

Einstein, una estrella... ¿binaria?

Cuásares y chorros relativistas

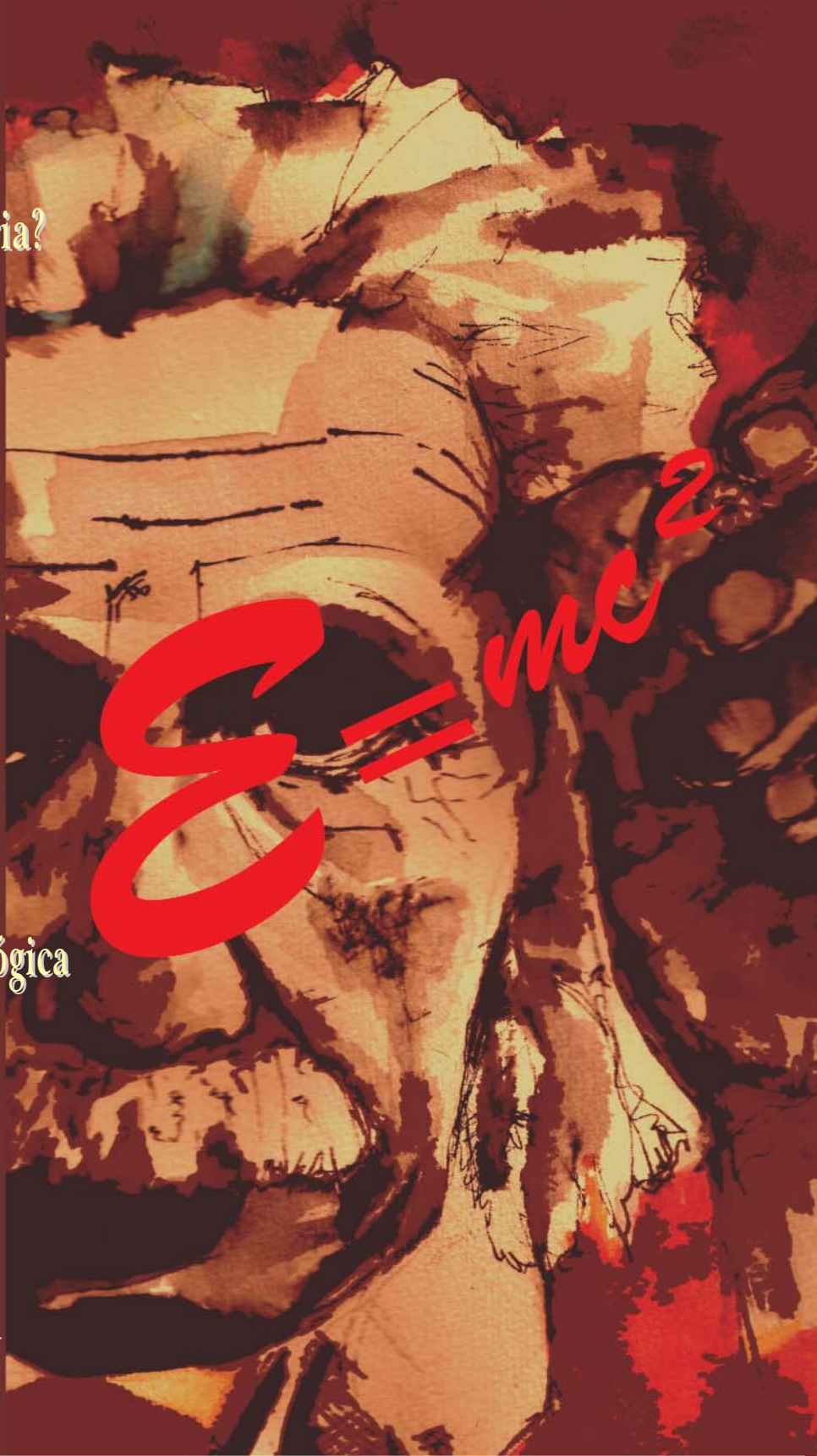
Lentes gravitatorias

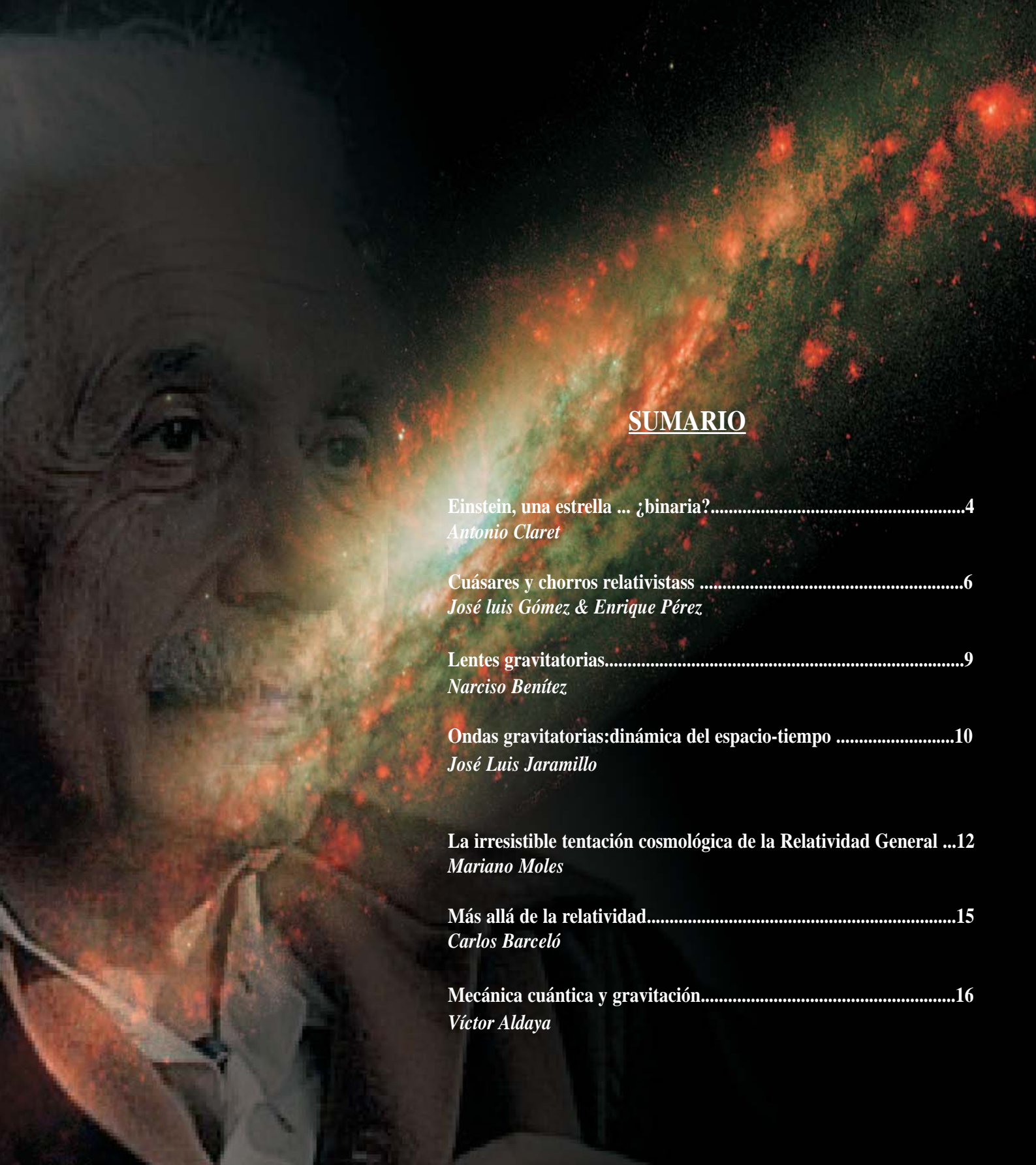
Ondas gravitatorias:
dinámica del espacio-tiempo

La irresistible tentación cosmológica
de la Relatividad General

Más allá de la relatividad

Mecánica cuántica y gravitación





SUMARIO

Einstein, una estrella ... ¿binaria?.....	4
<i>Antonio Claret</i>	
Cuásares y chorros relativistass	6
<i>José Luis Gómez & Enrique Pérez</i>	
Lentes gravitatorias.....	9
<i>Narciso Benítez</i>	
Ondas gravitatorias:dinámica del espacio-tiempo	10
<i>José Luis Jaramillo</i>	
La irresistible tentación cosmológica de la Relatividad General ...	12
<i>Mariano Moles</i>	
Más allá de la relatividad.....	15
<i>Carlos Barceló</i>	
Mecánica cuántica y gravitación.....	16
<i>Víctor Aldaya</i>	

Dirección: José M. Vílchez . Coordinación de Secciones: Antonio Alberdi, Emilio J. Alfaro, José María Castro, Luis Miranda, Olga Muñoz, Miguel Angel Pérez-Torres, Jose Carlos del Toro Iniesta, José M. Vílchez. Edición: Francisco Rendón Martos, Silbia López de Lacalle, Diseño y Maquetación: Francisco Rendón Martos. Imprime: EUROPRINT S.L.

Esta revista se publica con la ayuda de la Acción Especial DIF 2003-10261-E del Programa Nacional de Difusión de la Ciencia y la Tecnología, del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

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

UN GRAN AÑO PARA LA FÍSICA

Presentamos este número especial dedicado a conmemorar la figura y la obra de Albert Einstein. 2005 es el año internacional de la Física: se cumple un siglo de la presentación de la teoría de la Relatividad especial, casi cincuenta años después de la muerte de Einstein. Aunque se tiende a relacionar el nombre de Einstein solo con la teoría de la Relatividad, su contribución a la Física es muy amplia; además de las teorías restringida y general de la Relatividad, sus aportaciones a la teoría cuántica, el efecto fotoeléctrico, la teoría cinética de la materia o al problema de la unificación de los campos, entre otras, son fundamentales para entender el desarrollo de la Física moderna.

Resulta especialmente gratificante descubrir el pensamiento de Einstein sobre muchos aspectos esenciales de la vida y de la ciencia: desde la belleza de la geometría, su pasión por los conceptos de espacio o masa, hasta la misma esencia del "conocer" o su respecto por la libertad y por la paz. "Permítanme hacerles una confesión: -decía en 1950 en su mensaje a la Sociedad Italiana para el Progreso de la Ciencia- para mí, la lucha por saber más es uno de aquellos objetivos independientes sin los cuales un individuo pensante encontraría imposible tener una actitud consciente y positiva frente a la vida...". Un mensaje de tremenda actualidad: luchar por saber más, básicamente investigar, ese es el objetivo.

Fue su época dos pedazos de siglo muy difíciles pero apasionantes: Einstein fue contemporáneo de Bohr, pero también de Picasso, Rilke o Teilhard de Chardin; compartieron una generación marcada por las dos grandes guerras, el terrible holocausto y la bomba nuclear. Fue una época de guerras para un espíritu de paz. Queda patente ese clima pre-bélico leyendo entre líneas a Einstein cuando, en 1919, describía cómo en Inglaterra se le presentaba como "judío suizo", en tanto que para Alemania era un "sabio alemán". Él bromeaba: "si el destino me hubiera llevado a ser definido como una 'bestia negra', me hubieran convertido en un 'judío suizo' para los alemanes y un 'sabio alemán' para los ingleses". Quedaba claro.

Einstein visitó España en 1923. A menudo se ha contemplado la situación de la ciencia española de principios de siglo con una mezcla de tristeza e impotencia. Aunque aparentemente en 1905 no había un tejido científico suficientemente maduro para la recepción y difusión de la teoría de la Relatividad especial, más tarde, superado ya el aislamiento de la gran guerra y tras el salto experimentado a mediados-final de los veinte, se podría decir (como señalaba D. Emilio Atienza en un reciente artículo: IDEAL, 11 Marzo 2005), que la conclusión puede ser más positiva para la ciencia española de lo que frecuentemente se cree. Lo atestiguarían nombres como, entre otros, Blas Cabrera, Terradas, Palacios, o nuestra propia "conexión granadina": Emilio Herrera. Este científico y tecnólogo granadino, especialista en aeronáutica, fue muy activo en la difusión en nuestro país de las teorías de Einstein, con quien parece ser que mantuvo una estrecha correspondencia. Justo es aquí, en Granada, recordarle.

En este número de la revista IAA hemos querido plasmar el papel que la obra de Einstein desempeña en nuestra actividad de investigación con una serie de contribuciones que van desde la física de las lentes y microlentes gravitatorias hasta los cuásares y grandes chorros relativistas, pasando por la dinámica del espacio-tiempo y la Relatividad general. Terminamos explorando "más allá de la Relatividad", y revisando los entresijos de la relación entre mecánica cuántica y gravitación. El hilo conductor de este paseo por el papel de la obra de Einstein en nuestro trabajo se centra en la actividad diaria de investigación en el IAA. Es, por tanto, una colección de nuestros distintos enfoques de la influencia einsteniana, cada uno elaborado con diferente profundidad, sobre temas de investigación de enorme actualidad que se abordan en el Instituto. Esperamos que sea del agrado de nuestros lectores y nos sirva a todos para amar aun más la belleza de la Física.

