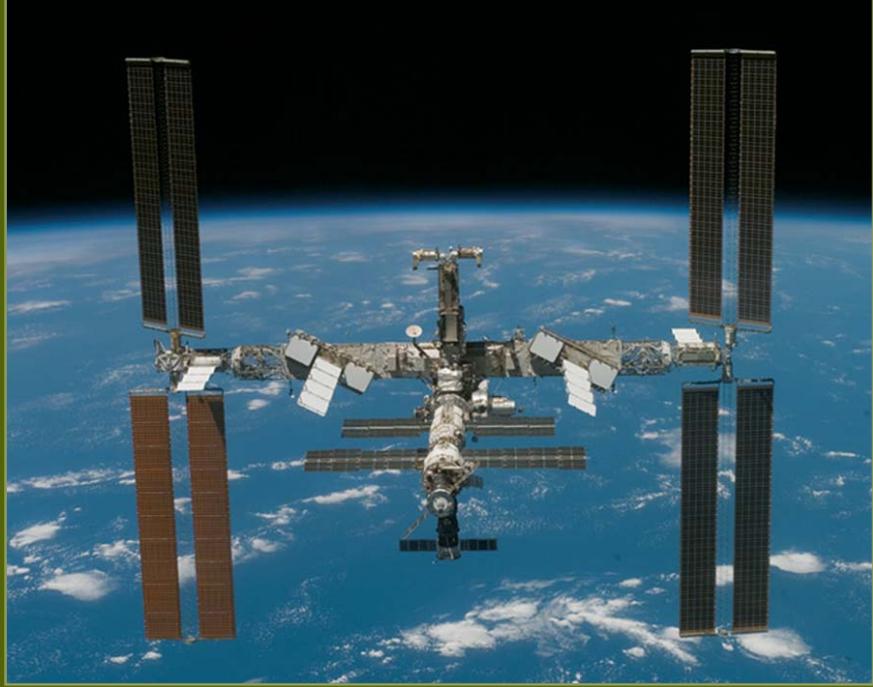
Aunque no seamos conscientes de ello, el cerebro recibe y procesa constantemente información acerca de la gravedad terrestre

Radiación cósmica

Pero tanto ese futuro hombre del espacio como los primeros valientes que viajen al planeta Marte deberán enfrentarse a un peligro mucho mayor que la falta de gravedad: la radiación cósmica.

Los rayos cósmicos son partículas cargadas (protones, electrones, etc.) que viajan por el espacio a una velocidad cercana a la de la luz. Básicamente existen dos tipos: los de baja energía, originados en el Sol, y los de alta energía, mucho menos frecuentes y procedentes de supernovas y otras fuentes cósmicas. El efecto de estos últimos sobre el ser humano puede ser devastador. Una partícula suficientemente energética puede atravesar una célula y romper la cadena de ADN, lo que puede provocar cáncer y mutaciones genéticas que se transmitirían de una generación a otra. Además, una exposición larga y per-

ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL



Si un día cualquiera levantamos la cabeza al cielo nocturno y tenemos suerte, es posible que observemos un punto luminoso superado en brillo solo por la Luna y Venus, y que no corresponde a ninguna estrella ni objeto astronómico natural, sino a la mano del hombre. Se trata de la Estación Espacial Internacional (EEI), un laboratorio espacial situado a más de 360 km de la Tierra y que orbita a 26.000 km/hora, lo que equivale a una vuelta completa a la Tierra cada 92 minutos. Con la historia de la EEI podría escribirse un libro. Por un lado, destaca por los continuos obstáculos y retrasos técnicos y económicos - como los provocados por el terrible accidente del transbordador *Columbia* en el 2003, o la brutal recesión económica que Rusia sufrió a finales de los noventa. Pero, por otro lado, ejemplifica la importancia de la colaboración internacional: actualmente dieciséis países participan en la construcción de la EEI, entre ellos Estados Unidos, Rusia, Japón y la Agencia Espacial Europea, donde se incluye España. La EEI se está construyendo como si de un mecano se tratara. Primero se construyen los diferentes módulos en Tierra y posteriormente se ensamblan en el espacio. El primero de estos fue el módulo ruso *Zarya*, allá por el año 1997, al que siguió el americano *Unity*. Los últimos en llegar han sido el módulo europeo *Colombus* y el japonés *Kibo*. Cuando esté completada (las pre-

visiones apuntan al 2010), la estación contará con más de 1.300 metros cúbicos de espacio habitable repartidos entre seis laboratorios, con una tripulación internacional de siete miembros y con más de cien millones de dólares americanos empleados en su construcción. A cambio, contaremos con el mejor laboratorio posible para estudiar los efectos, tanto fisiológicos y psicológicos, que una larga estancia en el espacio puede provocar en los seres vivos, experimentar técnicas de cultivos y reciclado de agua para asegurar el abastecimiento de una futura colonia espacial, así como multitud de experimentos útiles a la hora de diseñar un futuro viaje espacial.

manente a los rayos cósmicos de baja energía implicaría pérdida de glóbulos rojos, infertilidad, mareos, vómitos, y toda una serie de efectos no conocidos aún. El campo magnético protege a los miembros de la Estación Espacial Internacional de esta mortífera lluvia. Aun así, reciben una dosis de radioactividad mucho más alta que la que llega a la superficie terrestre, protegida además por la atmósfera, hasta el punto de que muchos confiesan despertarse varias veces en sus horas de descanso debido a potentes fogonazos producidos al chocar rayos cósmicos contra

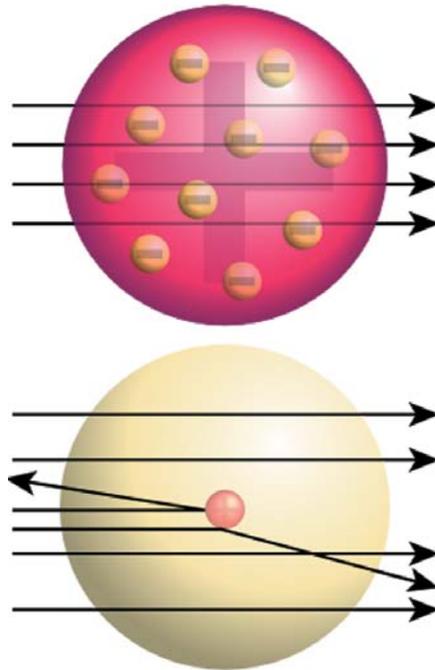
su nervio óptico. Más allá del campo magnético terrestre, a unos 450 km de la Tierra, los astronautas tan solo contarían con la protección del vehículo espacial. Los materiales que se emplean actualmente no asegurarían la pervivencia de la tripulación en un viaje más allá de la mitad de la distancia al Sol. Por este motivo, uno de los grandes desafíos de la ciencia espacial es la búsqueda de nuevos materiales que nos permitan escapar de nuestro medio natural, como una pecera protege a un pez fuera del agua.

Desmenuzando la materia...

...en busca de los orígenes de la física de partículas

POR SILBIA LÓPEZ DE LACALLE
(IAA-CSIC)

Lo que hoy constituye, para los profanos, una disciplina complejísima, comenzó como una cuestión filosófica que buscaba los fundamentos de la materia o, más concretamente, aquel elemento simple que no estaba compuesto por piezas menores. Si bien los filósofos indios ya hablaban, en el siglo VI a.C., de unidades que formaban elementos más complejos formando pares, y después tríos de pares, fue el griego Demócrito quien, dos siglos después, acuñó el término átomo para describir la partícula de materia más pequeña e indivisible. Pero su teoría no cuajó y, en cambio, sí la de Aristóteles, que proponía como elementos fundamentales el fuego, el agua, la tierra y el aire. Así, por ejemplo, los metales estaban formados por el elemento tierra y una pizca de los otros, mientras que los objetos menos densos tenían, sencillamente, menos proporción de tierra. Otra cuestión eran los cuerpos celestes, que no estaban compuestos por los cuatro elementos ordinarios sino por el quinto elemento, el éter, incorruptible y sin peso. Por extraño que nos parezca, esta visión aristotélica del mundo material sobrevivió durante siglos, hasta que los nuevos descubrimientos en el campo de la química impusieron una revisión; más concretamente, fue Robert Boyle quien, con su obra publicada en 1661 y titulada *El químico escéptico*, fijó el punto de inflexión: Boyle defendía una teoría en la que describía la realidad y sus cambios mediante corpúsculos (átomos) y sus movimientos, y ofrecía evidencias experimentales y descripciones detalladas de sus experimentos. De nuevo, transcurrieron siglos (cuyos hitos tenemos que saltarnos) hasta que se reveló la estructura del átomo y resultó que tampoco es la partícula fundamental e indivisible: en 1897, el físico J.J. Thomson descubrió la existencia de los electrones como constituyentes del átomo y, en 1904, planteó una descripción conocida como "modelo del pudín de ciruelas" en la que el átomo se compone de electrones rodeados por una nube de una sustancia positiva -eso sí, el nombre no refleja del todo el modelo de Thomson porque aporta un matiz estático, en tanto que el artículo original aludía a una estructura dinámica ya en el mismo título (*Sobre la estructura del átomo: una investigación de la estabilidad y los periodos de*



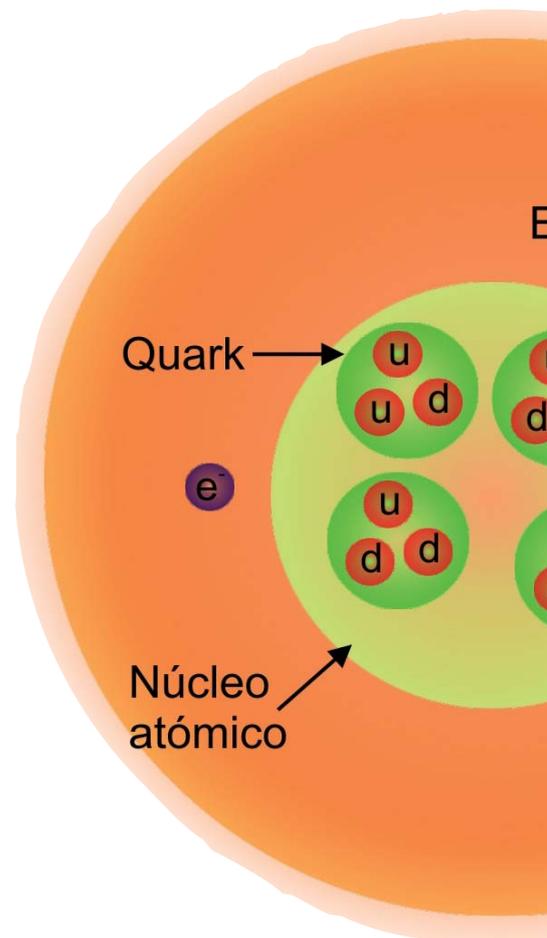
Experimento de la hoja de oro. Arriba: los iones pasan a través del modelo de pudín de ciruelas sin alterar su trayectoria. Abajo: los resultados observados muestran una pequeña proporción de partículas desviadas, lo que indica una pequeña y concentrada carga positiva.

oscilación de un número de corpúsculos situados en intervalos iguales en torno a la circunferencia de un círculo).

