

Revista de española FÍSICA

UNA PUBLICACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA
www.rsef.es Volumen 29 • Número 4 • 2015

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

© NASA, ESA, and Johan Richard (Caltech, USA). Acknowledgement: Davide de Martin & James Long (ESA/Hubble)

- Un monográfico dedicado al 100 Aniversario de la Relatividad General que también incluye:
- Noticias, Hemos Leído Que, Puntos de Interés

- Reseñas
- Comentario Invitado: Premio Nobel de Física 2015
- Entrevista con el Presidente de la COSCE



Real
Sociedad
Española de
Física

R.S.E.F.

REVISTA DE FÍSICA (RdF)

www.revistadefisica.es

Es una publicación de la Real Sociedad Española de Física, que es miembro de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física (FEIASOFI) y de la European Physical Society (EPS) y mantiene acuerdos con la American Physical Society (APS) y otras sociedades científicas. El equipo de dirección, que no se hace responsable del contenido de los trabajos que aparecen firmados, agradece a los autores su contribución voluntaria

Directora:

Rocío Ranchal (UCM)

Subdirectores:

Alejandro Arenas (URV)

Saúl Ares (UC3M)

Marcos López-Caniego (ESA)

Secretaría de redacción:

Itziar Serrano

Consejo editorial:

Eduardo Battaner (UGR)

Pablo Brañas (Business School, Univ. London)

Antonio Fernández-Rañada (UCM)

Julio Güémez (UC)

Eloísa López (UCM)

Jorge Mira (USC)

Ricardo Moreno (IES)

Javier Ordóñez Rodríguez (UAM)

José M.^a Ortiz de Zárate (UCM)

Juan M. Rodríguez Parrondo (UCM)

Patricia Román (UGR)

José Luis Sánchez Gómez (UAM)

Colaboradores especiales:

Aurelia Alonso (UPM)

Andrés Cassinello (IES Emilio Castelar)

Isabel Gonzalo (UCM)

Amaya Moro (CSIC-Princeton)

Minia Manteiga (UAC)

Luis Navarro (UB)

Ignacio Pagonabarraga (UB)

Composición y edición:

Disegraf Soluciones Gráficas, S. L.

<http://www.disegrafsl.es>

Entidades patrocinadoras de la Real Sociedad

Española de Física:

Universidad Complutense de Madrid

Fundación BBVA

CIEMAT

Ministerio de Educación, Cultura y Deporte

Sidilab

La Revista de Física se publica a razón

de cuatro números por volumen anual,

por la Real Sociedad Española de Física

Depósito Legal: M-20734-1986

Precio de cada ejemplar: 12 €

ISSN: 0213-862X

Real Sociedad Española de Física

Facultad de Ciencias Físicas-UCM

Plaza de las Ciencias, 1

28040 Madrid

<http://rsef.es>

Para temas relacionados con la RdF:

revista.de.fisica@rsef.es

Tel.: 91 394 4359/50 **Fax:** 91 394 4162

Para enviar artículos o colaboraciones consultar la página web de la Real Sociedad Española de Física en el apartado de Normas de Publicación

ÍNDICE

1 Editorial. Un pasito atrás, Joaquín Marro

Monográfico

2 Cien años de mocedad. José M. M. Senovilla

4 Relatividad General y Matemática. Marc Mars

9 Einstein ¿sigue teniendo razón? Nicolás Yunes

14 Ondas gravitacionales: mensajeras del universo. Gabriela González y Alicia M. Sintes

19 Cosmología Relativista. Mar Bastero-Gil

24 Astrofísica Relativista. José A. Font

29 La relatividad numérica. Miguel Alcubierre

34 Agujeros negros, sus análogos y termodinámica. Carlos Barceló

40 Gravedad cuántica de lazos. Jorge Pullin

Temas de Física

45 Encuentros en la Tercera Fase: Una tarde de Ciencia y Cine. Alberto Bollero

47 XXXV Reunión Bienal de la RSEF. Gijón acoge por vez primera la Bienal de la RSEF. Pedro Gorria y Jorge Pisonero

51 25.º Encuentro Ibérico de la Enseñanza de la Física. Verónica Tricio Gómez y Paloma Varela Nieto

53 Puntos de interés

53 Un castigo para escapar de la tragedia

53 Magnetismo de tierras raras

54 Termitas y cambios de fase

55 Láseres orgánicos versátiles, compactos y eficientes

55 Comunicación eléctrica en bacterias

Comentario invitado

57 Premio Nobel de Física 2015. T. Kajita y A. B. McDonald. El descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos. Juan José Hernández Rey

62 Una entrevista informal con Nazario Martín, por Rocío Ranchal

65 Hemos leído que...

La Física según nuestros autores

69 El mundo después de la revolución. La física de la segunda mitad del siglo xx

71 Mecánica cuántica

72 Disciplinas, Saberes y Prácticas

Reseñas de libros de interés

74 Boomerang Rojo

Premio Nacional de Ensayo 2015

75 Semblanza de José Manuel Sánchez Ron. La pasión tranquila. Javier Ordóñez

Noticias

76 XLVI Olimpiada Internacional de Física

77 XX Olimpiada Iberoamericana de Física

79 Josep Fontcuberta, "Distinguished Lecturer" de la IEEE Magnetics Society

79 Maxi San Miguel recibe la Senior Scientific Award 2015 de la Complex Systems Society

En portada, Abell 2218 (ESA/Hubble), un cúmulo de galaxias distante unos 2 mil millones de años-luz. Actúa como una poderosa lente gravitatoria, deformando las imágenes de las galaxias tras el cúmulo, estirándolas en arcos que rodean su centro, y también produciendo imágenes múltiples de algunas de ellas. En 2004 Abell 2218 permitió, debido al efecto de magnificación que ejerce, identificar la galaxia más vieja conocida hasta entonces, a unos 13 mil millones de años-luz, por ello captada cuando el Universo tenía "sólo" 750 millones de años de edad. El efecto de lente gravitatoria es una de las más sorprendentes y útiles predicciones de la Relatividad General, cuyas ecuaciones se encuentran sobre-impresionadas en la portada. Estas ecuaciones fueron comunicadas por Albert Einstein a la academia prusiana de ciencias el 25 de noviembre de 1915, por lo que en este número celebramos su centenario.

Editorial

Un pasito atrás

Joaquín Marro

Hace más de dos años, a poco de debutar como Editor General de la RSEF, informaba en nota editorial que, al amparo de nuestros Estatutos, pasaba a hacerme cargo efectivo —decía que “circunstancialmente”— de la dirección de esta revista. He sido desde entonces acompañado y completado por Rocío Ranchal como subdirectora encargada de coordinación. Con su generosa aceptación de mi egoísta oferta de colaboración, hemos ido desarrollando ese propósito —que, implícito o explícito en editores y directores anteriores, inmediatamente hicimos nuestro— de convertir esta revista en *el* magacín de la física en español. Se ha evolucionado así hacia un formato más casual y amigable con un contenido que, centrado en información sobre nuestra comunidad y en la divulgación científica, venimos organizando en reseñas varias y en las secciones *Temas de Física* y *Noticias* a las que sumamos otras como *Puntos de Interés*, *Hemos Leído Que*, *Mi Clásico Favorito*, *Notas de Clase*, *Pulsos e Impulsos*, *Entrevista Informal*, *Nodos de la Física*, y *Comentario Invitado*.