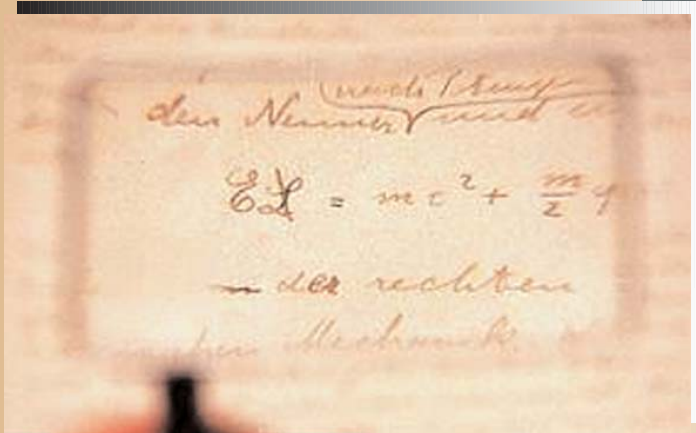
José M. Vílchez

Einstein, una estrella.....



¿binaria?,

Einstein y Besso, en 1925.



Puede parecer, a primera vista, que el título insinúe algo que pueda disminuir el mérito de Albert Einstein. No se trata de eso. Aunque se le asigne un papel de Némesis, este compañero 'binario', de hecho, existió. Llama la atención —aparte del contenido científico y de la ausencia de referencias— una nota al final del artículo de Einstein sobre la relatividad restringida de 1905: “*Tengo que manifestar a mi amigo y colega M. Besso mi agradecimiento por su colaboración en los problemas tratados aquí y por sus muchas y valiosas sugerencias*”. Pero, ¿quién fue este M. Besso? ¿Algún científico olvidado? A fin de cuentas, Einstein le llama “colega”... No, era sólo un amigo. Pero, ¡que amigo! Michele Besso (suizo, de origen español) fue íntimo del científico y su colega en la Oficina de Patentes en Berna. Las amistades suelen hacer resonar mutuamente las profundidades más reveladoras de los seres humanos. Así que, en lugar de contar ortodoxamente la historia de la Teoría de la Relatividad, pensamos que un seguimiento de dicha amistad podría aportar algo más acerca de las relaciones de Einstein con su entorno social, político y científico.

La correspondencia entre los dos hombres se extendió desde 1903 hasta 1955, año de la muerte de ambos. Comprensiblemente, no hubo intercam-

bio de cartas entre 1904 y 1909, ya que se veían diariamente. Pero sorprende que Einstein se preocupase más por la físico-química que por la física teórica en estos primeros años. Es interesante hacer notar la variedad y la profundidad de los asuntos tratados: política, economía, religión, polución industrial, el conflicto árabe-israelí y física de la buena. Quizá esta serie de cartas sirvan para desmitificar un poco el cliché de que solamente unos pocos en el mundo estaban en condiciones de entender la Relatividad. Michele Besso no era físico: era ingeniero de formación y no solo entendía bien los conceptos relativistas, sino que discutía con propiedad sobre el tema (a veces poniendo en apuros a Einstein). Hay constancia de que también ayudó efectivamente a Einstein en el artículo sobre el efecto fotoeléctrico: “...*ayudándote a redactar tus comunicaciones sobre el problema de los cuantos, te he privado de una parte de tu gloria...*” (17/01/1928). Nunca, o casi nunca, se reconoce con el debido aprecio a quienes ayudan a pensar. Si Einstein daba las respuestas, las preguntas las hacía... Besso. De hecho, en más de una ocasión Einstein se quejaría de su nivel de exigencia. Michele actuó también como un timón, sugiriendo a Einstein algunos autores tales como Mach o exigiéndole una mayor profundidad en termodinámica.

En estos primeros tiempos, Einstein

seguía siendo un desconocido para el gran público. La fama le vino en 1919, a raíz de la confirmación observacional de su predicción de que un haz de luz en las proximidades de un campo gravitatorio sufriría una deflexión (traducida en una desviación en la posición aparente de las estrellas cercanas al Sol y, por tanto, visible durante un eclipse). Y él hizo buen uso de la fama: causas pacifistas, el rechazo al nacional-socialismo, la defensa de colegas en dificultades, etc. El intervalo histórico en que la Relatividad General fue engendrada fue un período convulso, con una Guerra Mundial y la Revolución Rusa de por medio. Las dificultades encontradas por Einstein para incorporarse y mantenerse en un puesto digno de investigación son también un fiel reflejo de la época. Fueron muchos los que combatieron la Relatividad, en especial P. Lenard. En este caso, eran sus convicciones sociopolíticas las que inducían su rechazo a dicha teoría. Sin embargo, Lenard intentaba maquillar su antisemitismo usando argumentos *científicos*: hizo reimprimir un artículo sobre la distorsión de un haz de luz en las cercanías de un campo gravitacional del astrónomo alemán von Soldner, quien en 1801 había llegado a un resultado similar al obtenido por Einstein. Sin embargo, este se dio cuenta del error y cuatro años más tarde publicó el resultado definitivo, que era el doble del predicho en 1907. Mientras, el comité anti-Relatividad seguía actuando: hubo

incluso tumultos durante algunas de las conferencias públicas dictadas por Einstein.

En cuanto a la oferta para trabajar en España, es un hecho: *“Si renuncias definitivamente a España, podrías quizá abrirle una puerta allá”* (Besso se refiere a Weyl el 27/04/1933). La simpatía que sentía Einstein por la República Española y la perfecta lectura que hizo de la situación política de entonces está expresada en una carta a Besso: *“América ha participado valientemente en la maniobra de estrangulación contra España”* (10/10/1938). La relación de Einstein con España no se limitaría a su estancia de unos pocos días: Ortega y Gasset, junto a B. Shaw, fue de los primeros no científicos en captar en el aire la esencia de la Relatividad (El sentido histórico de la teoría de Einstein, 1924).

El célebre rechazo de Einstein al carácter probabilístico de la teoría de los cuantos se ve reflejado en la carta fechada a 10/10/1938: *“...considero la física estadística, pese a sus éxitos, como una fase transitoria, y tengo la esperanza de llegar a una teoría verdaderamente satisfactoria de la materia”*. Un pasaje bien característico del pensamiento de Einstein con relación a la teoría unificada puede encontrarse en una carta a Michele: *Una teoría verda-*

deramente racional debería permitir deducir las partículas elementales (electrón, etc) y no estar obligada a postularlas a priori (Einstein a Besso, 10/09/1952).

Besso pasó parte de su tiempo intercediendo por jóvenes científicos junto a su amigo y, lo que es más importante, intercediendo por los dos hijos de Einstein, prácticamente abandonados por el padre. Se desprenden y emergen de la correspondencia tres personalidades einsteinianas: el mal padre, el gran pacifista y finalmente, el científico de enorme envergadura.

La Relatividad y la Física Estelar

La relación de la Física Estelar con la Relatividad es mucho más estrecha que el título de esta crónica puede sugerir: la comentaremos brevemente en los próximos párrafos, con énfasis en la investigación realizada por el Grupo de Física Estelar del IAA.

Aparte de permitir el desarrollo de la teoría de las enanas blancas, la Relatividad tuvo en la Física Estelar uno de sus más firmes anclajes: la medición del corrimiento gravitacional en enanas blancas por Adams en 1915. Años más tarde, Einstein (1936) formuló los principios básicos de las microlentes gravitatorias. Actualmente estamos trabajando para mejorar nuestros resultados del 2003 sobre la micro-

lente MOA2002-BLG-33 (ver Revista IAA 12, pag. 5): se ha conseguido determinar el grado de distorsión provocado por la rotación de la estrella fuente.

Por otra parte, hemos estado estudiando el movimiento apsidal de estrellas relativistas (similar al avance del perihelio de Mercurio pero en escala estelar). La ventaja de utilizar las estrellas binarias es que contamos con un par de docenas en lugar de un solo punto (Mercurio). Al contrario de lo que algunos puedan pensar, el efecto relativista en las órbitas de algunas estrellas dobles cerradas puede predominar sobre la contribución clásica (que depende de la estructura interna estelar y de su grado de evolución). En la década de los 80 aparecieron en la literatura especializada una serie de artículos sobre DI Her, una binaria eclipsante, que cuestionaban las predicciones de la Relatividad. Incluso se formularon dos teorías no simétricas que aparentemente resolvían el problema. Hemos detectado algunos fallos en dichas teorías: entre otros, la dependencia de la calibración con los sistemas que debía explicar a priori o la presencia de muchos parámetros libres. La Relatividad sigue siendo válida para todos los sistemas con excepción de DI Her. Aunque se postulara un grado de concentración de masa infinita, la discrepancia (en este caso solamente relativista) permanecía ya que era dos veces menor que lo teóricamente predicho. En un artículo de 1998, hemos mostrado que tal discrepancia está probablemente relacionada con una base temporal inadecuada o con la presencia de un tercer cuerpo en el sistema, todavía no detectado. En ningún caso las teorías alternativas mencionadas son capaces de predecir el movimiento apsidal de DI Her a priori.

Antonio Claret (IAA)

Referencias:

Correspondencia Besso-Einstein 1903-1955.

Claret, A.: The apsidal motion test of stellar structure in relativistic systems, Astronomy and Astrophysics, 327, pag. 11, 1997.

Claret, A.: Some notes on the relativistic apsidal motion of DI Herculis, Astronomy and Astrophysics, 330, pag. 533, 1998.



Concepción artística de un caso similar al del avance del perihelio de Mercurio.

Cuásares y chorros relativistas

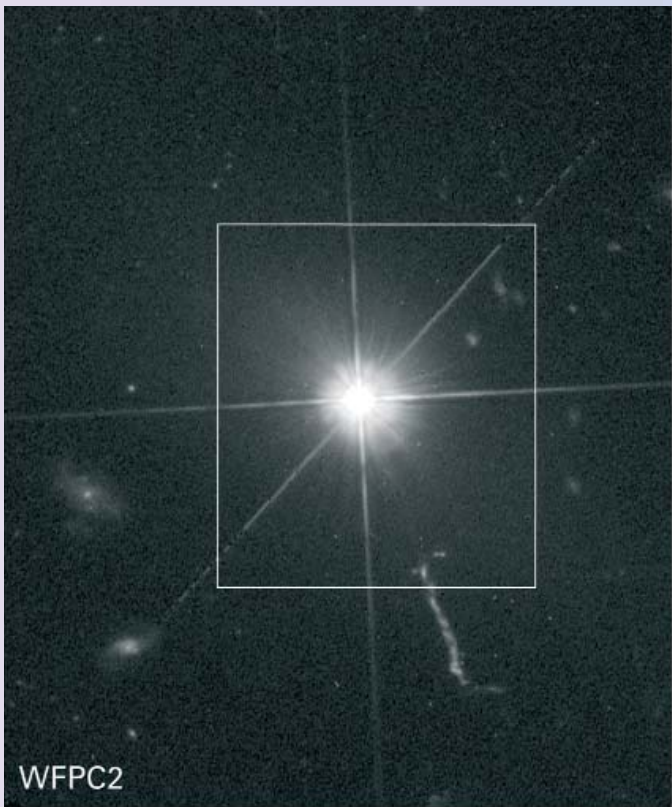
Fluidos moviéndose a velocidades muy próximas a la de la luz, originadas como consecuencia del acrecimiento en agujeros negros muy masivos, suponen uno de los ejemplos más dramáticos de las teorías de Einstein



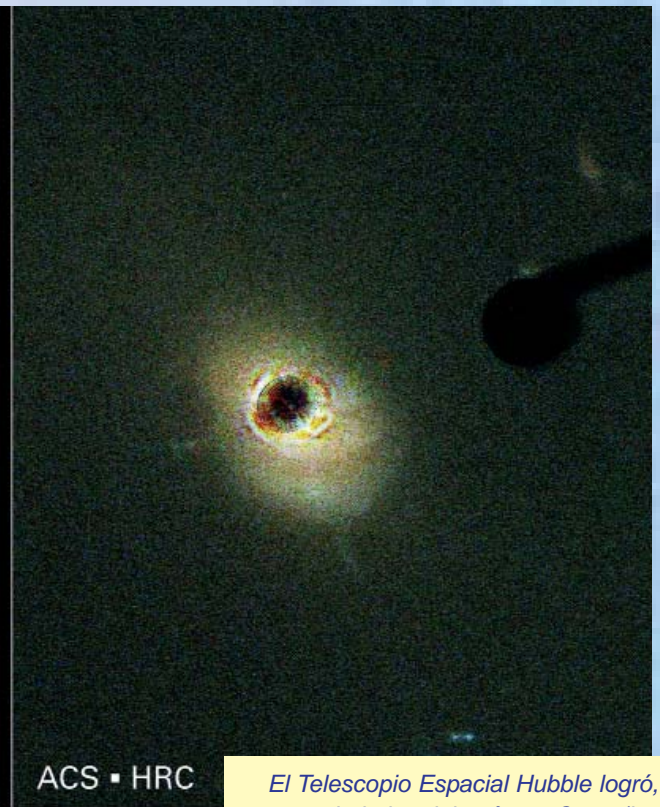
Agujeros Negros Masivos

A mediados del siglo XX se descubrió un tipo de galaxia cuyo núcleo era más luminoso que el resto de toda galaxia. De hecho, en los primeros de estos objetos el núcleo era tan brillante que cegaba nuestra visión de la galaxia que lo albergaba, y se nos presentaban como objetos casi estelares, y así se los denominó cuásares. Además, se descubrió que la luminosidad de los cuásares era variable en una escala de tiempo tan corta que implicaba que esta energía se estaba generando en un volumen extremadamente pequeño (a escala galáctica). Tan dramáticos niveles de potencia radiada sobrepasaban en órdenes de magnitud los que pueden generar incluso las estrellas más luminosas mediante las reacciones termonucleares, por lo que hubo que buscar mecanismos alternativos de generación de energía. Se propuso la omnipresente gravedad como fuente de energía; pero para alcanzar estas potencias con una eficiencia razonable de con-

Estructura del núcleo de una galaxia activa.