El modelo de Thomson quedó descartado en 1909 por el siguiente experimento, realizado por Hans Geiger y Ernest Marsden y liderado por Ernest Rutherford: los investigadores bombardearon una hoja de oro con iones de helio cargados positivamente y descubrieron que un pequeño porcentaje se desviaba en ángulos mucho mayores que los predichos por Thomson. Esto llevó a Rutherford a pensar que la carga positiva de un átomo, así como la mayor parte de su masa, se hallaba concentrada en un núcleo central, con los electrones girando en torno a él como los planetas alrededor del Sol (por eso los iones de helio que pasaban cerca del núcleo sufrían desviaciones tan pronunciadas).

De modo que, a principios del siglo XX, se esbozaba la estructura atómica compuesta por un diminuto y denso núcleo con carga positiva rodeado de una nube de electrones con carga negativa. Ante esto, la pregunta era inevitable: ¿es el núcleo del átomo, de apariencia tan sólida, la partícula fundamental? Y resultó que tampoco, porque se des-

cubrió que se componía de protones, con carga positiva, y neutrones, que carecen de carga. Volviendo a lo mismo: ¿son los protones y neutrones las partículas fundamentales? No: los físicos descubrieron que se componen de "piezas" aún más pequeñas, denominadas quarks, que, de momento, parecen dar por finalizada la búsqueda al no estar compuestos por nada más pequeño. Y con esto llegamos al modelo moderno de átomo, que vemos en una de las imágenes: electrones moviéndose en órbitas en torno al núcleo, compuesto de protones y neutrones que, a su vez, están formados por quarks. Eso sí, la imagen está distorsionada: si dibujáramos un átomo a escala, donde los protones y neutrones midieran un centímetro de diámetro, entonces los electrones y los quarks medirían menos que un cabello humano y el diámetro de todo el átomo sería mayor que treinta campos de fútbol. Como vemos, el 99,999999999999% del volumen del átomo está vacío.



ALGUNAS COSAS FUNDAMENTALES

¿Quiénes son?

1

Aunque se han descubierto más de doscientas partículas subatómicas, los científicos han intentado ordenarlas a través de lo que se conoce como el Modelo Estándar, que describe de qué está hecho el mundo y qué es lo que lo mantiene unido. La receta, muy simplifi-

cada, sería más o menos así: tenemos **seis quarks** con nombres muy peculiares y a los que se alude como **pares (arriba/abajo, encanto/extraño y cima/fondo)** y **seis leptones**, uno de los cuales ya conocemos (el electrón), que también tienen nombres curiosos (**electrón,**

muón, tau -todos con carga eléctrica- y un tipo de neutrino -sin carga- para cada uno de ellos). Para suerte de los profanos, toda la materia que vemos se compone de los quarks y leptones más ligeros, el par arriba/abajo y el electrón, lo que nos devuelve a un escenario algo más familiar: los átomos de la materia ordinaria presentan un núcleo formado por protones y neutrones, com-

puestos por tres quarks cada uno (un protón=dos quarks arriba y uno abajo; un neutrón=un quark arriba y dos abajo) y una nube de electrones. El resto de partículas fundamentales son más pesadas, y por lo tanto inestables (se desintegran en partículas ligeras), y su existencia está más relacionada con los laboratorios de física de partículas o con escenarios extremos, como el Big Bang.

2

¿Qué hacen?

AHORA QUE SABEMOS QUE, HILANDO FINO, NOS COMPONEMOS DE LA PAREJA DE QUARKS ARRIBA/ ABAJO Y DE ELECTRONES, FALTA LA SEGUNDA PARTE: ¿QUÉ ES LO QUE LOS MANTIENE JUNTOS O, DE MODO MÁS GENERAL, CÓMO INTERACCIONAN LAS PARTÍCULAS?

Lo mejor (y lo peor) de este punto es que ni siquiera tienen que tocarse, sino que lo que hacen es intercambiar otro tipo de partículas, conocidas como mediadoras. Aunque esto parezca poco intuitivo, podemos pensar en ellas como transmisoras de información: imaginemos, por ejemplo, dos barcos que navegan en la niebla y van a chocar. Ambos reciben un mensaje que les avisa del peligro y deciden modificar su ruta y evitar el choque. Ese mensaje sería la partícula mediadora que, en la naturaleza, se presenta en cuatro modalidades, o interacciones, distintas: la interacción electromagnética, la nuclear fuerte, la nuclear débil y la gravitatoria.

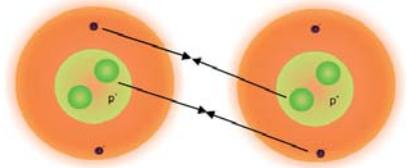
Lo mejor (y lo peor) de este punto es que ni siquiera tienen que tocarse, sino que lo que hacen es intercambiar otro tipo de partículas, conocidas como mediadoras. Aunque esto parezca poco intuitivo, podemos pensar en ellas como transmisoras de información: imaginemos, por ejemplo, dos barcos que navegan en la niebla y van a chocar. Ambos reciben un mensaje que les avisa del peligro y deciden modificar su ruta y evitar el choque. Ese mensaje sería la partícula mediadora que, en la naturaleza, se presenta en cuatro modalidades, o interacciones, distintas: la interacción electromagnética, la nuclear fuerte, la nuclear débil y la gravitatoria.

LA GRAVEDAD

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

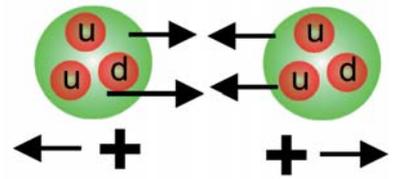
INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

El electromagnetismo provoca que las partículas con igual carga se atraigan y las que tienen carga opuesta se repelan, y su partícula mediadora es el fotón. La interacción electromagnética es responsable de la unión estable de los átomos pero, ¿cómo?, si hemos visto que los átomos son neutros al equilibrar la carga negativa de los electrones y la positiva de los protones... Aquí ocurre otra cosa extraña, y muy afortunada: un electrón de un átomo puede interactuar con el protón de un átomo vecino y generar una unión que permite la formación de moléculas y, por extensión, de "cosas"; por ejemplo, nuestro cuerpo se compone en su mayor parte de agua, una molécula resultante de la unión de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Así que podría decirse que existimos gracias a que los electrones y protones tienen cargas diferentes.



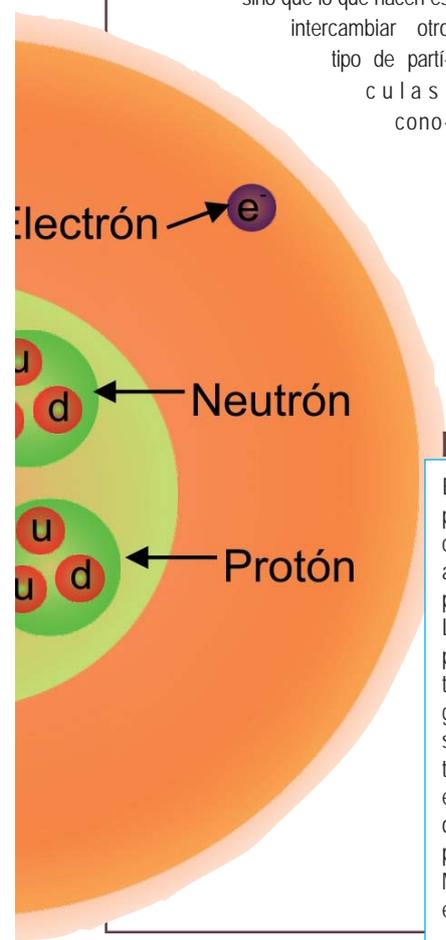
FUERZA NUCLEAR FUERTE

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



FUERZA NUCLEAR DÉBIL

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



Examen final para el Modelo Estándar de Partículas

Por Víctor Aldaya y Francisco López (IAA, CSIC)

Las interacciones de la vida real ANTES DEL NACIMIENTO DE LA TEORÍA CUÁNTICA, la Física se manejaba solamente con las dos interacciones que se manifiestan dentro de las escalas de la vida corriente, esto es, la interacción gravitatoria y la electromagnética. Ambas tienen en común su *largo alcance*, es decir, su acción se deja sentir a grandes distancias. Este hecho se expresa matemáticamente por un decaimiento como el inverso de la distancia del potencial del que deriva su fuerza. Incluso su analogía puede llevarse tan lejos como para comparar el movimiento kepleriano de los astros con el de los electrones en torno al núcleo de los átomos. Sin embargo, hay una diferencia cualitativa que las distingue más allá de las escalas humanas, y es la inexistencia de masas (cargas gravitatorias) negativas. En efecto, una carga eléctrica positiva rodeada más o menos simétricamente por cargas de distinto signo da lugar a un potencial efectivo con un decaimiento muchísimo mayor. Así pues, solo la inte-

racción gravitatoria se hace sentir a escalas cosmológicas, y gobierna la evolución del Universo en el régimen clásico actual. En los comienzos de la Mecánica Cuántica, o Física de las escalas muy pequeñas, en un intento por describir la estructura de los propios núcleos atómicos, compuestos por protones y neutrones, hubo de introducirse una nueva interacción que aglomerara tales componentes. Es la interacción *fuerte*, que ha tenido un carácter fenomenológico hasta entrada la segunda mitad del siglo XX. En esos momentos, lo que podríamos denominar *materia de diario* estaba constituida por *electrones* e^- , en la corteza de los átomos, *protones* p y *neutrones* n , en los núcleos atómicos, y, también desde el punto de vista corpuscular, el *fotón* γ . A estos componentes hay que añadir sus antipartículas (e^+ , p^- , \bar{n} , $\gamma = \bar{\gamma}$). En 1930, sin embargo, fue necesario imaginar la existencia de una nueva partícula, e incluso una nueva interacción, que explicara la desintegración (*desintegración* β) de los neutrones libres, dando lugar

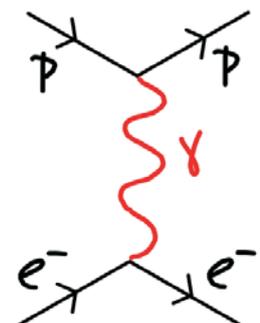
a protones y electrones de acuerdo con el esquema de reacción:



La nueva partícula, el *neutrino*, era requerida en la reacción anterior para satisfacer la conservación de la energía. Esta nueva interacción fue denominada *débil* por ser aproximadamente un millón de veces más débil que la fuerte y unas diez mil veces más débil que la electromagnética, grosso modo; esta interacción resultaba ser de muy corto alcance en contraposición a las interacciones que se manifiestan en la vida corriente. La comprobación experimental de la existencia del neutrino no tuvo lugar hasta 1956.