Quiero confesar aquí que hoy estoy razonablemente satisfecho de que *la Revista* ya refleja bien, con tono y nivel que me parecen apropiados, parte sustancial de la actividad en la física española y, como nos confirmáis socios RSEF y curiosos, de que se lee con interés. Los medios disponibles son escasos, sin embargo, y no veo fácil plantear un nuevo objetivo de calidad que no esté basado en el mero voluntarismo de la comunidad afectada. Sigue siendo posible extender el ámbito de la *Revista* por la América y otros lugares de habla española, adaptando entonces el contenido adecuadamente, pero esto inevitablemente requiere medios que, dado el campo de acción más limitado de la RSEF, habría que buscar en patrocinios externos.

Con estas dudas e ilusiones, he comunicado al Presidente y a la Junta de Gobierno que, interrumpiendo aquella excepcionalidad, procedía a consolidar y perfeccionar el equipo de dirección de la *Revista*. Rocío Ranchal (UCM) pasa así a dirigirla en colaboración con los subdirectores Alex Arenas (URV), que ya viene aportando su experiencia como editor en el campo de la física internacional, Saúl Ares (UC3M), que lleva un año con el encargo de dar cuenta en la *Revista* y en la red de la actividad más sobresaliente de nuestra comunidad y de noticias relacionadas, y Marcos López-Caniego (ESA), que se incorpora ahora como adjunto a la dirección para mejorar el procesado de las contribuciones. Este equipo seguirá contando con la valiosísima labor de Itziar Serrano como secretaria de redacción. Con este nuevo esquema, yo

doy un paso atrás para ganar perspectiva y tratar de identificar otros objetivos viables. Y pronto completaremos esta mejora revitalizando el Consejo Editorial.

Nos conviene a todos recordar que, como se dice en la web: “dedicada a los aspectos académico, pedagógico y social de la Física, la Revista es un canal de comunicación que quiere servir de puente entre los sectores implicados, proponiéndose: (i) ayudar a formular y debatir ideas y a discutir problemas; (ii) propagar conocimiento y sentimiento científicos, la afición por la Física y el reconocimiento social de la Ciencia; y (iii) facilitar la comunicación entre políticos, empresarios, estudiosos, investigadores, profesores, gestores y otros, favoreciendo el acceso de todos a nuevas ideas y tendencias y acercando enseñanza, investigación y las demás actividades profesionales de los físicos. En definitiva, quiere ser el más eficaz instrumento en su idioma al servicio de todos los interesados por la Física”. Para ello: “la Revista procurará entretener y divertir publicando noticias y artículos (encargos del Consejo Editorial o contribuciones sometidas a revisión por pares) de alta calidad y gran interés informativo y/o pedagógico que traten de Física, de temas en sus crecientes fronteras con otras disciplinas, particularmente biología, economía y sociología, o del papel de la Física en la sociedad y en la economía”. Y sigue: “facilitará información promoviendo la crítica, favoreciendo la formación y generando material que pueda ser usado por alumnos y profesores con esos objetivos”.

Escribí aquí hace dos años: “está claro que este proyecto requiere la implicación de todos, o no conseguiremos implementarlo con la necesaria eficacia. A cambio, podemos llegar a tener una revista atractiva y próxima que luego podríamos plantearnos el proyectarla por otros países con nuestra misma lengua”. Sigue siendo oportuno, pero he de añadir que hemos contado con esa implicación y que, en efecto, se nos abren nuevas e ilusionantes metas.

Poniéndome a vuestro servicio, insisto en pedir la colaboración efectiva y generosa de todos vosotros en este empeño.



Joaquín Marro
Profesor Emérito, UGR

Cien años de mocedad

José M. M. Senovilla

© ESO

Cuando Mercurio pase por su afelio —el 25 de noviembre—, se cumplirá un siglo ¡en el sistema de referencia terrestre! de la publicación de las ecuaciones de la Teoría General de la Relatividad (RG). Ese afelio se observará con un desplazamiento que excede en $0,0119^\circ$ a lo previsto, como predijo Einstein justo una semana antes con exquisita precisión.

Así empezó la RG, y así siguió: cien años de radical novedad y de asombroso acuerdo con la realidad observada. Construida por el puro intelecto, es una teoría extraordinaria ya que su creador apenas pudo guiarse por hechos experimentales previamente inexplicados. Su excepcionalidad radica en un nacimiento por razones (físicamente) estéticas, igualitarias o de justicia. Su éxito, en su tozuda superioridad para explicar los hechos observados.

La teoría se erige sobre el *principio de equivalencia*, una idea feliz, sencilla pero muy poderosa, que interpretó la “milagrosa” coincidencia entre masas inerciales y gravitatorias. Nada de milagros: aceleraciones y campos de gravedad son, localmente, indiscernibles. El genio intuye: póngase en caída libre y no sentirá su propio peso. Ergo la gravedad es escurridiza, sólo parece tener una existencia *relativa*. ¡Localmente!

Las consecuencias de ello son desbordantes y muy sorprendentes. Quizás su implicación más profunda es la geometrización del campo gravitatorio: las masas deforman la geometría a su alrededor, los cuerpos siguen trayectorias acordes con la curvatura del espacio-tiempo. Estos son efectos no locales: aunque la gravedad puede considerarse *localmente* ilusoria, su entidad real se manifiesta no localmente mediante dicha curvatura. Las centenarias ecuaciones que celebramos rigen con precisión cómo una distribución material crea la curvatura/gravedad a la par que ésta gobierna el movimiento de la materia, que a su vez produce curvatura... Un bucle, ¡ecuaciones no lineales! Por ello, el espacio-tiempo, su geometría, es una mera manifestación de la existencia de energía. O viceversa.

La gravedad afecta a todas las cosas, y todas ellas viven en el espacio-tiempo, por consiguiente la RG es, además, universal e imprescindible. Se adentra en lo más básico de la realidad, o de su descripción, resultando ser decisiva para la comprensión del mundo. Hoy en día sabemos que muchas otras teorías incorporan el principio de equivalencia y contienen la gravitación newtoniana. Sólo una, empero, supera todas las exigentes pruebas experimentales con honores. Adivinen cuál.

La RG predijo fenómenos insospechados medidos con cierta precisión en sus albores, como que la luz siente el

campo gravitatorio, o que el tiempo transcurre con diferente ritmo en puntos variados de un campo de gravedad. Esos efectos son diminutos en nuestro entorno por lo que, después de un asombroso inicio, la RG pasó a considerarse un alarde intelectual poco “falsable”. Su adolescencia fue harto difícil, como bien sabemos los que nos hemos dedicado a ella. Sí, hoy se emiten muchos elogios sobre tan maravillosa rama de la física, pero conviene no olvidar que fueron también muchos años de otredad. Una razón: su anticipación en casi un siglo.

No es descabellado preguntarse cuánto habríamos tenido que esperar sin la tenacidad e inspiración de Einstein: ¿10, 50, quizás casi 100 años? La gestación de la RG fue complicada, a veces traumática, requirió ayudas, estudios profundos, familiarizarse con ideas matemáticas recientes e innovadoras, y un lapso de casi 10 años. Mas, cuando las ecuaciones fueron finalmente alumbradas ese 25-N, parecía imposible siquiera pensar que algún día se pudieran resolver. ¡Ah!, pero la historia nos reserva bellas e inesperadas sorpresas. En menos de un mes —y además bajo circunstancias inenarrables— Karl Schwarzschild encontró la primera, y aún hoy más importante, solución exacta. ¡Asombroso!