WFPC2



ACS • HRC

El Telescopio Espacial Hubble logró, bloqueando la luz del cuásar 3C273 (izquierda), desvelar algunos de los rasgos de la galaxia que lo alberga, que se mostró más compleja de lo que se pensaba (derecha).

Fuente: NASA, ESA.

versión de energía gravitatoria en energía luminosa era necesario recurrir a unos campos gravitatorios producidos en muy pequeñas dimensiones y generados por una concentración de masa de varios cientos o miles de millones de masas solares. Surgió así el concepto de la existencia de agujeros negros supermasivos, que residían en los centros de estas galaxias y cuya luminosidad nuclear excedía en gran medida la del resto de toda la galaxia.

El concepto de agujero negro ya existía desde los tiempos de la gravedad newtoniana; un campo gravitatorio tan intenso cuya velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz. Sin embargo, las luminosidades observadas y la magnitud del campo gravitatorio requerido en los cuásares hacen de estos un buen laboratorio donde comprobar las predicciones de las dos teorías relativistas de Einstein: la teoría especial, donde la fenomenología va asociada a velocidades próximas a la de la luz, y la teoría general, donde el fuerte campo gravitatorio modifica la estructura del espacio-tiempo en las inmediaciones del hipotético agujero negro supermasivo.

El proceso por el que la energía gravitatoria se convierte en energía luminosa alrededor de un agujero negro ocurre a través de una estructura conocida como disco de acrecimiento. En general, la estructura de las galaxias está mantenida por la energía gravitatoria de los diferentes componentes (estrellas, nubes de gas

y de polvo), que mantienen un momento angular en la rotación a lo largo de su órbita. Cuando, por fricción, este material pierde parte de su momento angular, tiene que caer a una órbita más cercana al centro de la galaxia y, eventualmente, puede entrar en la zona nuclear, orbitando a distancias muy cercanas al núcleo central galáctico. La acumulación de material en este núcleo hace que la fricción dinámica entre órbitas "tan apretadas" genere temperaturas muy elevadas, en las que el material se calienta y emite radiación muy energética. Este material se asienta en una estructura aplanada que llamamos

El concepto de agujero negro ya existía desde los tiempos de la gravedad newtoniana; un campo gravitatorio tan intenso cuya velocidad de escape es mayor que la velocidad de la luz

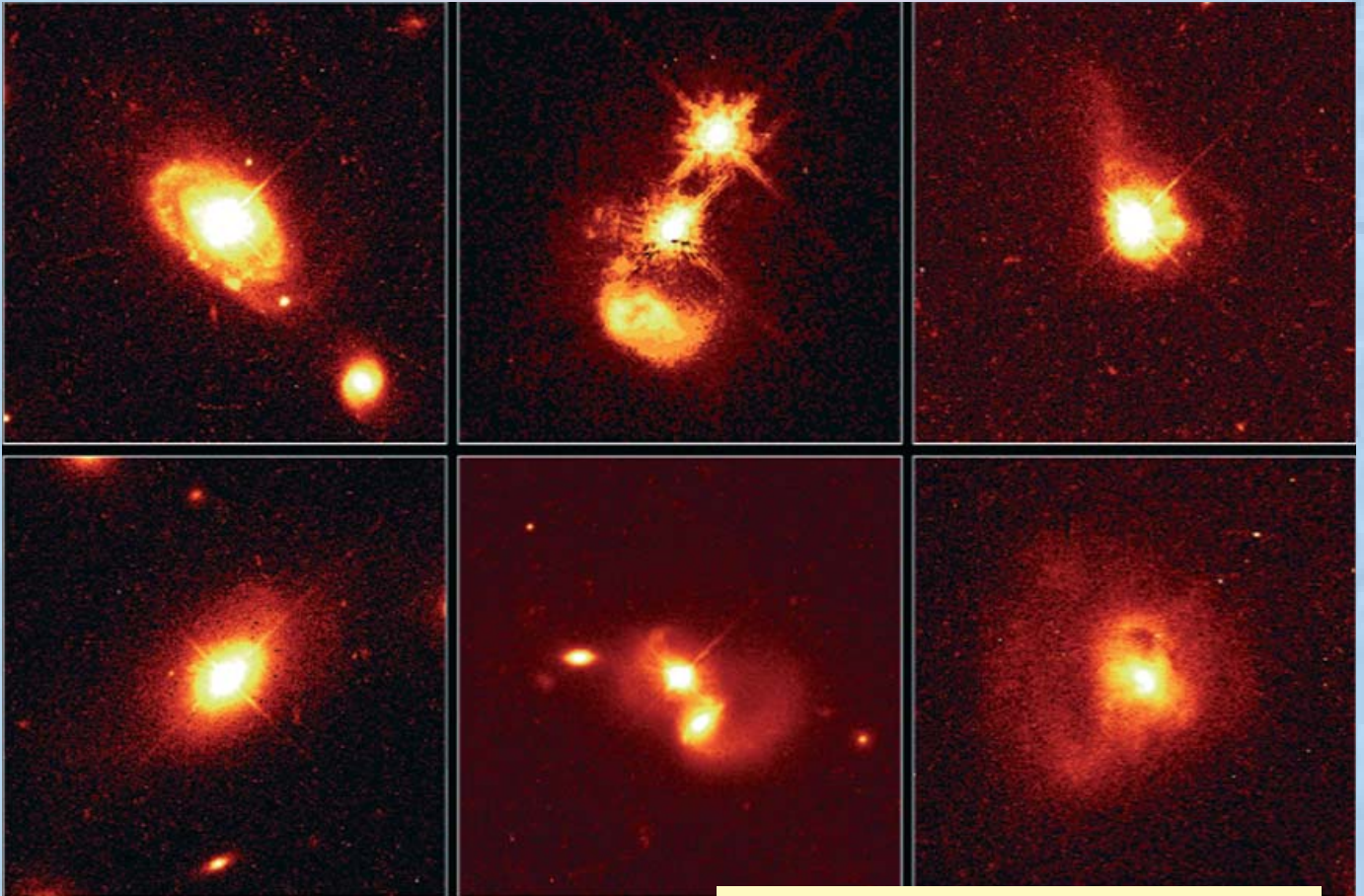
disco de acrecimiento, a unas distancias de apenas unos días luz del hipotético agujero negro masivo en su centro.

Las evidencias observacionales de la existencia de estas monstruosas concentraciones de masa se han ido acumulando a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, lo

que necesitamos observar son los efectos directos de las predicciones de las teorías, especial y general, de la relatividad. A día de hoy, hay buenas evidencias de los efectos gravitatorios predichos por la teoría general alrededor de un agujero negro de millones de masas solares para apenas unas pocas galaxias. Nuestra Galaxia se encuentra entre las tres donde la evidencia apunta con más certeza a la existencia de dichos agujeros negros, aunque el consenso generalizado (pero no total) de la comunidad astronómica acepta en la actualidad las evidencias más indirectas para los núcleos de varias docenas de galaxias.

Chorros Relativistas

No todo el material que forma el disco de acrecimiento acaba alimentando el agujero negro central. Parte de él es arrancado por los campos magnéticos que se encuentran anclados en su interior, en un proceso cuyos detalles desconocemos en gran medida, pero que da lugar a uno de los fenómenos más llamativos de la naturaleza: la formación de unos gigantes chorros de partículas que se extienden hasta distancias mucho mayores que la propia galaxia que los alberga.



Mosaico de imágenes de cuásares tomadas por el Telescopio Espacial Hubble.

La observación detallada de estos chorros ha mostrado la existencia de unas regiones de emisión más intensa, conocidas como componentes, que presentan un comportamiento característico en este tipo de objetos, pero no por ello menos intrigante: su movimiento proyectado en el plano del cielo es muy superior al de la velocidad de luz. Cuando, en la década de los 70, se observó por primer vez este efecto, conocido como *movimiento superlumínico*, se pensó que violaba una de las premisas fundamentales en las que se basa la teoría de la relatividad de Einstein, la imposibilidad de viajar más rápido que la luz. Sin embargo, pronto se confirmó que este fenómeno es perfectamente explicable dentro de la teoría de la relatividad, por efectos de proyección, y nos ha permitido constatar un hecho de suma importancia en el estudio de los AGN (acrónimo en inglés de “núcleos activos de galaxias”): el material que viaja a lo largo de los chorros ha de hacerlo a una velocidad que, si bien no es superior a la de la luz, sí ha de ser muy cercana a ella, llegando a alcanzar el 99.99% de su valor.

La última década nos ha revelado

que estos chorros relativistas son mucho más comunes en la naturaleza de lo que se había pensado. En 1994 se observaron por primera vez movimientos superlumínicos en el chorro de un objeto situado en nuestra propia galaxia. El sistema comparte muchas de las características de los AGN, con un agujero negro de masa estelar extrayendo material de su estrella compañera, formando un disco de acrecimiento a su alrededor del que surgen un par de chorros relativistas. Todo ello a una escala unas mil millones de veces menor que en los cuásares (o AGN en general), por lo que han pasado a denominarse *microcuásares*.

Más recientemente se ha podido constatar que existen unos casos incluso más dramáticos de formación de chorros relativistas. Estrellas más masivas que nuestro Sol pueden acabar con una explosión titánica, conocida como *hipernova*, en la que la estrella llega a brillar mucho más que la propia galaxia en donde se encuentra. Durante estos últimos segundos de vida de la estrella sus regiones más internas se contraen sobre sí mismas hasta formar presumiblemente un agujero negro, mientras que las zonas

más externas son eyectadas en forma de chorros relativistas.

Nos encontramos, por tanto, ante uno de los fenómenos más energéticos del universo, transportando partículas fundamentales con velocidades y energías internas relativistas; algo que, sin duda, habría dejado con la boca abierta al propio Einstein, pues constituyen uno de los ejemplos más dramáticos de la Naturaleza con los que poner a prueba sus teorías. Hasta la fecha, todas las observaciones realizadas encajan con exquisita precisión en los modelos físicos que Einstein, y otros investigadores de principios del siglo XX, ayudaron a desarrollar.