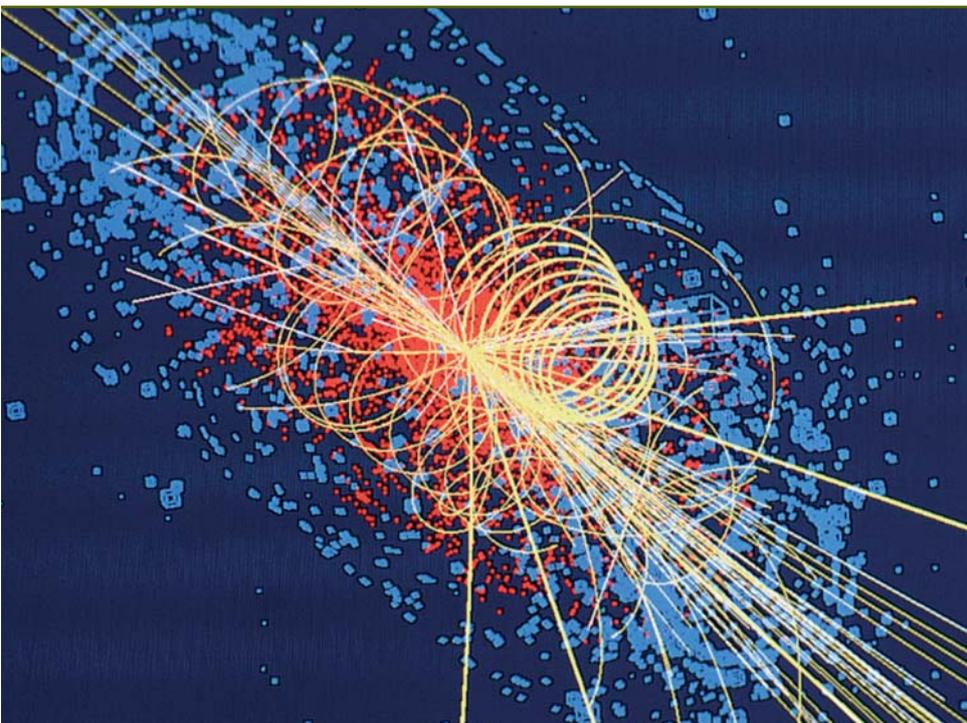
Teoría Cuántica de la Interacción

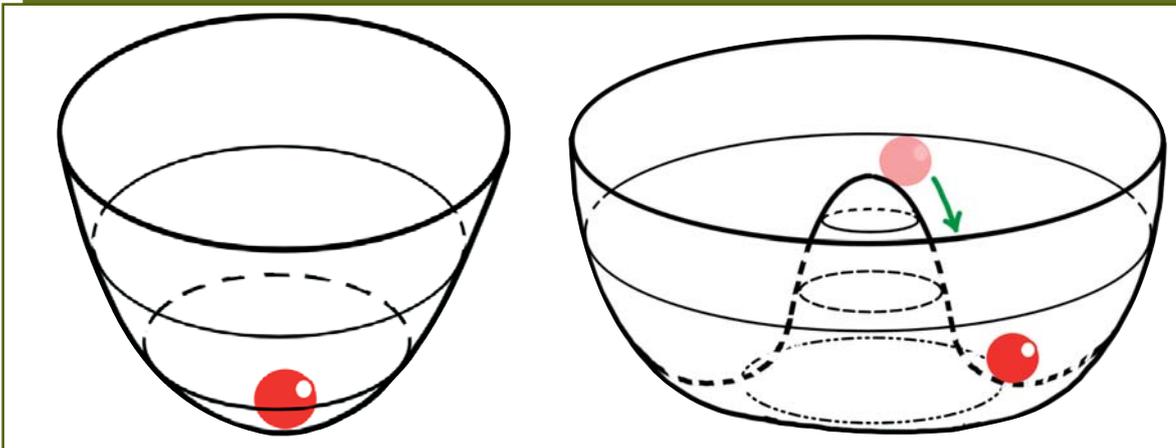
A la Mecánica Cuántica primitiva pronto siguió una Teoría Cuántica del Campo Electromagnético como mediador de la interacción entre cargas eléctricas elementales. Así, el fotón toma consideración de partícula cuántica propiamente, de modo que la acción a distancia de dos partículas cargadas tiene lugar por intercambio de una partícula mediadora, el fotón, que les intercambia momento y energía preservando la carga de cada una. Gráficamente se representa por un *diagrama de Feynman* del tipo:



Arriba. Electrón protón yendo a electrón protón.

Izda. Simulación de un suceso típico en el CMS del LHC.





Izda. Potencial correspondiente a una partícula con masa real.
Dcha. "Potencial" de Higgs.

Dos características fundamentales que garantizan la consistencia general de una teoría cuántica de la interacción son la *finitud* y la *unitariedad*. En el caso de la Electrodinámica Cuántica estas propiedades están garantizadas fundamentalmente en virtud a una simetría conjunta de las partículas elementales cargadas, a la que se acoge como a un *Principio* (Principio de Invariancia Gauge). Hay que remarcar, no obstante, que la simetría gauge requiere necesariamente que la masa de la partícula mediadora, el fotón en este caso, sea cero. Afortunadamente, la caracterización cuántica del campo electromagnético mediante una partícula de *masa nula* está en completo acuerdo con el *alcance "infinito"* (es decir, como el inverso de la distancia) de la interacción.

Modelo Estándar de Partículas

Con este nombre se designa un modelo teórico de unificación de las interacciones Electromagnética y Débil entre las partículas fundamentales que sienten su acción y que se denominan leptones. Fue formulado originariamente por Steven Weinberg [Phys. Rev. Lett. 19, 1264 (1967)], aunque lleva también asociados los nombres de Salam y Glashow, así como el de Higgs.

El inconveniente esencial que previene la unificación de estas dos interacciones es el alcance "finito" de la fuerza débil (puede decirse que es puntual), que requiere de las supuestas partículas mediadoras una masa considerable (es decir, no despreciable en ninguna aproximación) y, como se ha comentado antes, no es posible realizar una simetría gauge análoga a la de la interacción electromagnética.

La "solución" que se adoptó consiste en dar originalmente a la interacción débil una estructura gauge, es decir, asociada a una simetría gauge análoga a la electromagnética, aunque con tres campos mediadores W^+ , W^- y Z , originalmente sin masa, y dotarlos de masa posteriormente mediante lo que se conoce como *mecanismo de Higgs*. En realidad, por el mismo precio se dota de masa a todas las partículas de la teoría, que hay que suponer también originariamente sin masa. Con arreglo a la estructura de teoría gauge, la desintegración β se expresa simbólicamente con el diagrama de Feynman:

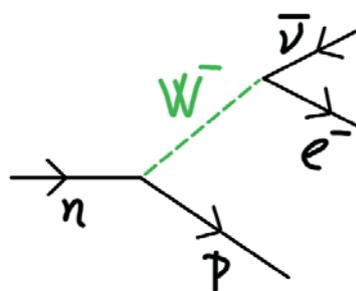


Diagrama de Feynman de la desintegración beta

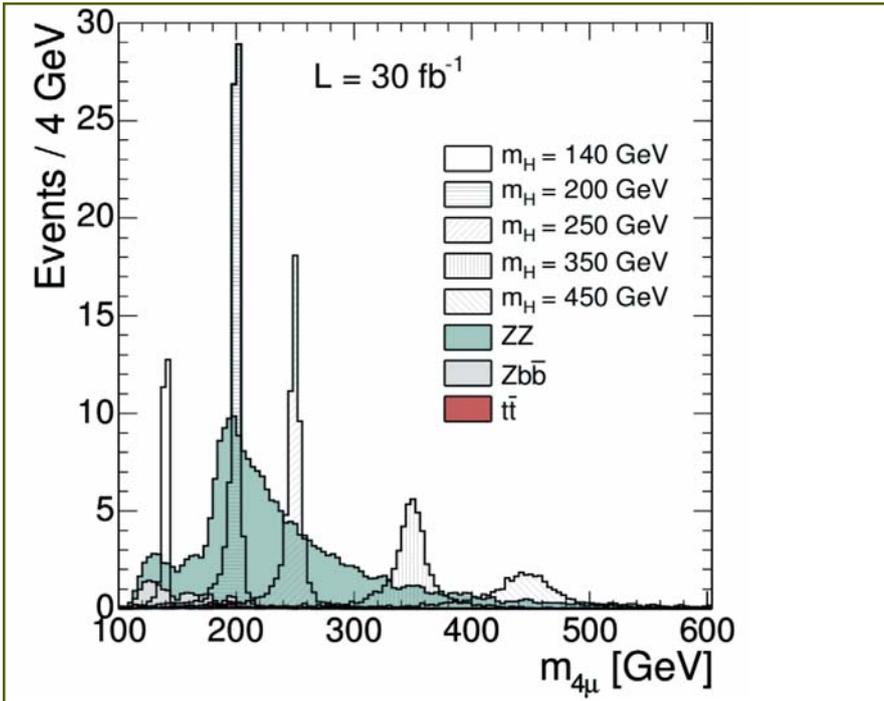
El mecanismo de Higgs fue importado de la Teoría de Estado Sólido, donde se diseñó para dar cuenta del fenómeno denominado *rotura espontánea de simetría*, que se presenta en un material ferromagnético cuando la temperatura del cristal desciende por debajo de una *temperatura crítica*; en ese momento los espines de la red empiezan a alinearse según una

dirección dada, aunque arbitraria, tendiendo así a un *vacío* espontáneamente elegido entre una infinidad de estados (direcciones) equivalentes.

En el caso de la interacción electro-débil, el proceso de rotura espontánea de la simetría se modeliza con la introducción de un *campo complejo* ϕ de dos componentes (cuatro campos reales), "no físico" (con masa imaginaria), con un potencial de auto-interacción $V(\phi)$ como el que aparece en una de las figuras. A diferencia del potencial que correspondería a una partícula con masa real, con un (único) mínimo absoluto, como en la figura, el que propone el modelo posee un continuo de mínimos, pero ninguno singularizado. La elección (artificial) de un *mínimo particular* de entre ellos se realiza mediante un "sencillo cambio de variables" que traslada el origen de coordenadas al mínimo elegido. Este proceso extrae del campo complejo ϕ uno real H con masa real, el (bosón de) *Higgs*, y da masa al resto de las partículas.

¿Pero dónde está el Higgs?

La "solución" propuesta en el Modelo Estándar puede parecer artificial desde un punto de vista fundamental (a nosotros, al menos, nos lo parece), pero esto no es una cuestión de pareceres, sino de Física, es decir, de medidas experimentales. Ninguno de los aceleradores existentes hasta el momento (LEP, SLC, HERA, Tevatron) ha observado el Higgs. Hasta ahora, la búsqueda más sensible se ha llevado a cabo en el LEP del CERN, que lo ha excluido por debajo de 123 veces la masa del protón (114 GeV). Por tanto, ha de



Gráfica de eventos esperados dependiendo de la masa del Higgs.

de los canales más limpios para su descubrimiento en un amplio rango de masas es su desintegración en cuatro muones a través de dos bosones Z.

El lector que haya llegado hasta aquí podrá ver recompensada su paciencia al identificar en la figura inferior la traza de cuatro muones característica de la desintegración de un bosón de Higgs a través del llamado *canal de oro*.

En la imagen del recuadro se muestra cómo se observaría, en este canal, la señal del Higgs sobre la de fondo (ruido) para distintos valores posibles de su masa [CMS Collaboration, *J. Phys. G* 34, 995-1579 (2007)].