Actualmente, sin embargo, los fenómenos anunciados por la RG son motor impulsor, así como útiles irremplazables, para la ciencia, la técnica y hasta los artefactos de uso diario. Muestra de esto último son los llamados GPS, esos curiosos aparatos; no funcionan sin conocer la RG. Como ejemplo de lo primero, las *lentes gravitatorias*, que permiten calcular la distribución de masa de (cúmulos de) galaxias, asentando en particular la sospecha de que existe *materia oscura* en el Universo, o también encontrar planetas extra-solares. En fin, como paradigma del desarrollo técnico, los sofisticados avances impulsados por la construcción y mejora de los colosales interferómetros diseñados para medir directamente la radiación gravitatoria.

Hay un surtido repertorio de entidades novedosas en la RG, como los *agujeros negros*, imprevistos astros extremos, poderosísimos a la vez que sencillos, ubicuos en el Cosmos. Insólitamente, parecen cubrir sus misteriosas intimidades interiores mediante una superficie, su horizonte de sucesos, que actúa como celoso censor para observadores externos indiscretos. O la constante cosmológica, minúscula a la par que influyente, responsable muy probablemente de la aceleración de la expansión universal. Porque, sí, el Universo se expande en una gigantesca explosión en curso, alias “Big Bang”, en perfecto acuerdo con lo que dictan las ecuaciones que hoy con-

memoramos. También hay una copiosa colección de consecuencias experimentales inexplicables sin la RG, la más notable el achicamiento continuado de la órbita en el sistema binario PSR B1913+16, una pérdida de energía que sólo puede entenderse como emisión de ondas gravitatorias. Muchas de ellas, junto con todo lo anterior y bastante más, lo encontrará el lector en las páginas que siguen, recopilación de artículos especialmente escritos para este monográfico cubriendo las líneas más importantes de investigación en gravitación, y escritos por un plantel de reconocidos expertos muy activos en el campo. Vaya aquí mi hondo agradecimiento a todos ellos por su magnífica labor.

En España la tradición relativista viene de lejos, y en el presente la comunidad gravitatoria es nutrida, variada, pujante y, sobre todo, enormemente reconocida internacionalmente. Valga como botón de muestra los congresos internacionales anuales *Spanish Relativity Meetings* (comúnmente conocidos como ERE) cuya próxima será la XXXIX edición, ampliamente valorados y gozando de una magnífica reputación mundial. Tanto los ERE, que son los encuentros de mayor calidad y de referencia en el ámbito europeo, como el núcleo de esa comunidad científica se articulan sobre la Sociedad Española de Gravitación y Relatividad (SEGRe), cuyas actividades pueden consultarse en su página www.segre.es.

En fin, no quiero obviar aquí un gran interrogante: subsiste un rompecabezas persistente, su resistencia a entenderse con la física *cuántica*, imprescindible también para explicar una cantidad ingente de fenómenos físicos. En ello estamos. Es muy posible que nos encontremos, por fin, en ideal disposición para despejar esta endemoniada incógnita. Tenemos al menos una pista fiable, la entropía S_{an} de un agujero negro en equilibrio:

$$S_{an} = \frac{\pi k_B c^3 A}{2G\hbar}$$

fórmula que a ningún físico deja indiferente. Reúne en amigable compañía la constante de Boltzmann k_B (física estadística), la velocidad de la luz en el

vacío c (relatividad), la constante de la gravitación universal G (gravedad), la constante de Planck \hbar (física cuántica), el área A del horizonte de sucesos (geometría), y el número π (matemáticas) para conformar dicha entropía (información y desorden). Todo en uno. No puede ser un milagro. Estamos, así, en una tesitura análoga a la anterior al principio de equivalencia. Necesitamos inspiración, unas gotas de lucidez. Somos optimistas. Un paso de gigante ocurrió un siglo atrás, nos apresuramos para el siguiente salto con resuelta determinación.

Acabo. La RG deja atrás su juventud y emprende su etapa adulta. Ha traspasado fronteras permeando la jerga habitual, dejando atrás su condición de “otra” para entrar de lleno en la física con mayúscula. Es indispensable para entender el contenido y la evolución del Universo así como los procesos astrofísicos y cosmológicos. Ha impulsado el nacimiento y desarrollo de las más modernas teorías físicas, estimulando las relaciones entre áreas semejantes. Su futuro se adivina brillante, especialmente cuando perdamos nuestra actual “sordera” gravitatoria: dado que todo gravita, se aparecerá ante nosotros el Universo, desconocido, novedoso y pleno. Henchido de nuevos luceros gravitatorios, de objetos apasionantes, hoy impredecibles, seguro que hartos sorprendentes. Acaso cambiará toda nuestra cosmovisión. ¿Alguien da más?

Cedo la palabra a mis colegas. En lo que sigue encontrarán maravillas, sorpresas, precisiones, ideas, diversión y mucha física de alto nivel. ¡No se lo pierdan! Pasen y lean.

José M. M. Senovilla
Física Teórica, Universidad del
País Vasco, UPV/EHU.



Relatividad General y Matemática

Marc Mars



La Relatividad General y la Geometría

Hace ahora cien años Albert Einstein publicó las ecuaciones fundamentales de la Relatividad General. Se ha dicho, y con razón, que Einstein se adelantó a su tiempo con esta teoría. Lo que debía consistir en una teoría de la gravedad compatible con la relatividad especial se convirtió, tras una ardua tarea, en un nuevo paradigma que convertía al espacio-tiempo en una entidad dinámica. La Relatividad General es, pues, mucho más que una teoría de la gravedad, puesto que cualquier proceso físico ocupa un espacio y dura un tiempo, lo que obliga a compatibilizar aquella teoría física que lo describa con la naturaleza dinámica del propio espacio-tiempo.

El pilar que permitió a Einstein concluir que la interacción gravitatoria debe describirse mediante la geometría del espacio-tiempo es el principio de equivalencia. Este principio hunde sus raíces en el notable hecho de que todos los objetos caen de la misma manera en presencia de un campo gravitatorio y, en su versión débil, establece la imposibilidad de distinguir mediante experimentos mecánicos a pequeña escala si un sistema de referencia se encuentra en caída libre o, por el contrario, es inercial en sentido newtoniano. Einstein elevó esta equivalencia mecánica a un principio válido para todas las leyes de la física (exceptuando la propia gravedad que, de forma automática, pasa a jugar un papel especial). Este principio conlleva, casi de forma deductiva, que la gravedad debe ser una manifestación de la curvatura del espacio-tiempo, es decir, venir descrito por una variedad cuadridimensional dotada de una métrica de tipo lorentziano.

La interacción que ha mantenido la Relatividad General con la Geometría Diferencial desde su formulación ha sido constante y de doble vía, pues no solamente la Relatividad General ha explotado resultados propios de la Geometría Diferencial, sino que también ha contribuido de forma notable a su avance. No obstante, las naturalezas distintas de ambas teorías, una física y otra matemática, y los distintos métodos y usos de ambas disciplinas han constituido a menudo un obstáculo para fomentar dicha interacción. En las últimas décadas, y a través de la creación de lazos estables y duraderos entre comunidades de físicos y matemáticos dedicados a la Relatividad General, se ha realizado un esfuerzo notable para minimizar o eliminar dichos obstáculos. El resultado ha sido el nacimiento de una nueva disciplina que se ha venido en llamar Relatividad Matemática y cuyo objetivo consiste

en abordar y resolver de manera rigurosa problemas de Relatividad General con motivación física clara y relevante, así como interesantes desde un punto de vista matemático.