José Luis Gómez

Enrique Pérez

(IAA)

LENTES GRAVITATORIAS

Todos sabemos que la fuerza de la gravedad afecta al movimiento de los cuerpos materiales. Sin embargo, no es tan conocido que también influye en la trayectoria de los rayos de luz, algo que el propio Isaac Newton conjeturó en 1704. Esta cuestión interesó a numerosos científicos como Cavendish y Laplace en los años siguientes, pero el primero en realizar una predicción concreta de esta hipótesis fue el físico bávaro J. Soldner. En 1801 calculó que la luz de una estrella que rozara el Sol en su camino hacia la Tierra se vería desplazada de una manera casi imperceptible por la atracción gravitatoria del mismo. Esto es lo que se conoce hoy en día como el efecto "lente gravitatoria". Los instrumentos de la época no permitían realizar una medición tan precisa y la idea fue olvidada hasta que Einstein, con su teoría de la Relatividad General recién estrenada, decidió repetir el cálculo y obtuvo un valor de la desviación dos veces mayor que el predicho por Soldner según la teoría de Newton. Este resultado levantó un revuelo

entre la comunidad científica: bastaba con medir el valor de la desviación de la posición de una estrella cerca del borde del sol durante un eclipse total (de lo contrario ésta sería invisible en la cegadora luz solar) para poner a prueba la nueva teoría. El primer intento fue infructuoso y acabó con una expedición alemana a Crimea prisionera del ejército ruso. Mientras tanto, Arthur Eddington, un brillante astrónomo británico, estudiaba las ideas de Einstein a través de una copia de su trabajo introducida en Inglaterra tras atravesar los frentes de la primera guerra mundial. Eddington decidió que el futuro eclipse del 29 de mayo de 1919 era, por su duración y la posición del sol, una ocasión especialmente propicia para observar este fenómeno. Sin embargo, la guerra seguía su curso y en 1917 el gobierno británico llamó a filas

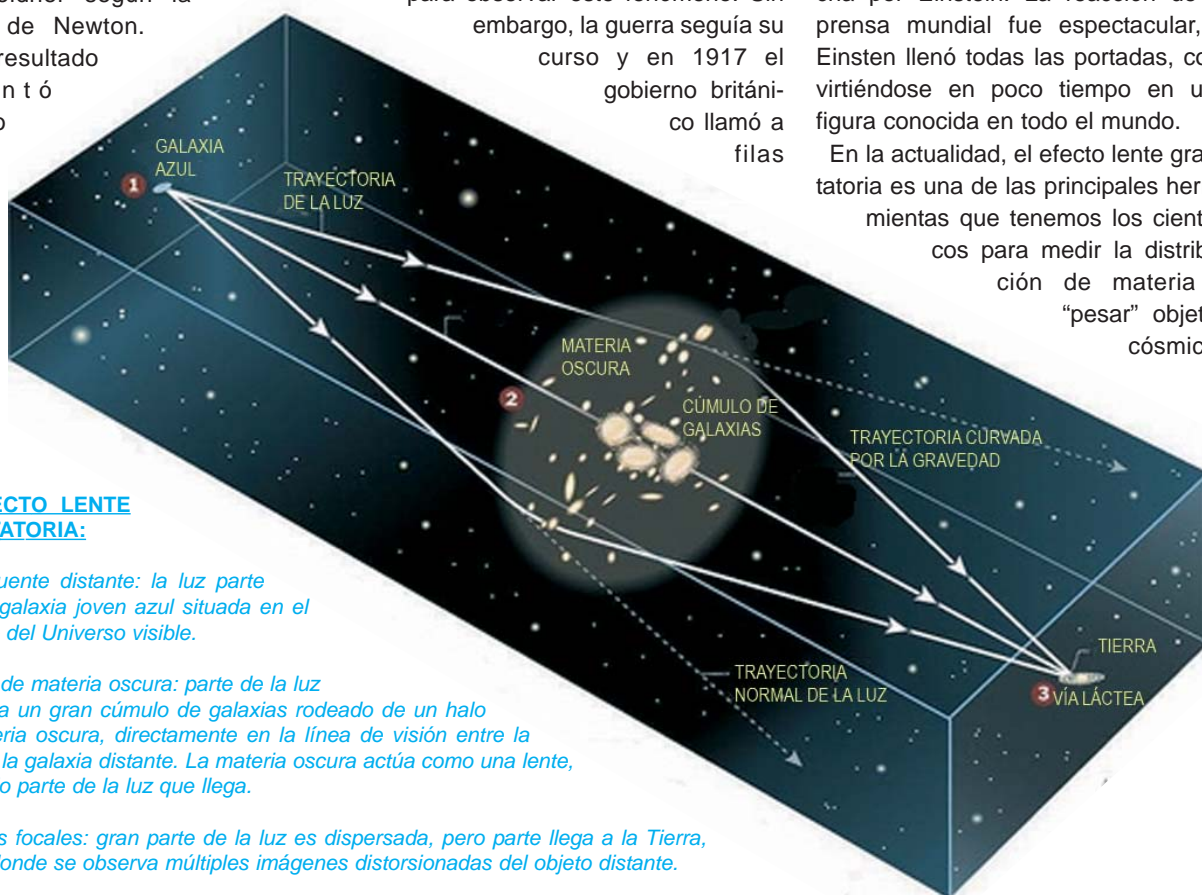
al astrónomo. Éste se declaró objetor de conciencia, y habría sido encarcelado de no intervenir el astrónomo real, que consiguió posponer su entrada en los calabozos a cambio de que Eddington se comprometiera, precisamente, a liderar una expedición para observar el eclipse de 1919 si la guerra había concluido en esa fecha.

Los británicos se repartieron entre la isla del Príncipe, en el Golfo de Guinea, y Sobral, en Brasil. A pesar de las dificultades impuestas por el clima tropical, la expedición consiguió sus objetivos: en noviembre la Royal Society británica anunció que las placas fotográficas tomadas durante el eclipse demostraban

El efecto lente gravitatoria es una de las principales herramientas que tenemos los científicos para medir la distribución de materia o "pesar" objetos cósmicos masivos

que la desviación de las estrellas cercanas a la posición del sol era la predicha por Einstein. La reacción de la prensa mundial fue espectacular, y Einstein llenó todas las portadas, convirtiéndose en poco tiempo en una figura conocida en todo el mundo.

En la actualidad, el efecto lente gravitatoria es una de las principales herramientas que tenemos los científicos para medir la distribución de materia o "pesar" objetos cósmicos

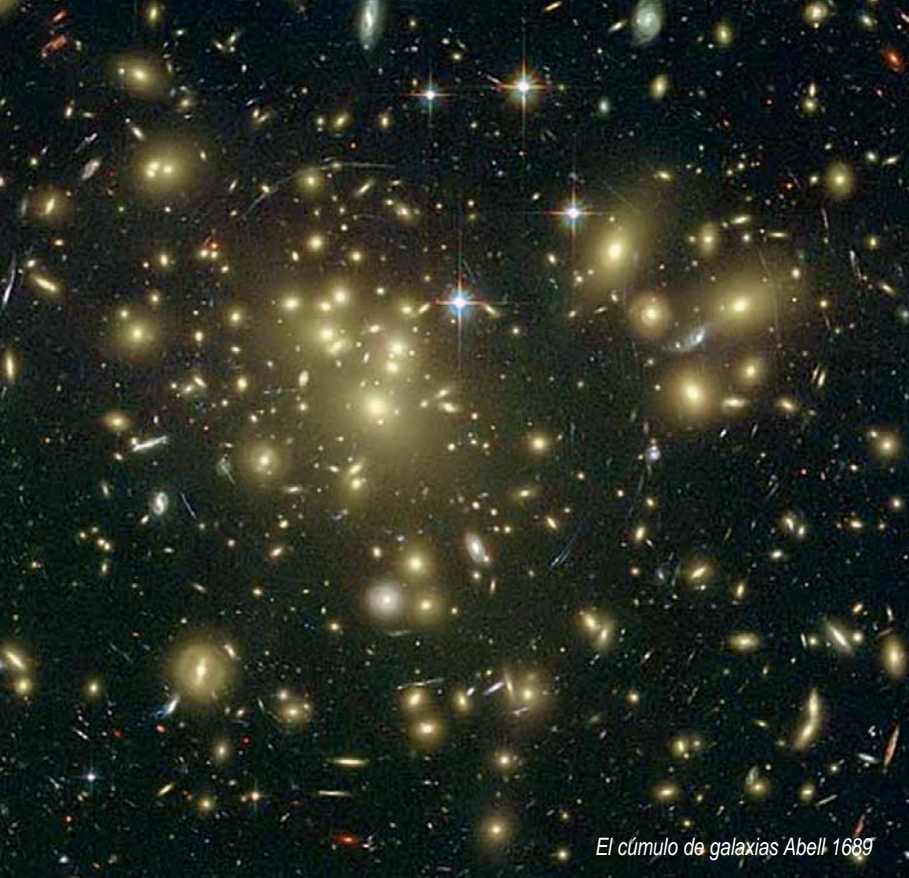


EL EFECTOLENTE GRAVITATORIA:

1. Una fuente distante: la luz parte de una galaxia joven azul situada en el extremo del Universo visible.

2. Lente de materia oscura: parte de la luz atraviesa un gran cúmulo de galaxias rodeado de un halo de materia oscura, directamente en la línea de visión entre la Tierra y la galaxia distante. La materia oscura actúa como una lente, curvando parte de la luz que llega.

3. Puntos focales: gran parte de la luz es dispersada, pero parte llega a la Tierra, desde donde se observa múltiples imágenes distorsionadas del objeto distante.

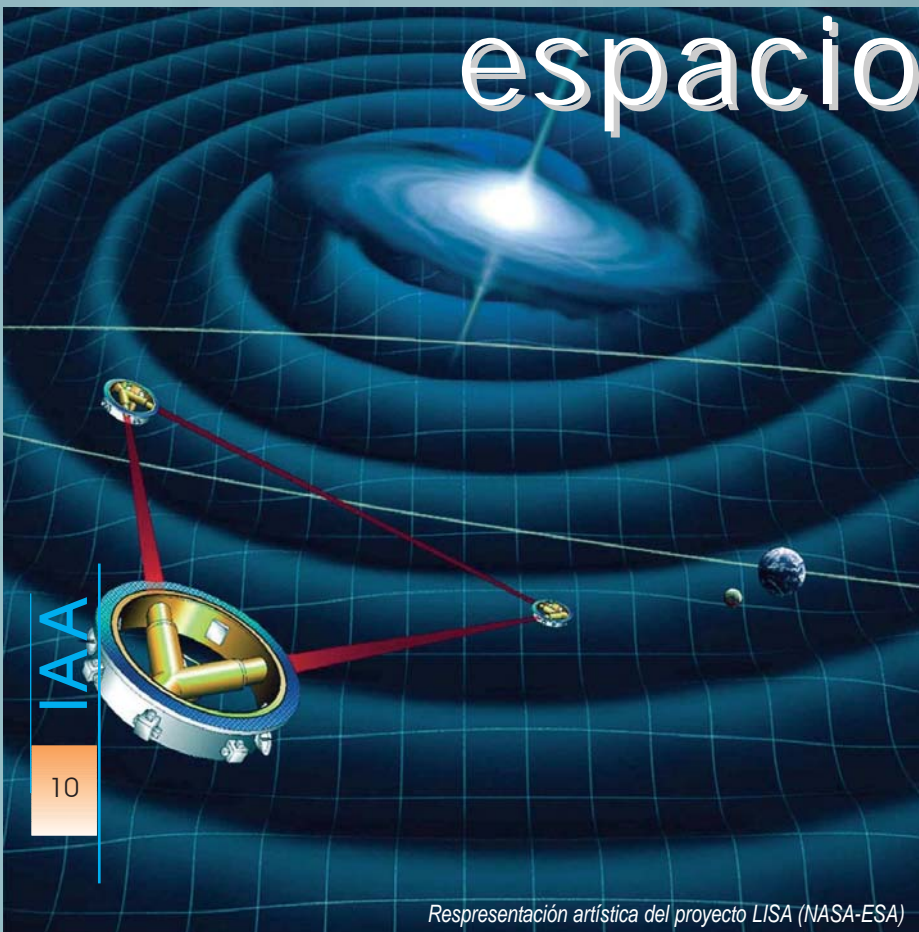


El cúmulo de galaxias Abell 1689

masivos. Una de las aplicaciones más frecuentes es la medición de la distribución de materia de un cúmulo de galaxias, una de las estructuras más masivas del universo. Para ello buscamos galaxias que se encuentren detrás del cúmulo, pero considerablemente más lejos de nosotros. La atracción gravitatoria de la masa del cúmulo desvía la luz que proviene de dichas galaxias, modificando su forma a veces de modo muy complejo (ver figura de la izquierda). Estudiando esta distorsión, podemos calcular con considerable precisión la cantidad total de masa que contiene el cúmulo, e incluso la forma en la que está distribuida. Es una más de las aplicaciones de la Teoría General de la Relatividad de Einstein que nos permite entender y conocer mejor el Universo.