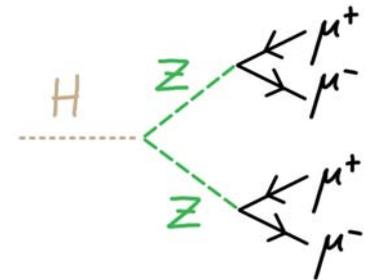


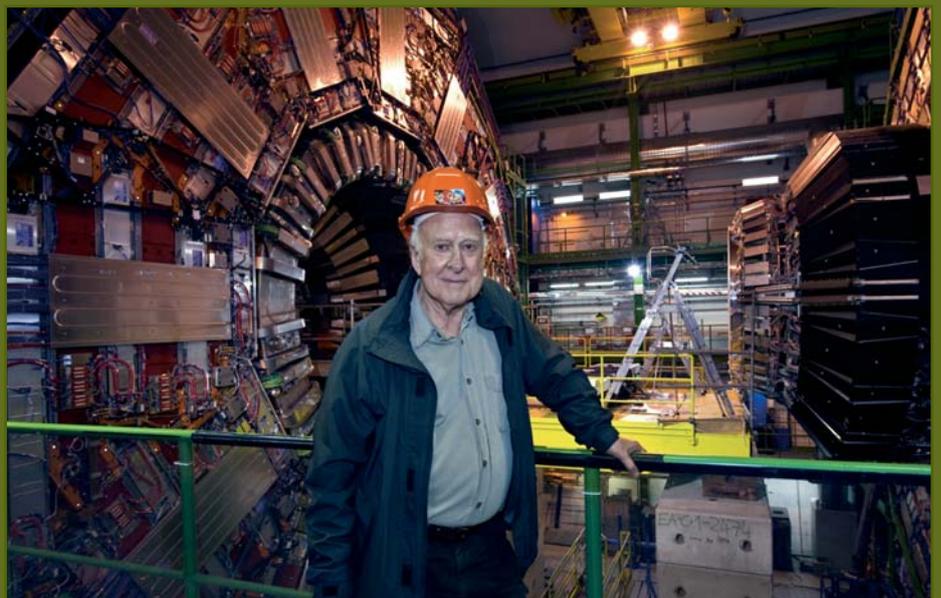
Diagrama de Feynman de un Higgs H yendo a cuatro muones.

esperarse a que el Gran Colisionador de Hadrones (del inglés *Large Hadron Collider* o LHC) nos dé una respuesta sobre su existencia. Si el bosón de Higgs exis-

te, podrá ser descubierto con el Espectrómetro Compacto de Muones (del inglés *Compact Muon Spectrometer* o CMS), uno de los cuatro experimentos del LHC. Uno

EL MODELO ESTÁNDAR DESDE EL IAA

Dentro del grupo de Gravitación y Cosmología, con la destacada colaboración de Manuel Calixto y Eduardo Sánchez, se ha desarrollado una alternativa al mecanismo de Higgs, en el marco del Modelo Estándar, en la que, en lugar de introducir el doblete escalar complejo ϕ , se atribuye carácter de campo real a los propios parámetros del grupo de gauge (como funciones del espacio-tiempo que son), aunque solo se da dinámica a aquellos que parametrizan una capa (concretamente, una "órbita coadjunta") del grupo. La idea de reemplazar el campo escalar complejo por parámetros del grupo de gauge había sido desarrollada previamente, aunque conducía a una teoría no finita y/o no unitaria. La diferencia ahora estriba en que con nuestra restricción es posible realizar la teoría cuántica como una representación unitaria e irreducible de un grupo, de manera no perturbativa. Como en el caso del mecanismo de Higgs, los grados de libertad de los campos dinámicos añadidos se transfieren a modos longitudinales de los bosones vectoriales que han de tomar masa, no sobreviviendo ningún campo físico extra que haya de ser detectado.



Nuestra propuesta no requiere de la presencia de ninguna partícula adicional a las que ya se han detectado, pero esto no contradice que se vea el (Prof. P.) Higgs en el LHC.

Pilares científicos

HISTORIA DEL ANÁLISIS ARMÓNICO

LA EVOLUCIÓN DEL ANÁLISIS ARMÓNICO VIENE CARACTERIZADA POR EL AUMENTO Y LA DIVERSIFICACIÓN DE SUS APLICACIONES POSIBLES

La idea original de Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) sobre la posibilidad de descomponer una función (señal u onda) arbitraria como una suma de sinusoides (oscilaciones de frecuencia fija) ha ejercido una enorme influencia en Ciencias e Ingeniería. Hay que decir que, ya antes, los astrónomos babilónicos usaban una primitiva forma de "análisis de Fourier" para la predicción de eventos celestes; también, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) observó relaciones armónicas (relaciones que guardan entre sí dos frecuencias cuando una es múltiplo de la otra) en los periodos de las órbitas de asteroides e ideó un algoritmo eficiente para el cálculo de amplitudes y fases, ahora conocido como transformada de Fourier rápida, que después popularizarían Cooley y Tukey en 1965 en el campo de la

Computación. La idea de Fourier estuvo motivada por sus estudios matemáticos sobre la propagación del calor, especialmente por el entendimiento de la distribución global de la temperatura terrestre. Pero es con la gran "revolución eléctrica" cuando las aplicaciones del análisis de Fourier al procesamiento de señales alcanzan su máximo esplendor. El diseño de filtros para eliminar ruido, la discretización y los teoremas de muestreo, como el de Nyquist-Shanon, constituyen pilares básicos en el terreno de las Telecomunicaciones y la Exploración del Espacio. Hoy en día el análisis armónico es de aplicación cotidiana en campos tan diversos como la Óptica (desde la espectroscopía tradicional hasta la cristalografía de rayos X con su papel en el desentrañamiento de la estructura de proteínas y del ADN), la Acústica, la Tomografía Computerizada (más allá de la radiología clásica), la Resonancia Magnética Nuclear (y sus aplicaciones en Medicina), el Tratamiento de imágenes,

la Radioastronomía e incluso la Cosmología Moderna (análisis del espectro de la radiación de fondo, etc.). Además, el análisis armónico forma parte de los propios cimientos de la Mecánica Cuántica, sin contar otros aspectos más matemáticos como su papel en la teoría de los números primos o la criptografía. A propósito de la criptografía, el descubrimiento más espectacular (debido a Peter Shor en 1994) en el moderno campo de la Computación Cuántica es que existen algoritmos cuánticos de factorización exponencialmente más eficientes que cualquier algoritmo clásico. Dichos algoritmos, de ser implementados en un futuro "computador cuántico", podrían amenazar la privacidad de la mayoría de las operaciones financieras actuales. De nuevo, el ingrediente esencial para la factorización cuántica resulta ser precisamente una versión cuántica de la transformada rápida de Fourier.

Incertidumbres

ONDÍCULAS Y ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN

EL ANÁLISIS WAVELET CONSTITUYE UNA NUEVA TÉCNICA CON VENTAJAS SOBRE EL ANÁLISIS DE FOURIER

Actualmente, el análisis de Fourier puede verse como un mero capítulo dentro del llamado "análisis armónico conmutativo", un caso particular, a su vez, del "análisis armónico no conmutativo". A cada tipo de análisis armónico se le puede asociar un *grupo*, esto no es más que una estructura matemática que codifica las simetrías que posee un sistema. Existen muchos tipos de grupos: el análisis armónico tradicional está asociado al grupo de las traslaciones, que es conmutativo (da igual el orden en el que se efectúen las operaciones de simetría). Un ejemplo de grupo no conmutativo lo constituyen las rotaciones en el espacio: basándose en ellas se pueden construir armónicos esféricos, la generalización del concepto de sinusoi-

de a la esfera. Fue Gauss quien introdujo el concepto clave de carácter de un grupo en teoría de números. Especial atención prestaremos aquí al grupo de similitud, compuesto de traslaciones y rotaciones espaciales más dilataciones, que está en la base de la denominada transformada *wavelet* ("ondícula", del francés *ondelette*, que significa "onda pequeña"). Fue el ingeniero Jean Morlet quien en 1980 acuñó este término cuando trabajaba en sismología y prospección petrolífera, usando un tipo de ondas de alta frecuencia obtenidas por reescalamiento de una "ondícula madre" (de media nula) para analizar la estructura del subsuelo -aunque la idea de ondícula ya estaba presente en el concepto de estado coherente en Mecánica Cuántica. ¿Dónde radica la ventaja del análisis *wavelet* sobre el análisis de Fourier? Los sinusoides de Fourier están localizados en frecuencia pero no en tiempo. Pequeños cambios

en el dominio de frecuencias producen cambios deslocalizados en todo el dominio del tiempo o, de otra forma, aunque sepamos determinar todas las frecuencias presentes en una señal, no sabemos cuándo están presentes. Por el contrario, las ondículas están localizadas no solo en frecuencia (vía dilataciones) sino también en tiempo (vía traslaciones). Muchos tipos de funciones, como aquellas que presentan discontinuidades y picos pronunciados, pueden representarse de forma más compacta y eficiente (con menos coeficientes) usando ondículas. Esto hace de ellas una herramienta excelente en compresión de imágenes y datos (como la de huellas digitales y el formato JPEG). Pero son innumerables las aplicaciones de este análisis multiresolución a todos los campos del saber (incluida la Astrofísica).



LAS DISTINTAS ESCALAS

[1] Son los objetos astrofísicos más densos que se conocen. La fuerza gravitatoria que crean a su alrededor es tan alta que ni siquiera la luz es capaz de escapar de su entorno y, por tanto, un observador lejano solo los vería como una región oscura a su alrededor; de ahí su nombre. Aunque la física de agujeros negros es hoy día un campo de investigación en continuo desarrollo, es muy poco lo que aún se sabe acerca de estos objetos. Solo la Teoría de la Relatividad General de Einstein ha podido explicar las condiciones físicas en el entorno de los agujeros negros, aunque aún se desconoce por completo el estado y las condiciones de la materia que los forma.

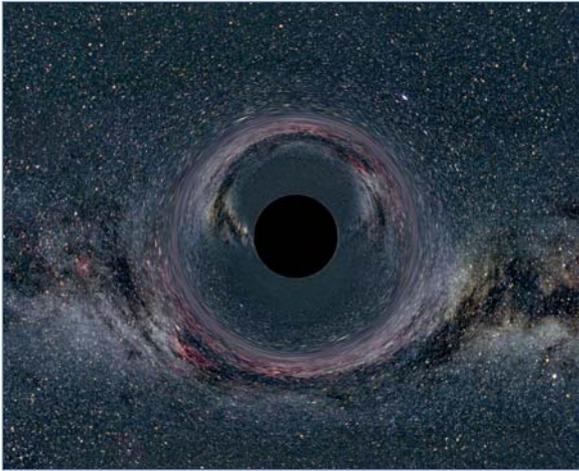


Imagen conceptual de un agujero negro de diez masas solares visto desde una distancia de 600 kilómetros con la Vía Láctea de fondo.

[2] Se habla de galaxia activa cuando una gran parte de su emisión no se debe a estrellas, polvo y gas, como en otros tipos de galaxias "más normales". Además, las galaxias activas pueden variar su brillo abruptamente en escalas temporales de entre días y años, a diferencia de otros tipos de galaxias.

[3] Acrecimiento es un concepto que se refiere al crecimiento de un cuerpo por agregación de otros menores. En astrofísica, este término se suele utilizar frecuentemente unido al de disco de acrecimiento. Se trata de una estructura de materia en forma de disco que gira alrededor de un objeto central masivo (e.g. un agujero negro o una estrella formada o en formación). La mayor parte del material del disco de acrecimiento cae (es acretado) hacia el objeto central, lo que contribuye al aumento de masa del último. Otra pequeña parte pasa a formar los *jets* o chorros que se propagan desde las regiones más internas del disco de acrecimiento.