El objetivo de este breve artículo es presentar algunos de los resultados más notables en esta área y proporcionar una idea, necesariamente somera, de algunos de los problemas que se están abordando en la actualidad.

Las ecuaciones de Einstein

A grandes rasgos, los problemas en Relatividad General se pueden separar en dos bloques. El primero consiste en estudiar problemas físicos (gravitatorios o no) y geométricos en espacio-tiempos cuya métrica está fijada a priori. El segundo tiene como objetivo fundamental determinar métricas (o mejor, espacio-tiempos) que describan campos gravitatorios relevantes. Para ello resulta necesario disponer de las ecuaciones del campo gravitatorio, que en Relatividad General son las ecuaciones de Einstein. Las incógnitas son una variedad diferenciable cuadridimensional M y una métrica lorentziana g . Las fuentes externas del campo gravitatorio (es decir, todos los campos que poseen energía, excepto la propia gravedad) vienen codificados en el llamado tensor de energía-momento T . A cada métrica g se puede asociar una derivada covariante y un tensor de curvatura, o de Riemann. A partir del tensor de Riemann, se puede construir el llamado tensor de Einstein, $\text{Ein}(g)$, que es simétrico, 2-covariante y sin divergencia. Una combinación lineal con constantes de la métrica g y de $\text{Ein}(g)$ tiene estas mismas propiedades y, por un teorema debido a Lovelock, es el más general que las satisface si la dimensión del espacio-tiempo es cuatro. Las ecuaciones de Einstein son

$$\text{Ein}(g) + \Lambda g = \frac{8\pi G}{c^4} T, \quad (1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, G la constante de la gravitación de Newton y Λ es la constante cosmológica, cuyo valor experimental más reciente basado en observaciones cosmológicas es $\Lambda \approx 10^{-52} m^{-2}$.

Las soluciones con $T=0$ se llaman de vacío y en esta exposición nos centraremos por simplicidad en este caso. De hecho supondremos también que $\Lambda = 0$. La ausencia de fuentes externas no implica, en modo alguno, que el propio campo gravitatorio (es decir la curvatura) se anule y que la métrica sea la de Minkowski. La razón es doble. Por un lado el propio campo

gravitatorio posee energía, por lo que es fuente de sí mismo. Esta propiedad se manifiesta a nivel de las ecuaciones de Einstein en su no-linealidad. La segunda razón es que las fuentes pueden estar localizadas en singularidades del espacio-tiempo. De forma poco precisa pero intuitiva, una singularidad es una zona accesible desde el espacio-tiempo en la que alguna propiedad geométrica deja de estar bien comportada. El ejemplo paradigmático de solución de vacío singular es el espacio-tiempo de Schwarzschild, que posee simetría esférica y fue obtenido poco tiempo después de que Einstein publicara sus ecuaciones. Este espacio-tiempo es, en realidad, una familia dependiente de un parámetro m y que, en sus coordenadas esféricas habituales, presenta una singularidad en $r = r_s := 2mG/c^2$. Comprender que esta singularidad no era geométrica sino producto de la elección de coordenadas resultó ser una tarea difícil, que no se completó hasta 1960, cuando Kruskal y Szekeres obtuvieron una extensión (es decir, un espacio-tiempo mayor que contiene al anterior) de vacío y con simetría esférica en el que $r = r_s$ no presentaba comportamiento singular alguno. La métrica extendida sí era geoméricamente singular en $r = 0$. Durante largo tiempo se creyó que la existencia de espacio-tiempos singulares sólo podía ocurrir en situaciones altamente simétricas. Uno de los resultados fundamentales de la Relatividad General es que, muy al contrario, las singularidades son extremadamente comunes. Solamente es necesario que la energía de las fuentes externas del campo satisfagan condiciones adecuadas de positividad, que el espacio-tiempo no contenga patologías de tipo causal y que el campo gravitatorio sea suficientemente intenso en alguna región. La forma concreta que pueden tomar las condiciones anteriores es variada, lo que da lugar a diversos teoremas de singularidades, empezando por los resultados clásicos de Penrose y de Hawking-Penrose, y que siguen siendo investigados en la actualidad (para más detalles ver [8]). Una de esas condiciones, particularmente importante, es la existencia de una superficie atrapada, es decir una superficie espacial bidimensional cerrada con la propiedad de que, si emitimos dos haces de luz desde ella, uno hacia fuera y el otro hacia dentro, el área de sus frentes de ondas disminuye.

Una de las tareas fundamentales a desarrollar cuando se dispone de un sistema de ecuaciones es analizar el espacio de soluciones. Esta es una tarea muy difícil cuando se trata de ecuaciones no lineales y se vuelve aún más complicada para ecuaciones de tipo geométrico, como las de Einstein, y para las que cualquier sistema de coordenadas es igualmente válido a priori. Desde un punto de vista de ecuaciones en derivadas parciales, las ecuaciones de Einstein son ecuaciones de segundo orden no lineales para las diez componentes coordenadas $g_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 0, 1, 2, 3$) de la métrica. Estas ecuaciones son tensoriales, por lo que si tomamos una solución en un sistema de coordenadas y la



transformamos a otras coordenadas, obtenemos automáticamente una nueva solución. Aunque geoméricamente son el mismo objeto, como soluciones de las ecuaciones en derivadas parciales son completamente distintas. Resulta pues necesario identificar cuándo dos soluciones son, de hecho, la misma, lo cual introduce complicaciones notables en el problema. Una buena teoría física debe necesariamente ser predictiva, en el sentido de que, prescritos datos adecuados, las ecuaciones deben ser capaces de determinar unívocamente el comportamiento del sistema. Para ecuaciones de tipo evolutivo y de segundo orden como las ecuaciones de Einstein, los datos iniciales deben corresponder al valor del campo y su primera derivada temporal en un instante de tiempo. No obstante, por la naturaleza geométrica del problema no existe a priori un tiempo privilegiado y tampoco el concepto de primera derivada temporal tiene significado geométrico intrínseco. Resulta pues necesario, o bien geometrizar el problema y hacerlo independiente de las coordenadas, o bien ser capaz de dotar de significado geométrico intrínseco a las coordenadas que se estén utilizando. Desde un punto de vista histórico, el segundo método es el primero que se utilizó. En un trabajo que data de 1952 y que es, sin duda, uno de los hitos fundamentales de la Relatividad General, Yvonne Choquet-Bruhat demostró que las ecuaciones de Einstein de vacío son predictivas. Es decir, que dadas de forma adecuada una métrica y su primera derivada temporal en un instante de tiempo $x^0 = 0$, existe un espacio-tiempo de vacío generado a partir de ellos. Para fijar las coordenadas, y así resolver la complicación asociada a la naturaleza geométrica de las ecuaciones, Choquet-Bruhat añadió al sistema la condición de que cada una de las coordenadas x^α fuera solución de la ecuación de ondas con respecto a la métrica incógnita g . El sistema acoplado resultante permite demostrar que siempre existe una solución y que, además, es única en esas coordenadas.