Narciso Benítez (IAA)

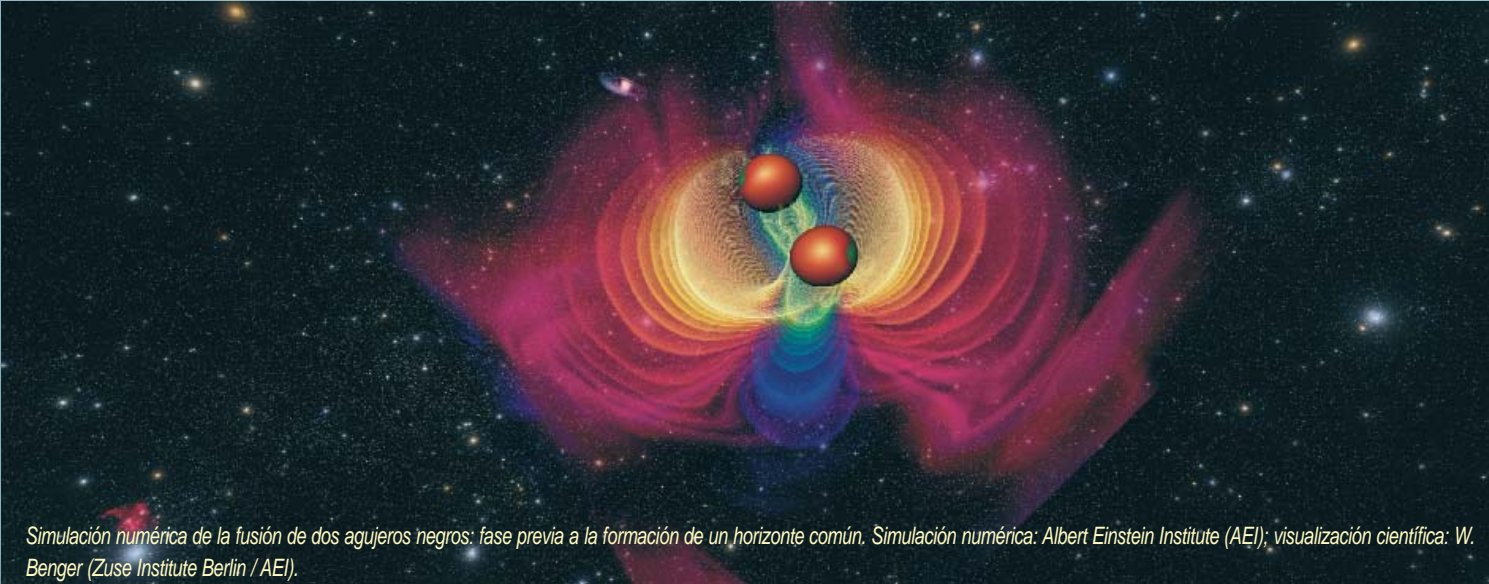
Ondas gravitatorias: dinámica del espacio-tiempo



ESPACIO-TIEMPO COMO ENTE DINÁMICO

La teoría de la Relatividad de Einstein representa una revisión radical de las nociones fundamentales de espacio y tiempo, frente al anterior paradigma newtoniano. En 1905, la Relatividad Especial sintetizaba tales conceptos en una única entidad, el espacio-tiempo, como resultado de compatibilizar la existencia de una velocidad finita de la luz con las descripciones físicas de distintos observadores inerciales. Unos años más tarde, la Relatividad General (1915-1917) confería carácter dinámico al propio espacio-tiempo como consecuencia de introducir la gravedad en el marco relativista. En esta teoría, el espacio-tiempo puede describirse como un *campo métrico* cuya *curvatura* codifica la gravedad y cuya dinámica está determinada por

Representación artística del proyecto LISA (NASA-ESA)



Simulación numérica de la fusión de dos agujeros negros: fase previa a la formación de un horizonte común. Simulación numérica: Albert Einstein Institute (AEI); visualización científica: W. Benger (Zuse Institute Berlin / AEI).

las denominadas ecuaciones de Einstein. El espacio-tiempo deja de ser un escenario pasivo donde se desarrollan los fenómenos físicos, para convertirse en un ente físico en sí mismo, susceptible de interactuar con las fuentes de materia que lo crean.

RADIACIÓN GRAVITATORIA COMO PREDICCIÓN DE LA RELATIVIDAD GENERAL

En Relatividad, la noción (*causal*) de velocidad máxima conduce a la idea de radiación del campo gravitatorio. Usando una analogía electromagnética, una partícula cargada en reposo produce un campo electrostático; el cambio del estado de movimiento de la partícula se transmite al campo, que propaga dicha información a la velocidad de la luz. En efecto, la electrodinámica predice que una partícula cargada y acelerada emite radiación electromagnética (luz). Igualmente, resulta razonable que cambios locales en una distribución gravitatoria conduzcan a la emisión de radiación, entendida como un campo métrico en propagación. Sin embargo, pese a constituir una de las primeras predicciones de la Relatividad General (Einstein 1916,1918), la existencia de radiación gravitatoria constituye un episodio controvertido en el desarrollo de la Relatividad General (en 1936 el propio Einstein concluía, junto con N. Rosen, la no existencia de tal radiación, para volver a admitirla inmediatamente después). Entre las razones de esta confusión podemos señalar la propia descripción independiente de coordenadas de la teoría, la dificultad en analizar el régimen radiativo en cualquier teoría *no lineal* o la ausencia de una noción local de energía del campo gravitatorio. Respecto al último punto, uno espera que las ondas gravitatorias transporten energía. Sin embargo, según el *principio de equivalencia* de la

Relatividad General, cualquier campo gravitatorio puede ser eliminado localmente mediante un cambio de coordenadas; dicho de otro modo, un observador en *caída libre* no siente su peso. Como consecuencia, resulta problemático introducir una noción local de energía gravitatoria (no existe un análogo gravitatorio estricto del vector de Poynting electromagnético). Hubo que esperar a la segunda mitad de los años 50 para que F. Pirani y H. Bondi mostraran que la radiación gravitatoria transporta, de hecho, energía. Para ello adoptaron el enfoque de J. Synge, que enfatiza el papel de los efectos de marea producidos por el campo gravitatorio (ecuación de *desviación geodésica*). Esto es, el acercamiento o alejamiento de dos partículas separadas por una distancia finita Dx (estiramiento o compresión en el caso de un cuerpo extenso), como consecuencia de una curvatura no nula del espacio-tiempo. Como resultado, las ondas gravitatorias son aceptadas hoy como una firme predicción de la Relatividad General.

RADIACIÓN GRAVITATORIA COMO NUEVA VENTANA EN ASTROFÍSICA

Como consecuencia del débil carácter de la interacción gravitatoria, la más débil de las cuatro interacciones fundamentales, la producción significativa de ondas requiere el movimiento coherente de grandes masas a velocidades relativistas, o muy próximas a la velocidad de la luz. Esto hace de los proce-

dos astrofísicos violentos el escenario adecuado para la búsqueda de tal radiación. De hecho, hasta el momento la única observación de estas ondas es indirecta y procede del estudio de púlsares binarios. La observación, en 1974, de la disminución del periodo del púlsar B1913+16 y su consiguiente

explicación en términos de pérdida de energía por emisión gravitatoria les valió el premio Nobel a R. Hulse y J. Taylor en 1993. Desde entonces, el descubrimiento de otros púlsares binarios ha consolidado las bases observacionales de la existencia de esta radiación. Sin embargo, falta una medida directa de la radiación gravitatoria. Junto al interés como test de los

aspectos dinámicos de la Relatividad General, el análisis de este tipo de radiación ofrecerá una nueva ventana para la observación astrofísica, complementaria a la basada en la radiación electromagnética. En efecto, la escasa interacción de las ondas gravitatorias con la materia les permite atravesar zonas electromagnéticamente opacas. Asimismo, dado que la longitud de onda gravitatoria es comparable al tamaño característico de las grandes masas que la generan, la radiación gravitatoria no permite resolver dichas fuentes para formar una imagen, encontrando en el sonido un mejor análogo que en las ondas electromagnéticas (generalmente producidas por pequeñas cargas). En definitiva, la radiación gravitatoria proporciona información sobre fenómenos astrofísicos no accesibles para la radiación electromagnética, codificando sus características en ondas de naturaleza muy distinta, pero complementaria, a las de la luz.

El espacio-tiempo deja de ser un escenario pasivo donde se desarrollan los fenómenos físicos, para convertirse en un ente físico en sí mismo, susceptible de interactuar con las fuentes de materia que lo crean

RELATIVIDAD NUMÉRICA Y PREDICCIONES

La extracción de información a partir de la radiación gravitatoria precisa de la elaboración de modelos teóricos de la fuente productora de las ondas. El uso de técnicas numéricas para resolver las ecuaciones de Einstein se hace indispensable debido a la complejidad de los intensos campos gravitatorios involucrados. Ante la necesidad de precisas predicciones teóricas de las ondas gravitatorias correspondientes a distintos procesos astrofísicos (binarias de agujeros negros, binarias de estrellas de neutrones, inestabilidades en estrellas de neutrones en rotación relativista, etcétera), la relatividad numérica constituye hoy una disciplina de intensa actividad dentro del campo de la Relatividad.

DETECTORES DE RADIACIÓN GRAVITATORIA

La "transparencia" de la materia a las ondas gravitatorias dificulta la detección de este tipo de radiación. Dicha detección se fundamenta en la medición de los estiramientos y compresiones producidos por las mareas gravitatorias en el aparato receptor. Al igual que las ondas electromagnéticas, la radiación gravitatoria presenta un carácter *transversal* y dos modos de

polarización (estas dos polarizaciones corresponden a los dos *grados de libertad físicos* del campo gravitatorio). En 1959, J. Weber inició la búsqueda de observaciones directas mediante el uso de *detectores de barras*, cuyas resonancias con los modos de oscila-



Imagen de Virgo en la sede del European Gravitational Observatory (EGO), Cascina (Italia). Los largos brazos del interferómetro aumentan el desplazamiento relativo, por efectos de marea, de las masas suspendidas en sus extremos (Ó Eurellos 2000).

ción de la onda gravitatoria los hacen sensibles a una estrecha banda de frecuencia. A pesar de la superación de importantes retos tecnológicos, el fuerte impulso en este campo proviene de la entrada en funcionamiento de una nueva generación de detectores de tipo *interferométrico*: LIGO (Estados Unidos), Virgo (Francia-Italia), GEO600 (Alemania-Reino Unido), TAMA300 (Japón) y ACIGA (en construcción en Australia). Estos interferómetros-láser funcionan en una banda ancha, en la que el ruido sísmico introduce un límite inferior a la frecuencia que se puede observar. Esto hace necesario abandonar la Tierra para explorar esa zona del

espectro, asociada por ejemplo a binarias de agujeros negros supermasivos, constituyendo el proyecto LISA de interferómetro en el espacio (colaboración NASA-ESA).

En definitiva, el estudio de la física de ondas gravitatorias constituye un campo apasionante de trabajo multidisciplinar, en el que la astrofísica ofrece un puente entre los estudios teóricos en gravedad y los retos físicos y tecnológicos asociados a la detección.

**José Luis Jaramillo
(Obs. Paris-Meudon)**

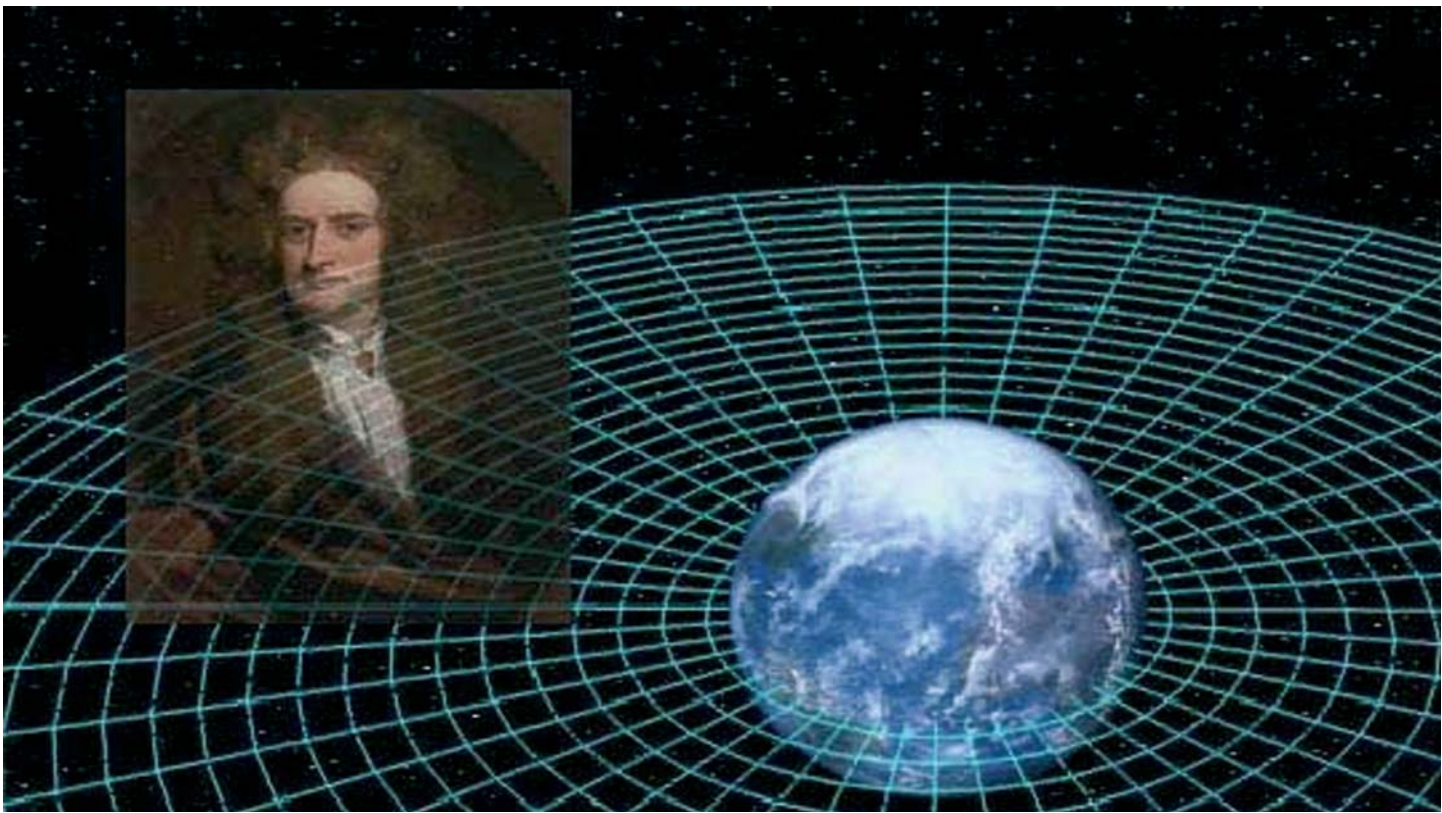
Bibliografía

- Kip S. Thorne, *Black holes and time warps. Einstein's outrageous legacy*. W.W. Norton & Company, New York (1994); traducción al castellano: *Agujeros negros y tiempo curvo. El escandaloso legado de Einstein*. Crítica (1995).
- James B. Hartle, *Gravity, an introduction to Einstein's general relativity*, Addison Wesley (2003).
- Daniel Kennefick, *Controversies in the History of the Radiation Reaction problem in General Relativity*; (preprint en <http://xxx.lanl.gov/abs/gr-qc/9704002>).