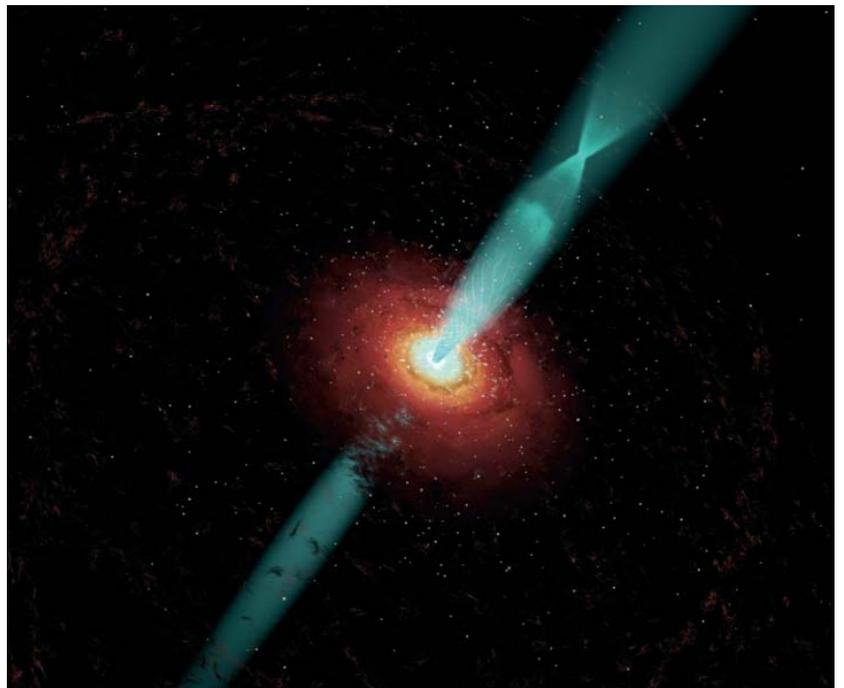
Representación conceptual de un disco de acrecimiento orbitando en torno a un objeto compacto, que favorece la formación de un par de chorros (*jets*) de materia que viaja en sentidos opuestos. Imagen cortesía de Wolfgang Steffen, Cosmovisión y UNAM, México.

En las últimas décadas se han ido obteniendo evidencias cada vez más claras de la existencia de agujeros negros [1] de muy distinta masa. Estos parecen ser los responsables de las enormes cantidades de energía emitida por las galaxias activas [2], generada a través del acrecimiento [3] del material de la galaxia en torno a agujeros negros supermasivos (ANSM), miles de millones de veces más masivos que el Sol. Recientes observaciones han mostrado que no solo las galaxias activas parecen contener un ANSM en su interior, sino que estos pueden estar presentes en todas las galaxias, incluida la nuestra. La presencia de un ANSM en el centro de la galaxia da lugar a la formación de enormes discos de gas y polvo girando a su alrededor. Parte del material de las zonas más internas del disco atraviesa el horizonte de sucesos [4] y desaparece atrapado por el agujero negro. Pero no todo el material del disco acaba alimentando al agujero negro. La rotación diferencial [5] del disco da lugar a la formación de un campo magnético helicoidal [6], que

extrae material del disco y lo expulsa siguiendo las líneas del campo magnético. La presión que ejerce el campo magnético al apretarse contra sí mismo confina y acelera este material en un par de *jets* (chorros) que transportan materia y energía en sentidos opuestos a lo largo del eje de rotación del agujero negro [7]. Estos *jets* son muy comunes en la naturaleza, y se hallan no solo en las galaxias activas, sino también en estrellas en formación o en sus últimas etapas de vida e incluso en sistemas dobles de estrellas (e.g., púlsares, estrellas variables cataclísmicas, estrellas binarias de rayos X, o explosiones de rayos gamma). Todos estos sistemas involucran el acrecimiento de materia en torno a un objeto masivo central, y comparten otra característica: la velocidad del material que forma los *jets* es cercana a la velocidad de escape [8] del sistema. De esta manera los *jets* relativistas, es decir, aquellos que contienen material viajando a velocidades cercanas a la de luz, se originan en sistemas cuyo objeto central es un agujero negro, como en el

[4] Según la Teoría de Relatividad General, el horizonte de sucesos de un agujero negro es una superficie imaginaria de forma esférica que rodea al agujero negro, en la que la velocidad necesaria para alejarse del mismo sería igual la velocidad de la luz. Por ello, nada, incluyendo la luz,

puede escapar de dentro de esta superficie. La materia del exterior que cae dentro de esta región nunca vuelve a salir, ya que para hacerlo necesitaría tener una velocidad superior a la de la luz y, hasta el momento, la teoría indica que nada excepto la luz puede alcanzarla.



DE UN AGUJERO NEGRO

caso de las galaxias activas (ver imagen inferior izda).

A mediados de los años 90 se descubrió que un potente emisor de rayos X situado en nuestra propia galaxia, denominado GRS1915+105, presenta un par de *jets* relativistas. Los estudios posteriores confirmaron que esta fuente contiene probablemente un agujero negro central con una masa de entre 10 y 14 masas solares. Este sistema, formado por un agujero negro de masa estelar, un disco de acrecimiento y *jets* relativistas, parece ser una versión en miniatura de los conocidos cuásares emisores en radio [9], tanto por sus dimensiones físicas como por las escalas temporales de variabilidad de su emisión. Por ello a este tipo de objetos se les pasó a denominar microcuásares.

Si el proceso de acrecimiento al agujero negro parece establecer la similitud entre los microcuásares y cuásares, ¿es posible que las distintas escalas observadas en estos objetos venga dada por la razón de las masas de sus agujeros negros, unos de masa estelar y otros con masa cientos o

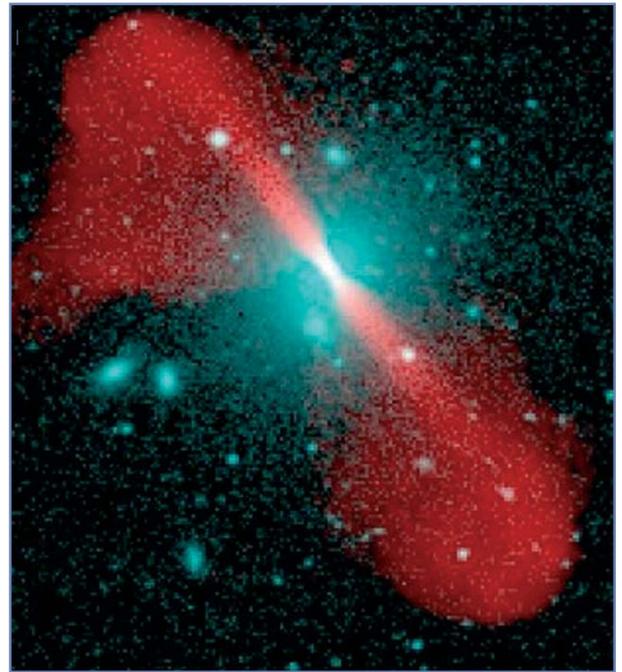
miles de millones de veces mayores?

Observaciones de la galaxia activa 3C120, que contiene un agujero negro central de entre 16 y 50 millones de masas solares, revelaron que la razón de escala espacial entre sus jets y los de GRS1915+105 es del orden de 7×10^4 , mientras que la razón de escala de variabilidad en la emisión es de unos 5×10^5 . Estos valores son del orden de la razón entre las masas de los agujeros negros de ambos sistemas, dentro del margen de error de las medidas.

Los microcuásares permiten por tanto observar, en escalas de minutos, los procesos de acrecimiento en torno a agujeros negros y de formación de los *jets* relativistas que requeriría años de observación en cuásares, y abren de esta manera una nueva forma de poder estudiar los procesos que tienen lugar en la vecindad de los agujeros negros de muy distinta masa.

JOSÉ LUIS GÓMEZ (IAA)
deconstrucción: IVÁN AGUDO (IAA)

[9] Cuásar es la contracción de *quasi stellar object*, del inglés "objeto casi estelar", que es como se los denominó cuando fueron descubiertos debido a su parecido con las estrellas cuando son observadas con telescopios pequeños. Sin embargo, hoy día, los grandes y potentes telescopios de que disponemos nos han hecho entender que son objetos radicalmente diferentes. Los cuásares son uno de los tipos más abundantes y comunes de galaxias activas. De entre ellos, los cuásares emisores en radio son un subtipo particular de cuásar que muestra potentes *jets* relativistas observados en longitudes de onda radio (ver imagen inferior).



Superposición de las imágenes en radio frecuencias (rojo, mostrando la emisión de los jets) y en el visible (azul, mostrando la emisión de estrellas, polvo y gas) de la galaxia activa NGC 5532. Imagen cortesía de NRAO/AUI).

[5] Se habla de rotación diferencial cuando el movimiento orbital de un objeto en torno a su eje de rotación no tiene la misma velocidad en todas sus partes. Este tipo de movimiento es característico de cuerpos no sólidos. En el caso de los discos de acrecimiento, la rotación diferencial hace que el giro de las zonas más internas del disco (más cercanas al objeto compacto central) sea más rápida que en las zonas más externas. También se puede producir rotación diferencial en las distintas alturas sobre el plano del disco.

[6] El campo magnético helicoidal, o la distribución de líneas de campo magnético en forma de hélice, se forma en discos de acrecimiento en rotación gracias a que las líneas de dicho campo están "ancladas" al material en el disco. Al producirse la rotación del disco, a la vez que el material cae hacia el objeto compacto central, las líneas de campo magnético se retuercen en forma de hélice.



Time = 8.0

Representación de un instante temporal de una simulación por ordenador de la formación de un campo magnético helicoidal, en rojo. El toroide, rosco de color amarillo, representa una idealización de un disco de acrecimiento en rotación diferencial, mientras que los jets formados a partir del material del disco están representados en verde. Imagen cortesía de Masanori Nakamura, Laboratorio Nacional de Los Alamos, EEUU).

[7] El concepto de agujero negro en rotación, o agujero negro de Kerr (en honor al creador de la idea), nació como idealización matemática de un agujero negro con las propiedades intrínsecas de un cuerpo material en movimiento de giro, con velocidad, eje y sentido de giro. Hoy día cada vez existen más evidencias, que no pruebas, a favor de la existencia de este tipo de agujeros negros.

[8] Velocidad de escape es la que se necesita para vencer la fuerza de atracción de un cuerpo de manera que deje de producirse dicha atracción. En el caso del proceso de formación de jets, la velocidad de escape del material es la mínima necesaria para vencer la atracción gravitatoria del objeto compacto central.

GLAST: nueva revolución de altas energías

La NASA acaba de poner en órbita su nuevo satélite astronómico de rayos gamma

► Los rayos gamma son la radiación electromagnética de más alta energía conocida, por encima de la energía de rayos X, y se produce en algunos de los fenómenos astrofísicos más violentos y energéticos. Afortunadamente, la atmósfera terrestre nos protege de los rayos gamma provenientes del exterior, lo que también supone un importante inconveniente para el estudio de los astros en este rango del espectro.