<http://www.yelp.com/biz/albert-einstein-memorial-washington>

Como ocurre por ejemplo en electromagnetismo, en Relatividad General los datos iniciales no pueden ser prescritos arbitrariamente, sino que deben satisfacer un conjunto de ecuaciones de ligadura. Los datos a especificar son una variedad tridimensional Σ , una métrica definida positiva γ y un tensor simétrico 2-covariante K que satisfacen las ligaduras llamadas Hamiltoniana y de momento. La primera relaciona la curvatura escalar de γ con una expresión cuadrática y algebraica en K y la segunda impone que el tensor simétrico $K - (\text{tr}_\gamma K)\gamma$ sea sin divergencia (tr_γ significa traza con respecto a la métrica γ). Estudiar el espacio de soluciones de las ecuaciones de ligadura (tanto en su versión de vacío como en su generalización cuando hay otros campos físicos presentes) ha sido y sigue siendo una de las tareas principales de la Relatividad General (ver p. ej. [1]).

En su formulación abstracta, resolver las ecuaciones de Einstein con datos iniciales (Σ, γ, K) consiste en determinar un espacio-tiempo (M, g) de manera que Σ pueda ser insertada en M como una hipersuperficie cuya métrica inducida sea γ y cuya curvatura extrínseca sea K . Σ corresponde pues a “un instante de tiempo” de (M, g) mientras que γ y K corresponden respectivamente a la métrica espacio-temporal y a su primera derivada temporal en ese instante de tiempo. El teorema anterior de Choquet-Bruhat es local, ya que usa unas coordenadas específicas. Su versión global, de 1969, es otra piedra angular en Relatividad General y establece que dado una dato inicial que satisfaga las ligaduras (y sólo en ese caso) existe un único espacio-tiempo (M, g) maximal y globalmente hiperbólico (conocido como desarrollo de Cauchy) que satisface las ecuaciones de Einstein y en el que (Σ, γ, K) se puede insertar de la forma antes descrita. El término “maximal” significa que el espacio-tiempo no es un subconjunto de otro mayor. El término “globalmente hiperbólico”, por su parte, significa que toda curva temporal inextensible corta Σ exactamente una vez. En términos físicos, esta condición establece que toda la información que puede influir en algún suceso p del espacio-tiempo debe dejar algún tipo de impronta en Σ . La condición de globalmente hiperbólico es natural en el sentido de que si hay información que pueda llegar a p que no provenga de Σ , no se puede esperar que los datos de Σ determinen el espacio-tiempo en p . No obstante, en otro sentido es totalmente insatisfactoria ya que para cualquier teoría física que se precie, un conocimiento

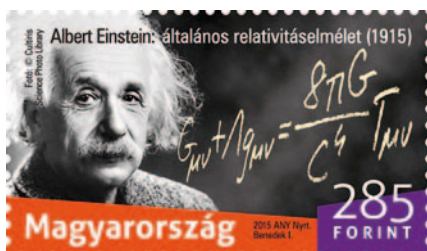
global y completo del sistema físico en un instante inicial debe determinar de forma completa y sin ambigüedades su evolución. En Relatividad General la condición de disponer de información inicial global y completa se puede imponer mediante la condición de que (Σ, γ) sea una variedad riemanniana completa. Sería sin duda ideal que el desarrollo de Cauchy de un dato con estas características fuera inextensible puesto que, de otra forma, el dato inicial no puede determinar de forma completa y unívoca el espacio-tiempo que genera. Pero resulta ser que la Relatividad General no tiene esta propiedad. Existen ejemplos explícitos de datos iniciales de vacío completos cuyo desarrollo de Cauchy es extendible, uno de los más sencillos es el espacio-tiempo de Kerr, que es una clase biparamétrica de soluciones fundamental en Relatividad General. No obstante, diversos argumentos apuntan a que, al menos en Kerr, esta es una situación inestable en el sentido de que cualquier perturbación, por pequeña que sea, de uno de sus datos iniciales completo genera un desarrollo de Cauchy inextensible. De hecho, y con el fin de salvaguardar la capacidad predictiva de la teoría, Roger Penrose conjeturó que, de forma genérica, el desarrollo de Cauchy de cualquier dato inicial completo es inextensible, por lo que las situaciones patológicas son totalmente excepcionales y por lo tanto físicamente no realistas. Esta conjetura se conoce como la conjetura de la censura cósmica fuerte y es, sin duda, uno de los problemas abiertos más importantes de la Relatividad Matemática. Es un problema extraordinariamente difícil y parece claro que tardará mucho en ser resuelto, pero sirve como fuerza motriz para muchos de los desarrollos en el campo. El lector interesado puede encontrar más detalles sobre el problema de Cauchy en Relatividad General en [7].

Agujeros negros y colapso gravitatorio

El espacio-tiempo de Kerr tiene la propiedad de ser asintóticamente plano, es decir que contiene una región cuya topología coincide con la del exterior de una esfera en reposo en el espacio-tiempo de Minkowski y cuya métrica, escrita en coordenadas adecuadas $\{t, x, y, z\}$, se aproxima a la métrica de Minkowski cuando $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ tiende a infinito. La métrica de Kerr es estacionaria, lo que en dicha región asintótica se traduce en el hecho de que $g_{\alpha\beta}$ no depende de t . Además el espacio-tiempo es un agujero negro, en el sentido de que hay sucesos que no son visibles nunca y desde ningún sitio de la región asintóticamente plana.

Uno de los resultados más espectaculares de la Relatividad General es la extrema simplicidad de los agujeros negros estacionarios ya que, bajo ciertas condiciones técnicas, se ha podido demostrar que la clase de Kerr es la más general que describe agujeros negros estacionarios y de vacío. Por lo tanto, todas las propiedades físicas de un agujero negro en equilibrio y de vacío dependen solamente de su masa y momento angular totales, que son los parámetros propios del espacio-tiempo de Kerr. Además de su extraordinario interés físico, los resultados de unicidad de agujeros negros son también ilustrativos de la evolución que ha mantenido la Relatividad

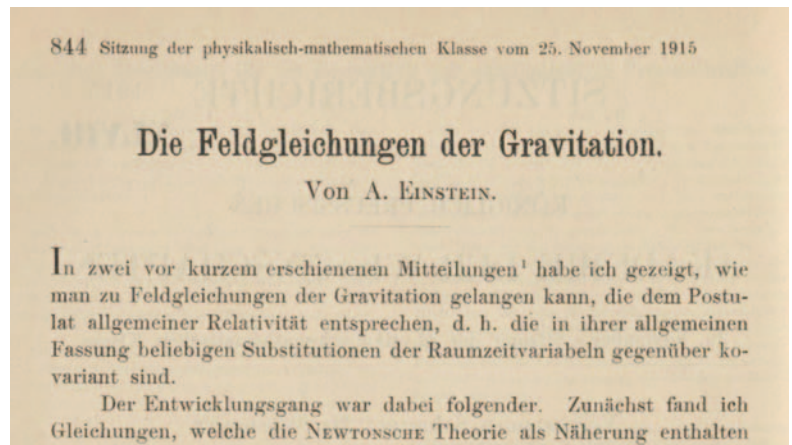
<http://www.philatelicedatabase.com/topicals-thematics/stamps-of-hungary-einstein-and-the-theory-of-relativity-2015/>



General en cuanto a teoría físico-matemática. Aunque los resultados iniciales de unicidad de la métrica de Kerr datan de los años sesenta y se consideran plenamente establecidos dentro de la comunidad física, demostrar dichos resultados desde un punto de vista riguroso y explicitando claramente las condiciones bajo las que son válidos ha sido y sigue siendo un campo de investigación importante en Relatividad Matemática [4].