La irresistible tentación cosmológica de la Relatividad General

La gravitación de Newton afecta a todas las masas, así la de la manzana como la de los planetas que giran alrededor del Sol. Ese es el sentido de *universal* al hablar de gravedad. La Relatividad General (RG) de Einstein es una teoría de la gravitación que extiende la de Newton, en la que todo lo que existe, materia o energía, gravita. La capacidad de sentir y, a la vez, de crear un campo gravitatorio, es un atributo inmediato de la existencia. Y su alcance es infinito, de modo que nada puede ser ajeno a la gravedad.

Aunque hay otra fuerza de largo alcance, la electromagnética, ésta no es universal, pues sólo afecta a la materia cargada eléctricamente. De modo que, de manera natural, hablar de Cosmología es hablar de gravitación y toda teoría de la gravedad se constituye en el marco de las elaboraciones cosmológicas.



COSMOLOGÍA NEWTONIANA, UN MUNDO IMPOSIBLE

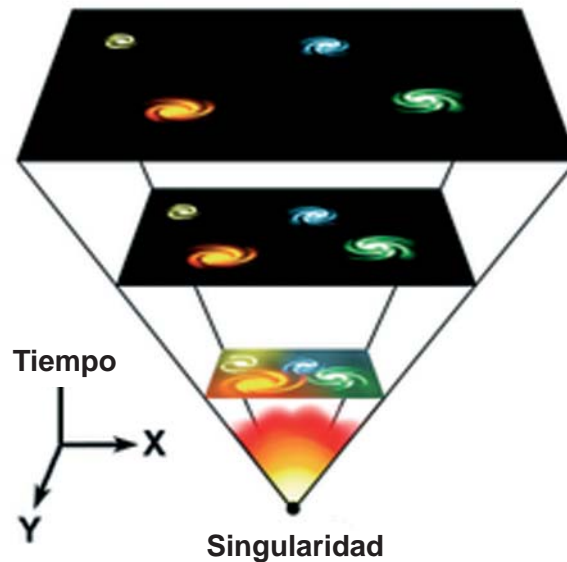
Newton no se ocupó de las consecuencias cosmológicas de su teoría, salvo a requerimiento del reverendo Bentley, preocupado éste por ilustrar en sus conferencias la concordancia de la ciencia con la Biblia. Bien es verdad que el universo en esa época era el sistema solar y las estrellas fijas, de forma que la cosmología se reducía a explicar los movimientos de los cuerpos del sistema solar en un Universo, por lo demás inmóvil. La ley de Newton expresa una relación esencialmente local, y los problemas del origen y evolución de los cuerpos, o del tamaño y duración del Universo, parecían ser de otro ámbito. La irracionalidad de la acción a distancia que propugna la teoría, y la ausencia de cualquier elemento de comprensión del origen de la gravitación, desalientan cualquier intento de teorización más allá de la explotación inmediata de su éxito. Sí, Newton podría haber considerado el Universo como un sistema dinámico, algo así como un supersistema solar, en el que los movimientos equilibran las fuerzas de atracción. Pero se desentendió del problema e incluso llegó a invocar la Providencia para explicar el funcionamiento del Universo. En el fondo, la visión cosmológica newtoniana plantea una tensión, de la que

Newton se desentiende, entre un Universo infinito y un Universo con límites, ambos igualmente problemáticos como vienen a ilustrar la paradoja de la noche oscura y la catástrofe gravitacional.

En su carta a Galileo a propósito del *Sidereus Nuncius*, Kepler hace notar que, si el universo fuese infinito, el cielo debería ser tan brillante de noche

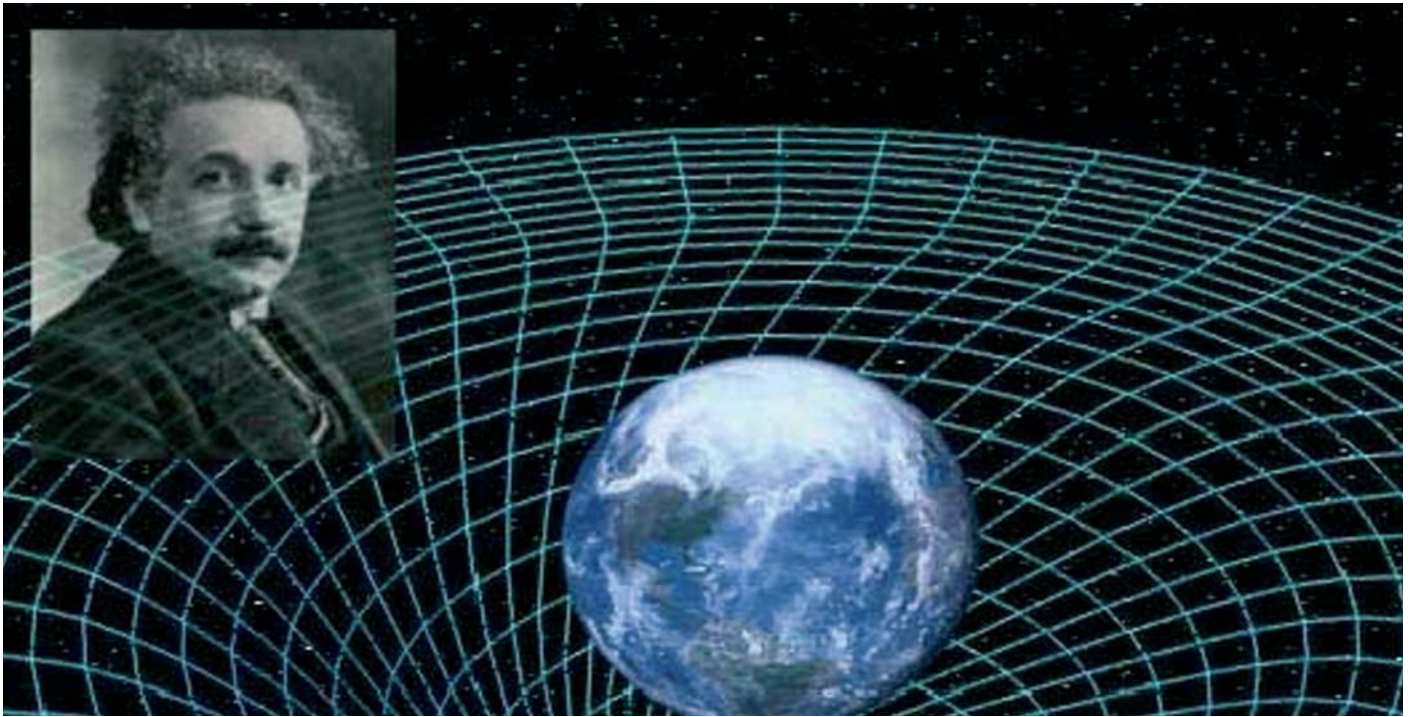
idea de universo como conjunto de todo lo que existe, como ya había argumentado de manera definitiva Giordano Bruno. Pero, dado que, efectivamente, el cielo es oscuro por la noche, no quedaba sino vivir con la contradicción de la existencia de un Universo delimitado por una frontera (hay que notar aquí que finito y limitado son conceptos equivalentes en la geometría euclidiana, pero no en otras geometrías en las que un dominio puede ser finito en sus dimensiones y sin embargo carecer de frontera o límite).

Ya acabándose el siglo XIX, por otro lado, se formuló lo que se conoce como *catástrofe gravitatoria*: El potencial gravitatorio en un punto de un sistema homogéneo e ilimitado es infinito. Para evitarla, se postulaba una modificación de la ley de Newton, de modo que su alcance ya no fuese infinito y, a muy grandes distancias, la atracción newtoniana se hiciera nula. Es como si, con la atracción newtoniana, se combinase una fuerza repulsiva que, al final, podía llegar a anularla. Lo que es, claramente, un antecedente inmediato de lo que hoy conocemos como Constante Cosmológica.



como lo es por el día (conclusión que más tarde se conocería como paradoja de Olbers). Considerar el universo como finito tampoco era una buena solución puesto que, en ese caso, debería tener un límite, cuya existencia es radicalmente contradictoria con la

La cosmología newtoniana era pues, en el contexto general de la Física hasta finales del XIX, imposible de formularse de manera consistente. La RG, con el posterior descubrimiento de las galaxias, supone la primera posibilidad de un planteamiento científico de la Ciencia del Universo.



COSMOLOGÍA RELATIVISTA, UN INFINITO JARDÍN

En el caso de Newton, la gravedad es una relación cuerpo a cuerpo. Einstein, en cambio, formula la gravedad en términos globales:

ESPACIO-TIEMPO ↔ MATERIA-ENERGÍA

De este modo, es la geometría del espacio-tiempo la que se modifica por la presencia de materia-energía que, a su vez, se comporta acomodándose a esa geometría. Con esta formulación es inevitable pensar en el Universo como sistema de estudio. **Incluso podría decirse que sólo la Cosmología es, en rigor, el campo de la RG.**

Einstein abordó el problema cosmológico apenas enunciada su teoría. En su concepto, ese universo, observacionalmente aún muy parecido al de Newton, debía ser un sistema en equilibrio, siempre igual a sí mismo. Su sorpresa fue encontrar que ese mundo estático no era posible si la gravedad es puramente atractiva y de alcance infinito, problema en cierta medida similar al que afecta a la teoría de Newton. Y, como se hizo con ésta, Einstein se ve obligado a añadir un término corrector a sus ecuaciones, la Constante Cosmológica. Aunque en su origen ese término no era sino un añadido, es en puridad un ingrediente natural de la teoría, y anularlo no es una determinación impuesta por el planteamiento conceptual de la teoría. De hecho, ha sido invocada repetidamente, hasta convertirse en los últimos años en protagonista de la

Cosmología, bien como constante o como *energía oscura*. Para llegar a las formulaciones cosmológicas actuales había que dar un paso más, que consiste en explotar el carácter dinámico de la propia geometría, la capacidad que ofrece la Relatividad General para que las

La Relatividad General, con el posterior descubrimiento de las galaxias, supone la primera posibilidad de un planteamiento científico de la Ciencia del Universo

características del espacio-tiempo cambien con el tiempo. Habrá que imponer, además, el Principio Cosmológico, que garantiza que, a la escala adecuada y en un momento dado, el Universo tiene las mismas propiedades para cualquier observador. Este principio permite, y esa es la novedad, que esas propiedades cambien con el tiempo, de modo que ya son posibles los Universos con historia. En síntesis, los modelos cosmológicos son soluciones de las Ecuaciones de Einstein que satisfacen el Principio Cosmológico junto con hipótesis simplificadoras sobre el tipo de contenido del Universo. La familia de modelos que resulta queda caracterizada por tres parámetros independientes, y el ritmo de expansión (constante de Hubble), la densidad de materia-energía y la constante cosmológica

son los que habitualmente se consideran. Cada tríada de valores de esos parámetros singulariza un modelo específico de entre los infinitos posibles.