Precisamente, la interacción de la radiación gamma con la atmósfera es utilizada para detectar algunas de las fuentes de esta radiación de más alta energía a través de telescopios Cherenkov. Sin embargo, para los rayos gamma de menor energía hoy día solo es posible hacer observaciones astronómicas con satélites en órbita fuera de la atmósfera terrestre.

Evolución desde 1972

La astronomía de rayos gamma, con poco más de tres décadas de vida, es una de las ramas más jóvenes de la astronomía. Desde que se puso en órbita en 1972 el primer satélite astronómico específicamente dedicado a la exploración del cielo en rayos gamma (SAS-2), han sido muchos los avances tecnológicos y científicos que se han producido en este rango. Fue el *Compton Gamma-Ray Observatory* (CGRO), el segundo de los "Grandes Observatorios" espaciales de la NASA, lanzado en 1991, el que propició una auténtica revolución en el conocimiento del Universo de rayos gamma gracias a su gran sensibilidad, resolución angular y cubrimiento en energías, sin precedentes hasta la fecha. En concreto, los instrumentos a bordo



del CGRO produjeron un mapa en rayos gamma del cielo completo, mostraron el origen externo a nuestra Vía Láctea de las enigmáticas y potentes explosiones de rayos gamma (*gamma ray bursts*, o GRBs), convencieron del origen de los GRBs como resultado de explosiones relativistas y altamente colimadas y propiciaron el descubrimiento de las primeras decenas de blázares (quásares emisores de rayos gamma).

Hoy día, NASA espera que GLAST (*Gamma-ray Large Area Space Telescope*), su nuevo satélite astronómico, lanzado con éxito el pasado 11 de junio desde Cabo Cañaveral, suponga un nuevo salto importante en el conocimiento del universo de rayos gamma. La

tecnología desarrollada para GLAST debería hacer de este observatorio espacial una auténtica revolución con respecto a sus antecesores. En concreto, se espera que las capacidades del instrumento principal de GLAST en cuanto a su campo de visión, resolución angular, sensibilidad y rango de energías de observación sean más de diez veces superiores a las de su homólogo en CGRO. Esto permitirá a GLAST realizar, en cuestión de días, observaciones que a CGRO le costaron años o no pudo realizar. Obviamente, con estas capacidades, los objetivos astronómicos de GLAST son ambiciosos. Entre ellos se encuentran: la detección e identificación de nuevos miles de

blázares y el seguimiento temporal de sus variaciones en rayos gamma con resolución temporal de menos de un día, la comprobación de la existencia o no de un fondo cósmico de rayos gamma, la caracterización del fondo extragaláctico de emisión en luz visible y ultravioleta, el estudio de miles de GRBs en rangos de energía poco explorados, el descubrimiento y seguimiento de cientos de púlsares de rayos gamma y la detección de emisión difusa de rayos gamma en galaxias externas.

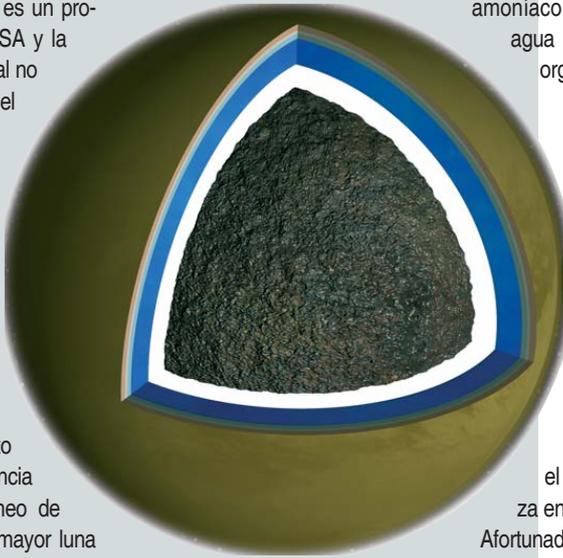
Se espera que, dos meses después de su lanzamiento y tras la fase de comprobación y puesta a punto, GLAST empiece a proporcionar resultados astronómicos. Incluso en el caso de que se consiguiese uno solo de los objetivos astronómicos de GLAST, esto implicaría el éxito científico de la misión. Por el momento, cientos de astrónomos en todo el mundo ya están desarrollando programas observacionales de apoyo a GLAST con instrumentos en tierra en todos los rangos del espectro electromagnético, desde las bandas de radio hasta rayos gamma observables por el efecto Cherenkov. Muchos de ellos cruzan los dedos para que nada falle en GLAST antes de tiempo.

Iván Agudo (IAA)

Más información: <http://glast.gsfc.nasa.gov/>

Un océano de agua y amoníaco bajo la corteza de Titán

► La misión Cassini es un proyecto conjunto de la NASA y la ESA. Esta misión espacial no tripulada se lanzó con el objetivo de estudiar el planeta Saturno y sus satélites. El lanzamiento tuvo lugar el 15 de octubre de 1997, y entró en la órbita de Saturno el 1 de julio de 2004. La nave Cassini, que continúa orbitando en torno a Saturno, ha descubierto evidencias de la existencia de un océano subterráneo de agua y amoníaco en la mayor luna de Saturno: Titán. Este descubrimiento ha sido posible gracias al Radar de apertura sintética de Cassini, que recogió datos durante diecinueve pasos sobre Titán entre octubre de 2005 y mayo de 2007. Este instrumento permite ver a través de la atmósfera de Titán, que es muy densa y rica en metano. Usando estos datos de radar los científicos establecieron la localización de cincuenta puntos de referencia en la superficie de Titán: lagos, cañones y montañas. Luego buscaron estas referencias en el conjunto de datos que devolvió la nave Cassini en su último vuelo sobre la luna. Encontraron, sorprendente-



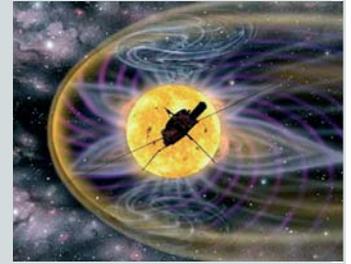
mente, que algunas características destacadas de la superficie de la luna estaban desplazadas de su posición esperada ¡¡hasta treinta kilómetros!! Un desplazamiento sistemático de estas zonas elegidas como referencias superficiales es muy difícil de explicar a no ser que la corteza helada de Titán se encuentre desacoplada o separada de su núcleo por un océano interno, lo que permite que se desplace fácilmente. Los investigadores creen que cien kilómetros por debajo de la corteza helada y orgánicamente rica de Titán puede haber un océano interno de agua líquida mezclada con

amoníaco. Esta combinación de agua líquida con un entorno orgánicamente rico es muy interesante para los astrobiólogos. Los estudios adicionales de la rotación de Titán permitirán entender mejor este interior acuoso y la relación entre el giro de la corteza y los vientos de la atmósfera. Quizá hasta puedan detectarse cambios estacionales en el movimiento de esta corteza en los próximos años.

Afortunadamente, los científicos de la Cassini tienen ya nuevos datos de Titán porque el pasado 25 de marzo, justo antes de su máxima aproximación a una altitud de mil kilómetros sobre el satélite, Cassini usó su espectrómetro para examinar la atmósfera superior de la luna. Inmediatamente después de su mayor aproximación, el espectrómetro visual e infrarrojo capturó imágenes de alta resolución del cuadrante sur de Titán. Seguro que el análisis de estos datos nos depara muchas y nuevas sorpresas. Este descubrimiento aparece en la edición de la revista *Science* del 21 de marzo.

Pablo Santos (IAA)

EN BREVE



El fin de *Ulysses*

► Tras más de diecisiete años explorando los efectos de la actividad solar en el entorno, la misión *Ulysses*, desarrollada conjuntamente por ESA y NASA, aguarda su fin. Lanzada en 1990 con una esperanza de vida de unos cinco años, la misión ha superado todas las expectativas y ha estudiado en profundidad las regiones polares del Sol, así como la heliosfera, o la región donde influye su actividad.



A vueltas con Plutón

► La Unión Astronómica Internacional, que en 2006 relegó a Plutón a la categoría de "planeta enano", obliga de nuevo a reescribir los libros de texto. Ahora Plutón, al igual que Eris (el objeto transneptuniano cuyo descubrimiento generó la polémica -en la imagen superior), son plutoides, es decir, "objetos celestes en órbita en torno al Sol a una distancia mayor que la de Neptuno, con forma esférica y que no han limpiado su órbita de cuerpos más pequeños".

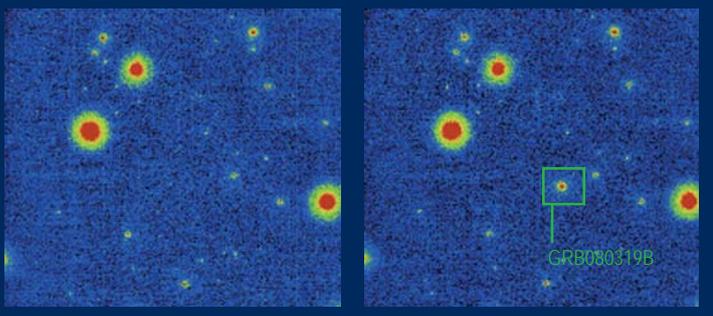
El Universo despide a Arthur C. Clarke

Nada menos que cuatro explosiones de rayos gamma coincidieron la noche siguiente a la muerte del escritor

► El pasado martes 18 de marzo falleció, en su casa de Colombo (Sri Lanka), el escritor británico Arthur C. Clarke. El Universo decidió despedirle con honores ya que, al día siguiente, ocurrió algo

bastante improbable: la explosión de, nada más y nada menos, ¡cuatro explosiones de GRB!, cuando lo habitual es que el satélite de rayos gamma *Swift* detecte dos explosiones por semana.

Además de este hecho sorprendente, una de estas explosiones de rayos gamma, concretamente la bautizada como GRB080319B, pasó durante unos instantes por ser el objeto visible a ojo desnudo



más lejano que hombre o mujer haya podido observar jamás. Se cree que un tipo de estas potentes explosiones, los GRBs largos, provienen de la explosión de estrellas muy masivas cuando, al agotar su combustible, el núcleo se hunde bajo su propio peso y da lugar a una estrella de neutrones o a un agujero negro.

Se trata de uno de los fenómenos más energéticos del Universo (excluyendo el Big Bang).

Tras la detección del frente de rayos gamma de GRB080319B, el propio satélite *Swift*, así como varios telescopios situados en Tierra, detectó una intensa luminosidad en el óptico procedente del mismo objeto que pasó a ser

visible en el cielo, incluso a simple vista, con una magnitud entre cinco y seis para luego decaer rápidamente. Este fenómeno de luminosidad, también conocido como *afterglow*, suele detectarse en algunos casos tras la explosión inicial de rayos gamma y su origen está aún en debate.

Las observaciones combinadas y su análisis (ver artículo siguiente), hacen de este GRB el objeto intrínsecamente más brillante y lejano que el hombre ha podido observar a simple vista.

Sin duda un auténtico homenaje cósmico para Arthur C. Clarke, escritor de más de cien libros de ciencia y ciencia ficción y un visionario de muchos de los avances científicos y tecnológicos que disfrutamos en la actualidad. Entre sus novelas más conocidas des-

taca *2001: Una Odisea del espacio*, llevada al cine por Stanley Kubrick, o *Cita con Rama*.