Una cuestión fundamental acerca de la evolución dinámica del campo gravitatorio es el proceso de colapso gravitatorio, que consiste en la formación de singularidades a partir de datos iniciales regulares. Los teoremas de singularidades antes mencionados garantizan que, si el dato inicial contiene una región con campo gravitatorio suficientemente intenso, el desarrollo de Cauchy será necesariamente singular. No obstante, en este caso y en cierto sentido, el dato inicial ya contiene codificada la inevitabilidad de la singularidad que se va a formar. Una buena analogía sería una bomba preparada para explotar. Surge por la tanto la cuestión de si es posible generar desarrollos de Cauchy singulares a partir de datos iniciales suficientemente débiles como para que no describan, a priori, una situación “explosiva”. Más aún, cabe preguntarse si es posible generar espacio-tiempos singulares a partir de datos iniciales infinitamente débiles, es decir, tan cercanos como se desee a un dato inicial del espacio-tiempo de Minkowski. Si éste fuera el caso, el espacio-tiempo con ausencia total de gravedad sería inestable bajo pequeñas perturbaciones. Un resultado fundamental de la teoría, debido a Christodoulou y Klainerman [3] establece que cualquier perturbación del dato inicial de Minkowski que sea suficientemente débil (y que decaiga en el infinito de forma apropiada) genera un espacio-tiempo globalmente cercano al espacio-tiempo de Minkowski. Además, el campo gravitatorio generado se dispersa al infinito en forma de radiación y la métrica se aproxima asintóticamente a la de Minkowski en el futuro. Tenemos pues, que el espacio-tiempo de Minkowski es dinámicamente estable. Otro hito importante en la comprensión del colapso gravitatorio ha sido la construcción de datos iniciales [2] que describen campos gravitatorios inicialmente no intensos pero cuyos desarrollos de Cauchy son singulares.

Una cuestión fundamental asociada al problema de colapso es comprender la naturaleza global de los espacio-tiempos singulares que se generan. La llamada conjetura de la censura débil, también debida a Penrose, establece que en el caso asintóticamente plano las singularidades que se producen siempre se encuentran en el interior de agujeros negros. Nuevamente, esta conjetura permanece completamente abierta pero sirve de catalizador de muchos avances en el campo. Si añadimos a esta conjetura la propiedad físicamente razonable de que el espacio-tiempo que se genera tiende a un estado de



equilibrio (el mecanismo físico para alcanzar dicho equilibrio es la dispersión del campo gravitatorio en forma de radiación) y lo combinamos con los teoremas de unicidad de agujeros negros, resulta que el proceso de colapso gravitatorio debe culminar en la formación de un agujero negro de Kerr.

Éste es el paradigma aceptado para describir el proceso de colapso gravitatorio, y establecer su validez de forma rigurosa representa un problema de enorme interés y complejidad. Una vía adecuada para avanzar consiste en analizar si alguna de sus predicciones resulta ser cierta. Una de las más importantes es que la región exterior al agujero negro de Kerr debe ser dinámicamente estable. Muchos de los esfuerzos actuales de la comunidad están dedicados a abordar esta cuestión. Por el momento, y como paso previo necesario, se ha estudiado en detalle el comportamiento global de campos de prueba (es decir, no autogravitantes) en el espacio-tiempo de Kerr y, más particularmente, si decaen y cómo en el infinito. Además de por su interés intrínseco, la idea es desarrollar métodos robustos que permitan eventualmente abordar el problema de estabilidad no-lineal de la región exterior del agujero negro de Kerr [5].

Otra de las predicciones del paradigma de colapso es la desigualdad de Penrose. Todo dato inicial asintóticamente plano tiene asociado una noción de energía-momento global, conocida como cuadrivector ADM. Este es un cuadrivector que físicamente mide el contenido energético total del dato, incluyendo tanto el campo gravitatorio como todos los campos presentes que contribuyan al tensor de energía-momento T . Un resultado crucial en Relatividad General, debido a Schoen-Yau y a Witten, es que si la densidad de energía de los campos autogravitantes es positiva (lo que se traduce en una condición algebraica para T en cada punto), entonces el cuadrivector ADM es temporal futuro, excepto si es idénticamente cero, en cuyo caso el dato inicial corresponde necesariamente al espacio-tiempo de Minkowski. Podemos definir por lo tanto un concepto de masa ADM del dato inicial a partir del módulo del cuadrivector ADM de la misma manera que para una partícula en el espacio-tiempo de Minkowski. El

<http://writescience.wordpress.com>

paradigma de colapso gravitatorio anterior establece que si el dato inicial es asintóticamente plano y contiene una superficie atrapada, entonces su masa ADM nunca es inferior a una función apropiada del área más pequeña capaz de contener a la superficie atrapada. Ésta es la llamada desigualdad de Penrose y establecer su validez proporcionaría un claro apoyo al paradigma de colapso gravitacional descrito anteriormente. Por el momento, esta conjetura ha podido ser demostrada por Huisken-Ilmanen y Bray en el caso particular, pero relevante, en que el dato inicial sea invariante bajo inversión temporal. En el caso general, la validez de la desigualdad de Penrose está abierta y constituye un área de gran actividad en el campo [6].

Referencias

- [1] R. BARTNIK y J. ISENBERG, "The constraint equation", en *The Einstein Equations and the Large Scale Behavior of Gravitational Fields*, P. T. Chruściel, H. Friedrich (eds.) (Birkhäuser, 2004).
- [2] D. CHRISTODOULOU, *The Formation of Black Holes in General Relativity* (EMS Monographs in Mathematics, European Mathematical Society, 2009).
- [3] D. CHRISTODOULOU y S. KLAINERMAN, *The Global Non-linear Stability of the Minkowski Space* (Princeton University Press, Princeton NJ, 1993).
- [4] P. T. CHRUŚCIEL, J. LOPES COSTA y M. HEUSLER, "Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond", *Living Reviews in Relativity* 15 7 (2012), <http://www.livingreviews.org/lrr-2012-7>.
- [5] M. DAFERMOS e I. RODNIANSKI, "Lectures on black holes and linear waves" en *Evolution Equations, Clay Mathematics Proceedings* (17 American Mathematical Society, Providence, RI, 2013, pp. 97-205).
- [6] M. MARS, "Present Status of the Penrose Inequality", *Classical and Quantum Gravity*, 26 193001 (2009).
- [7] H. RINGSTRÖM, "Origins and Development of the Cauchy Problem in General Relativity", *Classical and Quantum Gravity* 32 124003 (2015).
- [8] J. M. M. SENOVILLA y D. GARFINKLE, "The 1965 Penrose Singularity Theorem", *Classical and Quantum Gravity* 32 124008 (2015).



Marc Mars
Instituto de Física Fundamental
y Matemáticas, IUFFyM,
Universidad de Salamanca





the vacuum projects

Fabricación de cámaras, componentes y sistemas de vacío a medida de sus necesidades.
Suministro de componentes standard de vacío.
Soldadura Electro Beam Welding y Brazing.
Ingeniería y asistencia técnica.

The Vacuum Projects, S.L.U.
Parque Empresarial Táctica
C/ Velluters, 17
E-46988 PATERNA (Valencia)
España

Tel. +34 96 134 48 31
Fax +34 96 134 48 30
comercial@vacuum-projects.net
www.vacuum-projects.net

Einstein ¿sigue teniendo razón?