La Cosmología, como actividad científica, sería un desarrollo académico sin la confrontación con las observaciones que alimentan y refuerzan las elaboraciones teóricas. La clave del edificio cosmológico es la interpretación de la ley de Hubble (relación empírica entre la distancia de las galaxias y su desplazamiento espectral hacia el rojo) en términos de **Expansión del Universo** (predicción teórica). Y que la radiación de fondo a 2,7K es interpretada como fósil del pasado caliente y denso del Universo, en el que también se formaron elementos químicos como el helio o el litio (**el Universo evoluciona**). Para la mayoría de los astrónomos, el soporte empírico es suficiente para concluir que ya hemos logrado captar los rasgos básicos del Universo y que la tarea que queda por delante es, simplemente, determinar con precisión cada vez mayor los valores de aquellos tres parámetros que singularicen el modelo concreto que mejor representa el Universo.

Pero, como la propia historia de la Cosmología nos muestra (a modo de ilustración: ayer se renegaba de la Constante Cosmológica y hoy se considera un ingrediente básico), la realidad quizás sea mucho más compleja y nuestros modelos aún demasiado simples para darlos por definitivos.

Mariano Moles (IAA)

Más allá de la relatividad



Considérame un amigo, yo ya lo estoy haciendo al tutearte. Estamos aquí delante para hablar de la teoría de la relatividad o, más modestamente, de algunos de sus aspectos a los que considero una fortuna haber podido dedicar una cierta reflexión. Como tú no puedes interactuar conmigo en este momento, intentaré hacer más tus más que seguras preguntas. Primero, ¿qué es eso de la teoría de la relatividad y por qué nos llama tanto la atención cualquier alusión a su nombre? Podemos decir que la teoría de la relatividad es una forma de describir, racional y cuantitativamente, algunos aspectos de la realidad de un mundo natural (que suponemos ahí independientemente de nuestra presencia) y que además resulta consistente con nuestra experiencia de esta realidad. Esta definición serviría para muchas otras teorías científicas o filosofías naturales parciales (suprimiendo quizá la palabra cuantitativamente); para describir la teoría de la relatividad tenemos que añadir sobre qué aspectos del mundo natural versa. Como ya se habrá visto en otras contribuciones a esta revista, la relatividad versa sobre cómo medir el transcurso del tiempo y las distancias en el espacio con relojes reales (puede llamarse reloj a cualquier fenómeno que transcurra en el tiempo con cierta periodicidad); también versa sobre como éstas mediciones se distorsionan en presencia de objetos con mucha materia (o energía). (Habréis oído hablar de las dos relatividades, la relatividad especial y la general: la primera es solamente un caso particular de la segunda cuando se pueden despreciar las distorsiones debidas a grandes acumulaciones de materia; nosotros vamos a hablar en todo momento de la situación más general). La teoría de la relatividad nos dice, por ejemplo, cómo unos relojes adelantan o atrasan en relación a otros relojes igualmente contruidos, tan sólo por seguir distintas trayectorias en el espacio (imaginad distintas naves espaciales, cada una con su reloj de a bordo). De hecho, se puede llegar a la teoría de la relatividad razonando exclusivamente sobre experiencias con relojes. Como seres mortales que somos,

el tiempo siempre ha sido una constante en el pensamiento humano. La teoría de la relatividad nos habla del devenir del tiempo; si a esto le añadimos que la teoría se presenta formulada matemáticamente en términos intuitivos al usar nociones de geometría, y que Albert Einstein, su creador, ha sido elevado a una categoría mística como poseedor de una mente superior, no es de extrañar que nos fascine cualquier alusión a la relatividad.

En todos los razonamientos con la medida del tiempo que conducen hacia la relatividad, siempre hay una suposición implícita: independientemente del comportamiento concreto de un reloj (si adelanta o atrasa con respecto a otros, etc.), siempre podemos saber la posición de sus agujas en un momento dado con precisión arbitraria. Sin embargo, toda la experiencia acumulada ensayando con diversos sistemas en laboratorios nos induce fuertemente a pensar que la naturaleza **no satisface esta suposición fundamental.** Razonemos un momento, primero, ¿qué queremos decir con la frase *la posición de las agujas*? Una aguja siempre tendrá un grosor, por pequeño que sea, y ¿cómo calculo entonces a qué punto concreto de la esfera apunta?

Para calcularlo con infinita precisión tendría que mirar la punta de la aguja usando una lupa de infinitos aumentos; pero conseguir una lupa así ¿no es imposible? Hagamos al menos el esfuerzo de fabricar una lupa tan poderosa que nos permita calcular qué hora marca el reloj con una imprecisión máxima de, digamos, un microsegundo por arriba o por abajo. Esto es equivalente a usar en vez de un reloj de agujas un reloj digital que de un "tic" cada microsegundo. Una vez que tengamos construida la lupa o el reloj digital anterior, empecemos a construir otra lupa u otro reloj digital con diez veces más precisión, una décima de microsegundo; cuando terminemos estos, empecemos a construir otros de mayor precisión, y así sucesivamente. Resulta obvio que cuando intentamos construir relojes con mayor y mayor precisión (menor y menor separación entre sus "tics"), tenemos que recurrir a ingeniosos sistemas basados en propiedades de la materia en escalas atómicas y subatómicas. Sin embargo, sabemos que los objetos que pueblan estos mundos microscópicos no se comportan de la forma a la que estamos acostumbrados con los objetos cotidianos de nuestro mundo, el mundo macroscópico. Después de muchos años de experimentación con el mundo microscópico, en los años veinte se llegó al establecimiento de unas reglas de comportamiento consistentes con las observaciones: estas reglas corresponden a lo que se da en llamar mecánica cuántica. Una de estas reglas, llamada de complementariedad, nos dice que algunos descriptores de un sistema físico (su tamaño, su velocidad, etc.) son complementarios, de tal forma que conocer con

precisión el valor de un descriptor implica desconocer ampliamente el valor de su descriptor complementario. Resulta que el descriptor *duración de un proceso* (tiempo) y el descriptor *cantidad de energía en el sistema* (energía) son complementarios: alcanzar una precisión más y más grande en la medida del tiempo conlleva que desconozcamos en mayor y mayor medida la energía que posee el sistema que está siendo utilizado como reloj. Pero la teoría de la relatividad nos dice que el discurrir del tiempo en un lugar se ve afectado por la presencia de grandes acumulaciones de energía cercanas. Por lo tanto, utilizar relojes cuánticos para razonar en relatividad nos lleva a concluir que medir el tiempo con precisión conlleva tener una gran imprecisión en la energía del dispositivo, y por consiguiente, una gran imprecisión en el propio discurrir del tiempo: **parece resultar imposible medir el tiempo con total precisión**. De hecho, estos razonamientos nos conducen a la existencia de un límite absoluto a la precisión que puede alcanzar un reloj, lo construyamos de la forma que lo construyamos. Esta precisión máxima se llama habitualmente *tiempo de Planck* y se puede estimar, dando como resultado 10^{-44} segundos, una centésima de septillonésima de segundo (este es un número extraordinariamente pequeño que corresponde a dividir un segundo en 100 millones de millones de millones ..., y así siete veces, de partes; por supuesto, la precisión alcanzada por los mejores relojes atómicos construidos hasta el momento, 10^{-17} o 10 trillonésimas de segundo, está muy lejos de llegar al valor límite). Los mismos razonamientos pueden apli-

carse a la medida de distancias: también parece haber una precisión máxima alcanzable. Cuando consideramos procesos físicos que involucran distancias o tiempos de evolución grandes con respecto a los límites fundamentales, la teoría de la relatividad sigue teniendo todo su sentido, pero como teoría aproximada: podemos imaginar el mundo como un ente geométrico con toda la información sobre el devenir del tiempo y las distancias entre sus distintos lugares. Nuestra descripción del mundo cuando consideremos en vez procesos con escalas de variación en el espacio y en el tiempo cercanas a los límites de resolución, tiene que ser muy diferente a la que nos proporciona la teoría de la relatividad. Aunque hasta la fecha no se ha conseguido explorar experimental u observacionalmente la estructura del espacio ni la del tiempo con las precisiones requeridas (los augurios sobre la posibilidad de hacerlo en el futuro cercano son muy halagüeños, sin embargo), encontrar una descripción cuantitativa y consistente de esta nueva naturaleza del espacio y el devenir del tiempo se ha convertido en uno de los mayores y más apasionantes retos de la ciencia contemporánea. Pero, ¿cómo hace uno para enfrentarse a tamaño problema? Pues no sé, cada cual hace lo que puede con su imaginación y, sobre todo, aprovechando la imaginación de otros muchos compañeros de viaje en el mundo. Qué, ¿te unes?

Carlos Barceló (IAA)

Mecánica Cuántica y Gravitación

hacen referencia a una descripción probabilística y operacional, radicalmente diferente al medio geométrico en el que estamos acostumbrados a desenvolvernos.

Pero antes de nada hay que resaltar que se trata de una comparación poco noble que relaciona una teoría muy elaborada, basada en más de cien años de geometría (riemanniana), con una incipiente teoría cuántica que se apresura, en los años 20, a incorporar a la Física el enten-

Existe un sentimiento bastante generalizado de que la Mecánica Cuántica y la Gravitación son difícilmente reconciliables, por no decir incompatibles. Esto se debe al fuerte contraste entre la espectacularmente elegante formulación de la

gravitación dentro del marco de la Relatividad General, tal como fue formulada por Einstein en 1916, y una Mecánica Cuántica constituida por un número considerable de postulados y prohibiciones (reglas de selección) que

dimiento de nuevos resultados experimentales aparentemente incompatibles con nuestra razón. Ahora, desde el siglo XXI, aunque sea empezando, podemos reexaminar con mayor perspectiva la situación de estas dos formulaciones y, en especial, la compatibilidad de la Mecánica Cuántica y la Gravitación en vías de la constitución de una Gravedad Cuántica. Hay que insistir en que los fenómenos cuánticos conocidos hasta el momento hacen referencia a las otras interacciones, que no precisamente a la gravedad, y que la necesidad de una cuantización de la gravedad no ha sido constatada experimentalmente por el momento.

Efectivamente, hasta finales de los años 60 no existía otro tratamiento de los fenómenos cuánticos que lo que se conoce como "cuantización canónica", que es la mecánica cuántica que se estudia en los libros de texto. Estos suelen ocultar que tal formulación sólo es apropiada para tratar determinados sistemas dinámicos que gozan de unas características muy especiales, y el campo gravitatorio no es, precisamente, uno de ellos. Pero hay otros muchos sistemas donde la cuantización canónica o estándar tampoco es aplicable.

Después de los 60 se planteó una alternativa a la cuantización canónica desde el marco matemático de la geometría (diferencial). La Cuantización Geométrica, como se denominó, asume la tarea de extender la impecable formulación geométrica de la Mecánica Clásica (formulación que lleva el nombre de Cartan) a la Mecánica Cuántica mediante la ampliación del espacio de coordenadas y velocidades (o espacio de fases) clásico M con una dimensión extra cerrada, es decir, con la circunferencia S^1 . Este espacio unidimensional se puede interpretar como una trayectoria del grupo de transformaciones de fase, esto es, producto por un número complejo de módulo uno ($e^{i\alpha}$), bajo el cual la descripción cuántica, mediante la función de onda ψ , debe quedar invariante. Esto es consecuencia del requerimiento de normalización de la densidad de probabilidad (de presencia) $|\psi|^2=1$.

El nuevo espacio extendido, o variedad cuántica Q , reproduce el espacio clásico al unir o identificar en él puntos que sólo difieren en una fase. En una primera aproximación, que se denomina precuantización y se corresponde con la aproximación de Bohr*, la teoría posee el mismo grado de precisión matemática y belleza estructural que la Mecánica Clásica que

generaliza, siendo la diferencia esencial que ahora existe una ecuación de movimiento adicional, para la nueva variable z , y que la función lagrangiana de la que se derivan las ecuaciones de movimiento, mediante un principio variacional, se modifica también para dar cuenta de esta nueva ecuación. Pues bien, esta lagrangiana modificada incorpora objetos geométricos (que constituyen lo que se denomina una "conexión") análogos a los que definen el campo gravitatorio, en el caso de la Relatividad General, o el campo electromagnético, en el caso del Electromagnetismo. Más aún, toda la estructura matemática de la Cuantización Geométrica es absolutamente paralela, por no decir formalmente análoga, a la de las teorías de la interacción por intercambio de partículas como el fotón (lo que se conoce como "Teorías Gauge"). De modo que si la Gravitación se describe como una teoría de este tipo (asociada a la invariancia bajo el subgrupo de traslaciones del grupo de Poincaré, en el mismo sentido que el Electromagnetismo está asociado a una invariancia de fase), en la que la partícula que se intercambia es el gravitón, se puede decir que la Mecánica Cuántica (en esta primera fase de Precuantización al menos) y la Gravitación están soportadas por una misma estructura matemática.