Durante la II Guerra Mundial trabajó para la fuerza aérea en el desarrollo de un nuevo tipo de radar. Tras la guerra propuso la idea de usar satélites geoestacionarios para comunicaciones sin cables. Las órbitas geosíncronas se llaman en su honor: órbitas Clarke.

En los años 40 del siglo XX desarrolló en sus novelas la tecnología necesaria para un viaje a la Luna, casi tres décadas antes de alcanzar nuestro satélite. Sus ideas sirvieron de inspiración para las misiones reales que pusieron al primer hombre sobre la superficie lunar.

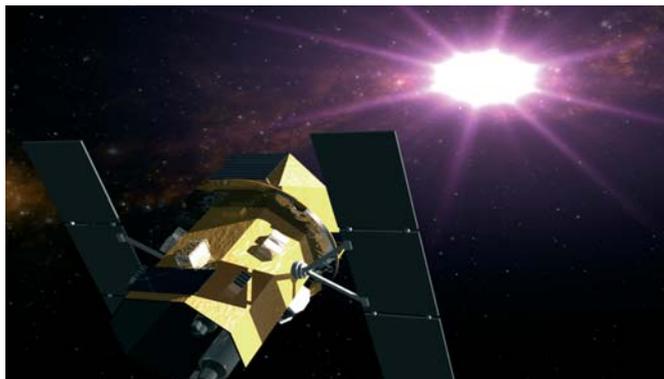
Emilio J. García (IAA).

No es fácil hallar en la naturaleza un evento con el brillo óptico de GRB080319B, posiblemente la explosión estelar más violenta detectada en el Universo

La muerte de una estrella a 6.000 Mpc detectable a simple vista

► Los *gamma ray bursts* (GRBs) de larga duración, como GRB080319B, son breves e intensos pulsos de radiación gamma de origen extragaláctico que se localizan mediante satélites. Uno de estos satélites es el llamado *Swift*, capaz de detectar dichos estallidos y de enviar en pocos segundos su posición a telescopios ópticos, infrarrojos y de radio terrestres.

Estos telescopios estudian el llamado *afterglow* o resplandor que sigue al GRB y, entre otra serie de medidas, determinan su distancia. Mediante observaciones en tierra de los *afterglows* se ha podido establecer que los GRBs se originan por la muerte violenta de estrellas masivas que ocurren en galaxias lejanas (con un corrimiento al rojo medio de 2,7, equivalente a distancias de ~22.000 millones de parsecs (Mpc)). GRB080319B fue localizado en la



constelación de BOOTES por el satélite *Swift* a las 6:12:49 UT del 3 de marzo. Las medidas espectroscópicas determinaron un corrimiento al rojo de $z=0.937$, lo que supone una distancia de luminosidad aproximada de 6.000 Mpc.

GRB080319B muestra la mayor cantidad y calidad de datos jamás recogidos para un GRB. Los primeros datos ópticos son simultá-

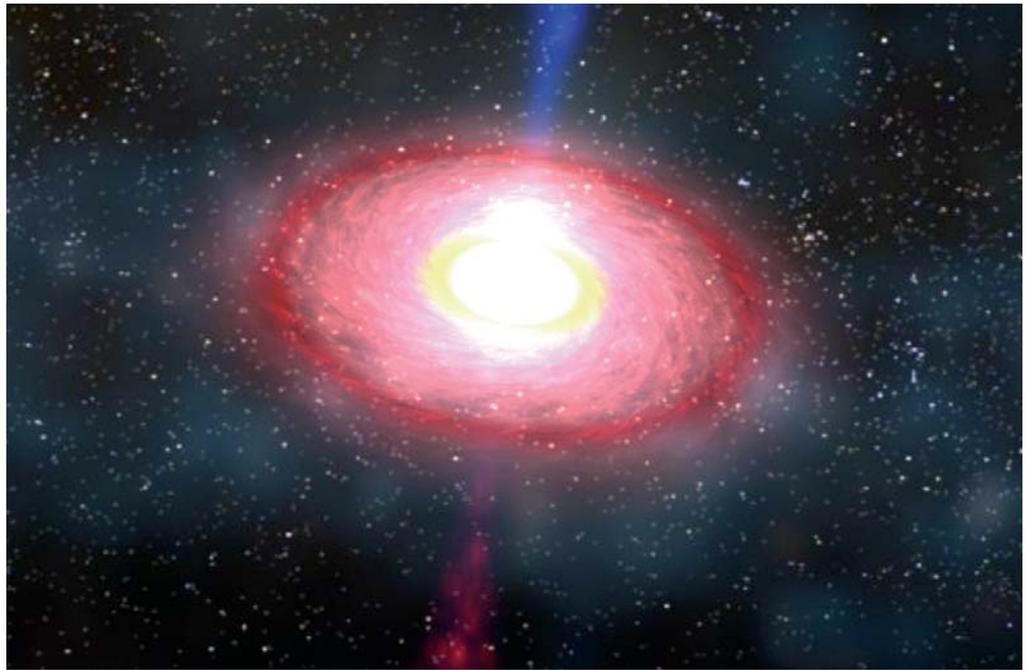
neos a la explosión en rayos gamma y muestran, por primera vez y con gran resolución temporal la emisión del llamado *flash* óptico. Dicho *flash* alcanzó una magnitud en el filtro V de 5,3 (cuando nos quedamos con un solo color, en este caso un color específico entre el amarillo y el verde), por lo que brevemente pudo apreciarse a simple vista por un observador con

cielo oscuro. Sin duda unos simples prismáticos habrían sido más que suficientes para ver este estallido estelar ocurrido cuando el Universo tenía aproximadamente la mitad de la edad actual. El récord anterior se remonta al año 1999, cuando el *flash* óptico de GRB990123 fue detectado con una magnitud de $V \sim 8.9$.

La obtención de datos ópticos de GRB080319B simultáneos a los rayos gamma se debe a una pura casualidad. Aproximadamente treinta minutos antes de que estallara el GRB080319B, se había detectado otro GRB (GRB080319A), fortuitamente separado en el cielo tan solo por diez grados de la posición de GRB080319B. Este hecho hizo que tanto *Swift* como algunos telescopios terrestres de gran campo, que ya estaban observando GRB080319A, observaran la

región de GRB080319B incluso antes de que estallara. La temprana detección óptica permitió un seguimiento sin precedentes desde los primeros segundos hasta meses después del GRB. Una gran colaboración internacional en la que participan más de doce países y en las que se han compilado datos multifrecuencia de más de quince telescopios (VLT, Gemini, VLA, HST, Spitzer, WSRT, HET, entre otros) ha modelado la evolución del GRB mediante un novedoso modelo de *jet* doble (ver más detalles en <http://xxx.lanl.gov/pdf/0805.1557>, recientemente enviado a la revista *Nature*).

El *afterglow* fue tan brillante que un telescopio infrarrojo de tamaño medio (un metro) podría haberlo detectado incluso con un corrimiento al rojo de ~17. De hecho, el brillo óptico de GRB080319B fue 2,5 millones de veces superior al de la supernova más brillante detectada



Concepción artística de una explosión de GRB. Fuente: NASA.

hasta la fecha, SN2005ap. El exitoso lanzamiento el pasado día 11 de junio del nuevo satélite de altas

energías GLAST promete nuevos descubrimientos en el campo de los GRBs y, quizás, la detección

de nuevos "monstruos" explosivos como GRB080319B.

Javier Gorosabel (IAA)

ENTRE BASTIDORES

AUTORÍAS

RAFAEL GARRIDO (IAA-CSIC)

Las contribuciones científicas van siendo cada vez más colaborativas e incrementales, y menos individuales y discontinuas. Surge pues la pregunta de cuál es la contribución de cada autor, si hay autores que no han contribuido o incluso que no aparecen entre los firmantes de un artículo. Y todo esto en el supuesto caso en que el trabajo haya dado lugar a un incremento del conocimiento sobre el tema: todos sabemos que en el avance científico está permitido el "plagio", siempre y cuando se cite la fuente adecuadamente. Estas consideraciones son de extrema importancia para los profesionales de la investigación, pues nuestro rendimiento laboral se basa en reconocer nuestras autorías.

Un ejemplo: el primer planeta descubierto girando alrededor de una estrella distinta del Sol no fue precisamente el que hoy todo el mundo reconoce como el descubierto por el Dr. Mayor, llamándose desde entonces a estos objetos planetas extrasolares. D. A. Wolszczan y D. Frail ya anunciaron, en 1992 (*Nature* 355: 145-147), que alrededor de un púlsar giraba un objeto (en realidad son varios) de masa similar a la de la Tierra. Mucho más desconocido aún es el hecho de que Rubens y Kurlbaum, dos químicos que

midieron, con una precisión nunca alcanzada, la intensidad luminosa en un lugar cerrado, presentaron al Dr. Planck sus medidas para que este ajustara una fórmula que empezó siendo empírica y que ahora es la base de la mecánica cuántica. No puedo olvidar las numerosas contribuciones teóricas llevadas a cabo por autores rusos en revistas rusas escritos en ruso, y que finalmente son redescubiertas en Occidente.

Ya desde el comienzo de la carrera investigadora, la conexión doctorando-director de tesis ha originado agrias disputas entre los jóvenes y no tan jóvenes. Otro ejemplo: la historia de Jocelyn Bell, descubridora de los púlsares, y su director, Antony Hewish, quien obtendría el premio Nobel, -ex aequo con Sir Martin Ryle- por "su investigación pionera en radioastronomía: Ryle por sus observaciones e inventos, en particular sobre la técnica de apertura de síntesis, y Hewish por su papel decisivo en el descubrimiento de los púlsares", literalmente. El trabajo de Jocelyn no fue premiado de igual manera.

El futuro que se prevé tampoco es muy halagüeño para aquel que crea poder dilucidar con certeza cuál ha sido la contribución concreta de cada uno de los nombres que apa-

recen en una lista de coautores. La e-Ciencia, que ya está poniendo recursos compartidos en la red, junto con archivos de datos inéditos y herramientas para su explotación, difuminará aún más esa frontera ya difusa entre el autor de un trabajo y la relación con su propia contribución. No obstante, los norteamericanos, que todo lo controlan, hace tiempo que han creado un instituto que marca la forma en la que debe evaluarse la producción científica de individuos, centros y sistemas ligados a la I+D en general. Este instituto, el ISI, incluso sugiere el uso de fórmulas cuantitativas mediante las cuales se puede evaluar el CV de un investigador. La última moda es hacerlo con un solo dígito, el parámetro $H^{(1)}$.

¡Qué tiempos aquellos en que en la sola firma de un manuscrito se reconocía al autor! Hasta el mismísimo Don Miguel, en un alarde de honestidad, reconocía en Cide Hamete Benengeli al autor de la penosa historia de Alonso Quijano. Vale.

PD: Yo incluso dudaría de la completa autoría de este artículo.

(1) Número de artículos publicados por un autor que han sido citados, como mínimo, otras tantas veces.