Nicolás Yunes

© ESO/L. Calçada

Introducción

El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein le regala a la humanidad su *Teoría de la Relatividad General* (RG). Cien años después, la comunidad científica continua regocijándose con las variadas consecuencias de esta teoría, como la existencia de agujeros negros y estrellas de neutrones. Hoy por hoy, no existe prueba concreta que señale que Einstein estaba equivocado, pero la búsqueda continúa porque la RG es intrínsecamente incompatible con la Teoría de la Mecánica Cuántica. Las variadas hipótesis que intentan unificar estas dos teorías requieren una modificación fundamental de alguno de los pilares básicos de una de las dos. La esperanza de muchos es que una futura observación encontrará una desviación de la RG que señalará el camino correcto a seguir; tal vez así se iniciará una revolución científica similar a la que ocurrió con la mecánica clásica de Newton a raíz (entre otras cosas) de la observación de la precesión del perihelio de Mercurio por Le Verrier en el año 1859.

No es coincidencia, entonces, que haya habido un gran crecimiento en el área experimental dedicada a la RG desde su descubrimiento en 1915. Históricamente, los tests “clásicos” de la teoría, como la desviación de la luz estelar por el Sol, contribuyeron a establecerla como la teoría reinante. Desde entonces, se han realizado una inmensidad de experimentos terrestres, observaciones en el sistema solar, en otras galaxias y con púlsares binarios, que continúan confirmando la teoría. Una parte de éstos ha refinado las comprobaciones clásicas de la teoría, encapsuladas hoy en el marco de la teoría post-newtoniana parametrizada (ppN por sus siglas en inglés) [1] de los años 70. Las pruebas modernas van mucho más allá, y se concentran en la búsqueda experimental de desviaciones de los principios básicos y fundamentales de la teoría de Einstein. En este corto ensayo, intentaremos hacer un breve repaso de estas últimas [1-4].

Experimentos terrestres y en el sistema solar

La mayoría de los experimentos que se han realizado en nuestro planeta o cerca de él intentan verificar el *Principio de Equivalencia*. En su versión *débil*, este principio estipula que la aceleración de cualquier cuerpo libre producida por un campo gravitacional externo es independiente de su estructura y composición, ignorando su auto-campo gravitacional. Actualmente, no existe indicio alguno que indique una violación de este principio. El límite más estricto ha sido encon-

trado por el grupo Eöt-Wash con péndulos de torsión [5]: la aceleración diferencial de dos cuerpos de distinta composición debe ser menor que 2×10^{-13} de la aceleración promedio de ambos cuerpos. Otros experimentos, como MICROSCOPE, Galileo-Galilei, STEP y la medición de la posición de la Luna con láseres, intentarán establecer mejores límites [2].

La versión original de Einstein de este principio añade la invariancia local de Lorentz y de posición. Estos requerimientos exigen que los resultados de cualquier experimento local (que no se desarrollen en un campo gravitatorio) sean independientes de la velocidad y la posición del laboratorio inercial donde sean realizados. El marco moderno en el cual se examina el principio de invariancia de Lorentz es el de la *Extensión del Modelo Estándar* [6]. En este marco, se agregan todo tipo de interacciones a la acción del Modelo Estándar que violen la invariancia de Lorentz; luego, se intenta restringir la magnitud de los coeficientes de cada interacción a través de experimentos con aceleradores de partículas, o con otras observaciones, como la birrefringencia en la propagación de fotones, la radiación gravitacional de Cerenkov, y las oscilaciones de neutrinos.

La invariancia local de posición ha sido analizada a través de comparaciones de relojes atómicos en diferentes campos gravitacionales. El límite más estricto impone desviaciones fraccionarias menores que 2×10^{-4} y ha sido obtenido por Gravity Probe-A [7] con máseres de hidrógeno. El proyecto ACES planea mejorar este límite con relojes de átomos atrapados en frío, que serán colocados en la Estación Espacial Internacional en 2016. Estos experimentos restringen la posibilidad de que las constantes fundamentales de la física no gravitacional cambien temporal y espacialmente.

La versión *fuerte* del Principio de Equivalencia también se ha puesto a prueba con observaciones en nuestro sistema solar. Esta versión le añade a la de Einstein la inclusión de experimentos que involucren a cuerpos muy densos que produzcan un campo gravitacional fuerte, como el de las estrellas. Una manifestación clásica de la violación de este principio es el efecto de Nordtvedt [8], en el cual dos cuerpos estelares densos de distinta composición se aceleran de manera diferente en presencia de un campo gravitacional externo. Este efecto es análogo a una violación del principio de equivalencia débil, excepto que ahora los cuerpos en discusión poseen su propia gravedad y la diferencia en aceleración es entonces

proporcional a la energía gravitatoria de cada cuerpo. Este efecto no ha sido encontrado en ninguna observación, con el límite más severo impuesto a través de una combinación de mediciones de la posición de la Luna con láseres y de los experimentos del grupo de Eöt-Wash [1].

Otra predicción fundamental de la RG es que el movimiento o la rotación de los cuerpos con gravedad propia produce una corrección en el campo gravitatorio, que es análoga a un campo magnético producido por una carga eléctrica en movimiento o por un dipolo magnético. Por ejemplo, la rotación de la Tierra causa un arrastre del espacio-tiempo, que a su vez afecta la órbita de los satélites. En particular, este efecto causa que la línea de nodos de la órbita de un giróscopo y su momento angular de rotación sufran una precesión, resultados conocidos como el *efecto de Lense-Thirring* y la precesión *geodésica* respectivamente. Ambos efectos han sido verificados a través de observaciones de satélites terrestres, como Gravity Probe B [9] y LAGEOS [10]. Estas observaciones han restringido desviaciones de las predicciones de la teoría de Einstein con una precisión del 0.3 % y del 20 % respectivamente.

Tests con púlsares binarios

Todos los análisis mencionados anteriormente tienen un factor en común: utilizan campos gravitacionales débiles y prácticamente estáticos, donde la curvatura del espacio-tiempo es muy pequeña. La magnitud del campo gravitacional y de la curvatura del espacio-tiempo son proporcionales al potencial newtoniano (divido por el cuadrado de la velocidad de la luz c), $U = GM/(Rc^2)$ y al inverso del radio de curvatura $\mathcal{R}^{-1} = R^{-1} [GM/(Rc^2)]^{1/2}$, donde G es la constante de Newton, mientras que M y R son la masa y el radio característicos del sistema. Similarmente, la variabilidad temporal del campo gravitacional es proporcional a (v/c) , donde v es la velocidad característica del sistema. Por ejemplo, el sistema binario Sol-Tierra tiene $U \sim 10^{-8}$, $\mathcal{R}^{-1} \sim 10^{-12} \text{ km}^{-1}$ y $(v/c) \sim 10^{-4}$. Es por ello que la astrofísica del sistema solar puede ser descrita por la mecánica clásica de Newton con alta exactitud.