Es claro, no obstante, que la Cuantización Geométrica propiamente dicha, es decir, la versión exacta, requiere un proceso posterior de reducción de los argumentos de la función de onda ψ , que en el proceso de precuantización es una función de x y de p , para que sólo dependa de una de ellas (y la realización de los operadores cuánticos sea, de este modo, irreducible). Este proceso, denominado "polarización" de la función de onda requiere ir un poco más allá de la Geometría y , por tanto, de la intuición, para adentrarse en una estructura más algebraica, que se aleja ya de los conceptos típicos de punto, trayectoria, superficies, etc. (sobre todo en los casos en los que aparecen "anomalías"). Pero el recurrir al álgebra para describir propiamente los espacios(-tiempos) es algo que, por una parte, lo inventó la propia Geometría, en tiempos no muy recientes (nombres relevantes en este sentido son Gelfand, Naimark, grupo Bourbaki...) para la caracterización intrínseca de los espacios tridimensionales cerrados (y sin borde) y, por otra, al menos a mi juicio, está sugerido por la propia Relatividad General, que clama la existencia de una singularidad en el comienzo de la evolución del Universo, lo que se conoce como

Big-Bang. Esta singularidad podría mantenerse, como es costumbre en la descripción clásica y tradicional, al margen de la Física, pero cabe pensar también en un posible intento de aproximación al estudio de lo que clásicamente llamamos singularidad, desde un punto de vista cuántico. En este caso, naturalmente, el lenguaje de la pura geometría resulta seriamente inapropiado. Y hay que insistir que es la propia Relatividad General quien nos lleva a una tal "singularidad".

Y esta compatibilidad de la estructura matemática de la (pre)cuantización geométrica (o generalizaciones posteriores) y la gravedad, como teoría gauge, antes comentado, puede llevarse aún más lejos si uno llega a asumir que la invariancia de fase, inherente a la variedad cuántica Q , coincide con la invariancia de fase que da lugar al Electromagnetismo como teoría gauge. En tal caso, lo que se obtiene de un modo relativamente sencillo es una mezcla no trivial de la Gravedad y el Electromagnetismo. En esta formulación, cuerpos muy masivos en rotación producirían un campo electromagnético aun sin estar cargados.

Así pues, podemos concluir con un nuevo sentimiento de que existe un esquema estructural en el cual la Mecánica Cuántica y la Gravedad, no sólo no son incompatibles, sino que pueden entrelazarse de un modo que, creo yo, harían estremecer al propio Einstein, a él, que luchó desesperadamente por unificar la Gravitación y el Electromagnetismo**, y que trató de entender la estructura (¿geométrica?) de la Mecánica Cuántica, aunque recibiera el Premio Nobel por el Efecto Fotoeléctrico, un fenómeno cuántico por excelencia, y fuera el primero en establecer el fotón como partícula cuántica.

**Esta aproximación coincide con las primeras reglas empíricas de cuantización que fueron establecidas por Bohr para "explicar" el átomo de hidrógeno.*

***En efecto, el subgrupo de traslaciones de la variedad cuántica Q produce por conmutación con una transformación de cambio de velocidad -transformación de Lorentz- una transformación de fase. De este modo, si "gaugeamos" el subgrupo de traslaciones para producir un campo gravitatorio, un cambio de velocidad induce un campo electromagnético.*

Más de 80 científicos de todo el mundo se dieron cita en la localidad granadina de Salobreña, con motivo del congreso "8th Conference on Electromagnetic and Light Scattering by Nonspherical Particles"

La importancia de las partículas

El Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), en colaboración con el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, organizó un congreso que, entre los días 16 al 20 de mayo, reunió a un numeroso grupo de científicos especializados en el estudio de la dispersión de la luz por partículas no esféricas. La reunión, que tuvo lugar en el Hotel Salobreña (Salobreña, Granada), se inauguró el lunes 16 a las 8:30 con un discurso introductorio de Fernando Moreno, científico del IAA y Presidente del Comité Organizador.

La conferencia, que tomó el relevo de otras reuniones similares celebradas en Bremen (2003), Gainesville (Florida, 2002) o Halifax (Canadá, 2000), buscaba aunar aspectos experimentales y teóricos en el estudio de la dispersión de la luz por partículas no esféricas. Se trata de conocer a fondo la interacción entre las partículas y la luz, un estudio muy importante en astronomía: la luz, desde el objeto que la emite, atraviesa diferentes medios, compuestos de gas o polvo (partículas), de modo que nos llega siempre modificada. Si bien la interacción de la luz con el gas es bastante conocida, los efectos de las partículas aún presentan enigmas cuya resolución permitirá obtener información sobre la fuente que emite la luz y sobre las propias partículas que la modifican. Concretamente, el congreso trató de las partículas irregulares (o no esféricas), el tipo más abundante - de hecho, apenas existen partículas totalmente esféricas- y cuyo estudio muestra mayor complejidad.

Aunque la aplicación de estos estudios en astronomía es obvia, se trata de una investigación con un marcado carácter interdisciplinar, que cuenta con aplicaciones en otros campos, como la electromedicina o el estudio del cambio climático.

8th CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC AND LIGHT SCATTERING BY NONSPHERICAL PARTICLES

Salobreña, Granada, Spain

May 16-20, 2005

Hosted by the Instituto de Astrofísica de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, in collaboration with the Departamento de Física Aplicada, Universidad de Granada, Spain

SCIENTIFIC PROGRAM

The conference encompasses all experimental and theoretical aspects of single and multiple scattering of electromagnetic radiation by nonspherical and heterogeneous particles. In the conference we intend to focus particularly on:

- optical particle characterization
- dust in astrophysical environments
- scattering by surfaces, with particular attention to atmosphereless Solar System bodies
- atmospheric applications
- computation of electromagnetic scattering by numerical techniques
- experimental setups for electromagnetic scattering measurements

Speakers:

Invited speakers:

Local Organizers:

Local Organizers:

For more information: <http://www.iaa.csic.es/~confels8>

El apasionante final de la vida de las estrellas

El Instituto de Astrofísica de Andalucía, en colaboración con el EU Consortium RadioNet, organizó un congreso que se celebró los días 13 al 15 de abril y que acogió a numerosos expertos en el estudio de las últimas fases de la vida de las estrellas. La reunión, que tuvo lugar en el salón de actos del Instituto de Astrofísica de Andalucía, forma parte del "RadioNet Scientific Workshop Program", un proyecto que pretende mejorar la calidad y la cantidad de las investigaciones científicas realizadas por los radioastrónomos europeos.



El programa de "Stellar end products" se dividió en varias sesiones, que se centraron en los diferentes "productos" a los que puede dar lugar la muerte de las estrellas: las nebulosas planetarias, los púlsares, las supernovas y sus remanentes, los objetos compactos en sistemas binarios y las explosiones de rayos gamma. Si bien el congreso mostró especial énfasis en los estudios de la evolución estelar a través de observaciones en radio, también dio cabida a un buen número de contribuciones relacionadas con la investigación en otras bandas del espectro electromagnético, como los rayos X.

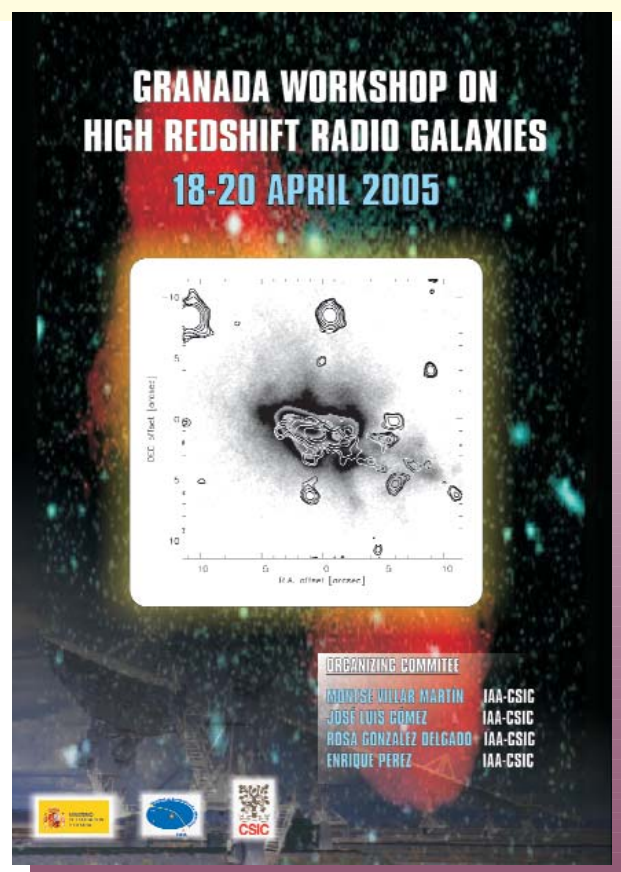
El congreso, ideado para favorecer la discusión científica, constituyó un escenario que dio cabida tanto a los aspectos que escapan a la actual comprensión de la evolución estelar como a los medios de enfrentarse a ellos con la presente y futura generación de telescopios. Igualmente, buscó la relación del objeto de estudio, las últimas fases de la evolución estelar, con otros campos de la astrofísica.

Granada Workshop on High Redshift Radio Galaxies, 18 al 20 de abril 2005

Galaxias muy, muy lejanas

El Instituto de Astrofísica de Andalucía acogió, entre los días 18 al 20 de abril, una reunión sobre radiogalaxias de alto desplazamiento al rojo (o HzRG, de "high redshift radio galaxies") que se enmarca en un ciclo que comenzó hace unos años en el Observatorio de Leiden. La cita en Granada se convocó dos años después del último "Leiden Workshop", celebrado en junio de 2003, con la intención de presentar y discutir los resultados recientes realizados en el campo de las radiogalaxias de alto corrimiento al rojo (o radiogalaxias muy lejanas).

Aunque la reunión se enfocó en las HzRG, también dedicó su atención a otros temas que tienen una importancia directa para el entendimiento de dichas galaxias lejanas. Con un máximo de cincuenta invitados, el workshop se diseñó para propiciar la discusión y el debate.



CONFERENCIAS DE DIVULGACIÓN EN EL IAA

<http://www.iaa.es/~silbialo/charlas.html>

FECHA	CONFERENCIANTE	TEMA O TÍTULO TENTATIVO
28 de abril	Dr. Lucas Lara (Univ. de Granada)	El Universo: equilibrios en el caos
2 de junio	Dr. Jesús Gallego (Univ. C. de Madrid)	Galaxias lejanas: Mirando el pasado del Universo
23 de junio	Dr. Jose Carlos del Toro (IAA)	IMAX: La vuelta a la Antártida en quince días

LIBROS DE DIVULGACIÓN

Cielo y tierra. De lo visible, lo invisible. A. Renshaw (Ed.) (Phaidon, 2004).

No digas a Dios lo que tiene que hacer. Einstein, la novela de una vida. F. de Closets (Anagrama, 2005)

Mis ideas y opiniones. A. Einstein (Traducción A. Goldar, Bon Ton, 2002)

Todo sobre Einstein. C. Phillips & S. Priwer (MaNonTroppo, 2004)

Lo que Einstein contó a sus amigos. La ciencia es divertida. R.L. Wolke (MaNonTroppo, 2005)

Relojes de Einstein, mapas de Poincaré. P. Galison (Crítica, 2005)

Einstein. D. Brian (Acento Editorial, 2005)

Cien años de relatividad: los artículos clave de Albert Einstein de 1905 y 1906. A. Einstein (Traducción A. Ruiz de Elvira, Nivola libros y Ediciones S.L., 2004)

Sobre la teoría de la relatividad especial y general. A. Einstein (Traducción M. Paredes, Alianza Editorial S.A., 2002)

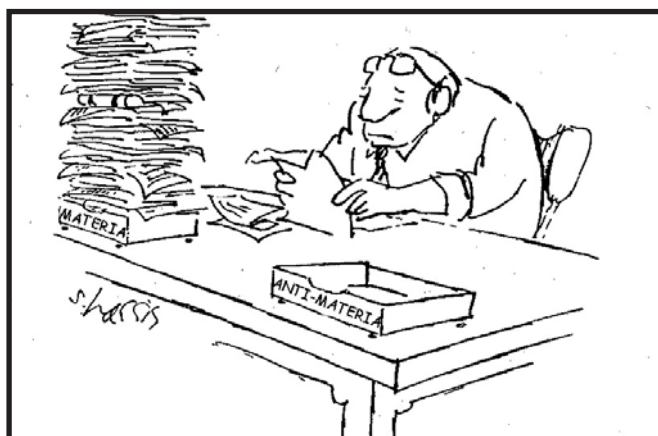
Notas autobiográficas. A. Einstein (Traducción M. Paredes, Alianza Editorial S.A., 2003)

Locos por las matemáticas. I. Stewart (Crítica, 2005)

Pioneras españolas en las Ciencias. C. Magallón Portoles (CSIC, 2004)

Descubrir la Luna. Guías de Astronomía. (Larousse, 2004)

HUMOR ASTRONÓMICO



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 Cristina Torrededia (Tel.: 958 12 13 11; e-mail: ctr@iaa.es).