Instrumentos de futuro para Calar Alto

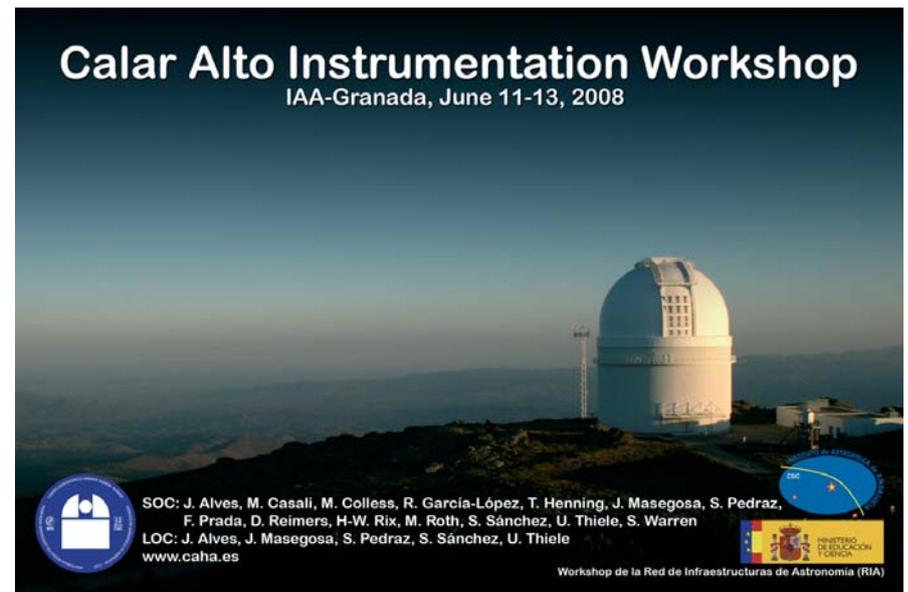
Astrónomos e ingenieros de varios países presentaron y discutieron ideas sobre la nueva generación de instrumentos para el telescopio de 3,5 metros de Calar Alto

Organizada por la Red de Infraestructuras de Astronomía, la reunión tuvo lugar en el Instituto de Astrofísica de Andalucía los días 11, 12 y 13 de junio

El Observatorio de Calar Alto, codirigido por el CSIC, a través del Instituto de Astrofísica de Andalucía, y la Sociedad Max Planck de Alemania, a través de su Instituto de Astronomía, es el complejo astronómico más importante de la Europa continental con sus tres telescopios de 3,5, 2,2 y 1,23 metros de apertura. Dada la importancia que los telescopios de cuatro metros están adquiriendo en la investigación astronómica, la elección de los nuevos instrumentos para el telescopio de 3,5 metros de Calar Alto constituye un paso de gran relevancia para afrontar los desafíos científicos actuales en varios campos de la Astrofísica, desde la búsqueda de planetas extrasolares hasta la cosmología. Así, tras esta reunión, en la que se presentaron y debatieron las ideas más innovadoras, tendrá lugar una convocatoria abierta a toda la comunidad para la propuesta de instrumentos, que el Comité Científico Asesor fallará en breve con una selección de las mejores propuestas.

Ciencia en Calar Alto

El Observatorio de Calar Alto se halla en la Sierra de Los Filabres (Almería), y ofrece unas excelentes condiciones de



observación en el óptico y el infrarrojo tanto a astrónomos españoles y alemanes como al resto de la comunidad internacional.

Entre los trabajos de investigación que desarrollan los científicos en Calar Alto se encuentran el estudio de la estructura de la Vía Láctea y la formación de estrellas a partir de la materia interestelar; la investi-

gación de sistemas extragalácticos, como galaxias o cúasares; el análisis de la estructura y el desarrollo de los objetos estelares; así como el estudio de la historia del Universo en su conjunto.

El observatorio de Calar Alto mantiene además importantes colaboraciones con otros observatorios internacionales y con proyectos espaciales.

I Reunión Ibérica de Sismología Estelar y Planetaria

Un total de 18 investigadores de centros españoles y portugueses se dieron cita en esta primera reunión, lo que supone una importante representación de la Comunidad Ibérica de Sismología Estelar

Esta reunión, organizada por el grupo de Variabilidad Estelar del IAA, buscaba reunir a todas aquellas personas de España y Portugal que trabajan actualmente en sismología estelar y planetaria, así como en temas afines. Con ello se pretendía sentar las bases para establecer una Comunidad Ibérica (CI), en la que se favoreciese la organización y coordinación para abordar cualquier tipo de reto científico en dichas áreas. Una CI con la que se pudie-



ran identificar los posibles problemas comunes, así como las sinergias entre los distintos subgrupos, y que fomentara nuevas colaboraciones y arraigara las existentes.

Tanto este como el segundo objetivo fundamental, la discusión científica y la puesta en común de técnicas y herramientas utilizadas por los distintos grupos, fueron cumplidos con creces.

Desarrollo de la reunión

El formato de esta I Reunión fue dinámico e informal. Los participantes, divididos en tres grupos de trabajo y con un coordinador por grupo, trabajaron con formato libre sobre los temas planteados inicialmente aunque susceptibles a cambios.

El grupo de **Técnicas de observación** estuvo dedicado principalmente al uso del Observatorio Virtual para la búsqueda de objetos nuevos y para la determinación de parámetros físicos, ambos aspectos necesarios hoy en día para hacer astrosismología de gran cantidad de datos provenientes de misiones espaciales como CoRoT, Kepler o PLATO. También trabajó en la normalización de espectros Echelle, y en la identificación de modos con LPV.

El grupo de **Tratamiento y análisis de los datos** trabajó intensamente en los últimos análisis de las curvas de luz fotométricas provenientes de los datos del satélite CoRoT. Se



abordaron principalmente los problemas del análisis de las curvas de estrellas tipo *solar-like* y Be.

Por su parte, el grupo **Interpretación de los datos** dedicó sus esfuerzos principalmente a trabajar en los ejercicios del ESTA/CoRoT, en particular en la *Task 2*, que concierne la comparación de códigos de oscilación. Con el coordinador general del ESTA/CoRoT, Mario Monteiro, se analizó y discutió la planificación de este segundo ejercicio. Además, el grupo discutió sobre el modela-

do de estrellas en pre-secuencia principal (PMS) y el estudio de su nacimiento usando la astrosismología. En particular se discutieron posibles estrategias observacionales para poder verificar los procesos de nacimiento y, además, se discutió la posibilidad de fabricar modelos incluyendo rotación.

Los científicos asistentes acordaron dar continuidad a este tipo de reuniones, y ya se prevé una segunda convocatoria en Portugal.

Juan Carlos Suárez (IAA)

DESARROLLO TECNOLÓGICO

IMaX: *Imaging Magnetograph eXperiment*

El *Imaging Magnetograph eXperiment*, IMaX, es un instrumento del proyecto SUNRISE, un globo estratosférico que volará desde el Ártico en una trayectoria circular entre Europa, América del Norte y Siberia. SUNRISE está liderado por el *Max Planck Institut für Aeronomie* (MPAe, Lindau, Alemania) y cuenta con la participación de centros de investigación alemanes, estadounidenses y de centros españoles a través del consorcio IMaX. En este consorcio participan el IAC (Tenerife, Coordinador), IAA (Granada), INTA (Madrid) y GACE-Univ. de Valencia (Valencia).

IMaX proporcionará magnetogramas vectoriales de la superficie solar con una resolución espacial de 70 km. Estas escalas espaciales son de una importancia clave en la física del magnetismo solar pues son comparables con magnitudes como el camino libre medio de los fotones o la altura de escala de presiones. Nunca antes se habían obtenido

magnetogramas con esta resolución espacial y por periodos de varios días con una calidad de imagen constante. Este tipo de datos son de fundamental importancia para entender los procesos de emergencia y desaparición de los campos magnéticos superficiales, cómo estos acoplan la superficie fotosférica con la corona solar a millones de grados y qué procesos MHD pueden estar relacionados con estas enormes temperaturas. Las condiciones del medio ambiente espacial están dominadas por las expulsiones de masa coronal caracterizadas en los últimos años por el satélite SOHO. El precursor fotosférico de estas expulsiones consiste en pequeños procesos de cancelación magnética que alcanzará IMaX para su estudio.

La participación del IAA en el proyecto consiste tanto en la vertiente científica, con un equipo formado por cuatro investigadores, como en la parte técnica, compuesta por nueve ingenieros. El aporte tecnológico se

divide en diseño y construcción de la electrónica del instrumento y en el de software de alto y bajo nivel necesarios para controlar IMaX.

IMaX utilizará para la modulación de las señales de polarización la tecnología de retardadores ópticos basados en cristal líquido (ROCLIs) que el IAC está desarrollando con la empresa TECDIS Display Ibérica de Valladolid. También posee un dispositivo Etalon para la sintonía dentro de la raya que requiere control muy estricto en alto voltaje y temperatura. Debido a que no se ha utilizado tecnología cualificada para Espacio, la electrónica irá albergada en sendas cajas presurizadas. Las cámaras son comerciales y fabricadas por DALSA. La adquisición y procesamiento de imágenes de un megapixel se realiza en tiempo real usando las últimas tecnologías con diseños mixtos, DSPs y FPGAs.

Antonio López (IAA)

RECOMENDADOS

WEB: AÑO INTERNACIONAL DE LA ASTRONOMÍA AIA-IYA



<http://www.iaa.es/IYA09>

¿Te atreves a medir el radio de la Tierra?

Uno de los **proyectos emblemáticos** del AIA-IYA2009 pretende implicar al mayor número posible de colegios de todo el territorio nacional en un mismo reto: repetir la experiencia de Eratóstenes y determinar conjuntamente el radio de la Tierra. Poco a poco informarán en detalle sobre el proyecto, pero ya podemos echar un vistazo a los primeros documentos.



proyectos pilares:

HORAS DE ASTRONOMÍA 1000

100 horas de astronomía en todo el planeta, incluyendo observaciones del cielo, *webcasts*, conexión de grandes observatorios alrededor del globo, etc.

Uno de los objetivos principales de este evento mundial reside en que el mayor número posible de personas descubra, a través de un telescopio, lo mismo que Galileo observó: las cuatro lunas galileanas alrededor de Júpiter.

Una idea posible, aunque difícil de llevar a cabo, consiste en conectar este evento mundial con una disminución controlada y segura de la iluminación de las ciudades en todo el planeta, que nos permita descubrir la majestuosidad de un cielo cada vez más escondido tras la contaminación lumínica.

El proyecto "100 horas de Astronomía" tendrá lugar desde el jueves, dos de abril, al domingo, cinco de abril de 2009. Esto incluye dos días lectivos, ideal para estudiantes y profesores y un fin de semana, más adecuado para toda la familia. Además, la Luna estará en cuarto creciente, ideal para su observación al comienzo de la noche durante todo el fin de semana.

AGENDA

REUNIONES Y CONGRESOS

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

19TH ESCAMPIG, *EUROPHYSICS CONFERENCE ON THE ATOMIC AND MOLECULAR PHYSICS OF IONIZED GASES*
GRANADA, 15-19 JULIO.

COSMOLOGY ACROSS CULTURES,
IMPACT OF THE STUDY OF THE UNIVERSE IN HUMAN THINKING.
GRANADA, 8-12 SEPTIEMBRE.

CHARLAS DIVULGATIVAS PARA COLEGIOS EN EL IAA

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