Para verdaderamente poder someter a control a la RG uno debe realizar experimentos donde la curvatura del espacio-tiempo y la magnitud y variabilidad temporal del campo gravitacional no sean extremadamente pequeños, como por ejemplo en los púlsares binarios [11]. Los púlsares son estrellas de neutrones que rotan a altas velocidades, algunos a velocidades comparables a las cuchillas de una licuadora. Estas estrellas tienen grandes campos magnéticos $[(10^7 - 10^{12}) \text{ G}]$ que aceleran fotones en un cono que rota rígidamente con la estrella, como un faro de luz. Si la luz del cono cruza el campo visual de la Tierra, los radiotelescopios terrestres registran un “pulso de fotones,” razón por la que son llamados púlsares. Los púlsares son extremadamente densos, con masas alrede-

dor de $1.5M_{\odot}$ y radios de sólo $\sim 12 \text{ km}$; sus campos gravitacionales y curvatura son enormes ($U \sim 0.2$ y $\mathcal{R}^{-1} \sim 0.04 \text{ km}^{-1}$) y la variabilidad temporal también puede ser grande cuando se encuentran en sistemas binarios. El pulsar binario más relativista que ha sido encontrado es el *pulsar doble* J0737-3039A,B [12], compuesto por dos estrellas de neutrones con período orbital de 0.1 días ($v/c \sim 10^{-3}$). Otros púlsares binarios relativistas están compuestos por una estrella de neutrones y una estrella enana blanca, por ejemplo J1738+0333, J1141-6545, y J0348+0432. La estrella de neutrones en este último ejemplo tiene una masa de $\sim 2M_{\odot}$ y es la más masiva que ha sido encontrada. Recientemente, se ha hallado un sistema orbital triple, J0337+1715, que consiste en un púlsar con dos estrellas enanas en órbita alrededor de él, y con períodos orbitales de 1.6 y 327 días [13].

A partir del descubrimiento de Hulse y Taylor [14] del sistema binario B1913+16 se han realizado muchos tests de la RG con púlsares binarios. De hecho, B1913+16 fue el púlsar con el que se confirmó, por primera vez, que las órbitas de sistemas binarios compactos decaen a causa de la emisión de ondas gravitacionales (ondulaciones en el espacio-tiempo producidas por la aceleración de cuerpos en movimiento) exactamente como lo predice la RG. Las verificaciones de RG con púlsares binarios están hoy encapsuladas en el marco del formalismo post-kepleriano parametrizado (ppK por sus siglas en inglés) [15]. En RG, los elementos orbitales en la parametrización kepleriana (por ejemplo, el argumento del pericentro) adquieren correcciones relativistas que los fuerzan a evolucionar temporalmente. Esta evolución en RG está determinada completamente por las masas del sistema binario. En los análisis de ppK, uno construye curvas de la razón de cambio de cada elemento orbital en el plano de las masas del sistema binario. Si las predicciones de RG son correctas, hay una única intersección de todas las curvas. De esta manera, uno puede poner a prueba la hipótesis nula de que la RG es correcta, sin tener que especificar una teoría alternativa determinada.

Todos estas pruebas intentan confirmar, cada vez con mayor eficacia, el principio de equivalencia fuerte, restringiendo por ejemplo (i) la existencia del efecto de Nordtvedt, (ii) la existencia de sistemas de referencia especiales, (iii) la variabilidad de la constante de Newton, y (iv) la existencia de radiación gravitacional dipolar. Por ejemplo, la existencia de sistemas de referencia especiales ha sido restringida a través de la observación de las órbitas de púlsares binarios y de su falta de torsión en púlsares aislados [11]. Estas observaciones permiten imponer los límites más estrictos [16] a la teoría de Einstein-Æther [17] (una teoría que reintroduce un campo de Æther que selecciona un sistema de referencia especial) y a la gravedad “kronométrica” [18] (el límite de bajas energías

de la gravedad de Hořava, una propuesta de gravedad cuántica que posiblemente es renormalizable).

La existencia de la radiación dipolar merece un párrafo aparte. En la RG, la radiación gravitacional dipolar no está permitida debido a la conservación de momento lineal y al principio de equivalencia fuerte. Sin embargo, hay teorías alternativas que no obedecen el principio de equivalencia fuerte, y, por lo tanto, en donde la radiación dipolar está permitida. Este tipo de radiación es mucho más fuerte que la radiación gravitacional cuadrupolar de la RG, y entonces los sistemas binarios decaen mucho más rápido en estas teorías alternativas. Las observaciones astrofísicas que han confirmado que los sistemas binarios decaen exactamente como lo predice la RG han permitido establecer límites severos en ciertas teorías escalar-tensoriales, como la de Brans-Dicke y las de $F(R)$ [1, 2].

Futuros tests astrofísicos

Hasta hoy, ningún test de RG con púlsares binarios involucra una de las predicciones más fantásticas de la teoría de Einstein: los agujeros negros. Estos objetos son estrellas completamente colapsadas gravitacionalmente, con densidades tan altas que la fuerza gravitatoria no permite que la luz escape de sus *horizontes* de sucesos. La existencia de agujeros negros en el universo ha sido comprobada indirectamente a través de la observación de las órbitas de estrellas tipo-S en el centro de la Vía Láctea. Estas observaciones nos permiten deducir la existencia de un objeto compacto, Sag. A*, en el centro de nuestra galaxia con una masa de $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$. Pero, aun hoy, no hemos podido determinar si este objeto compacto es realmente un agujero negro tal como los describen las soluciones de las ecuaciones de Einstein, o si es algún otro tipo de objeto oscuro predicho por una teoría alternativa.

Los agujeros negros pueden ser fantásticos laboratorios para examinar la RG, ya que son objetos intrínsecamente no lineales, cuyo campo gravitacional y curvatura del espacio-tiempo cerca del horizonte pueden llegar a la unidad. Ubicado a aproximadamente 8 kpc de nuestro sistema solar, Sag. A* tiene un tamaño angular de sólo $\sim 5 \mu\text{s}$, con lo cual su disco de acreción aún no ha podido ser observado. La misión principal del Event Horizon Telescope [19] es precisamente resolver la sombra creada por el horizonte de Sag. A* en su disco de acreción. Para alcanzar esta meta, se utiliza interferometría de muy larga base, combinando datos de varios telescopios en el mundo. Estas observaciones nos permitirán medir el momento angular de rotación y el momento cuadrupolar de Sag. A*, y así verificar los teoremas de agujeros negros sin pelo (véase la contribución de Mars) de RG. Éstos predicen que los momentos multipolares del campo gravitacional exterior de los agujeros negros sin carga eléctrica dependen sólo de la masa y el momento angular de rotación. Otra manera de verificar estos teoremas

es a través de observaciones de estrellas en órbitas bien cercanas a Sag. A*. Estas órbitas dependen de todos los momentos multipolares de Sag. A*, pero el efecto de estos decrece con el orden de los multipolos. La observación de una órbita con semi-eje mayor de menos de un miliparsec sería suficiente para medir el momento cuadrupolar de Sag. A* [20].

Aun si los objetos compactos satisfacen estos teoremas, esto no implica necesariamente que la teoría de Einstein haya sido verificada. Primero, las soluciones de Schwarzschild y de Kerr que describen agujeros negros en RG pueden también ser soluciones en teorías alternativas [4]. Esto depende de los detalles particulares de la teoría en consideración; existen soluciones de agujeros negros en teorías alternativas que no coinciden con las de Schwarzschild o Kerr [4]. Además, las verificaciones de RG con sombras de Sag. A* son de hecho pruebas cuasi-estacionarias, ya que sólo dependen del movimiento geodésico del gas en el disco de acreción. En particular, la dinámica no-lineal de las ecuaciones de Einstein no puede ser verificada con estas observaciones.

Futuros tests con ondas gravitacionales

Estos problemas pueden evitarse a través de la detección de ondas gravitacionales emitidas en los últimos minutos de vida de sistemas binarios compactos (sean estrellas de neutrones o agujeros negros). Estos sistemas son “limpios” astrofísicamente hablando, ya que las incertidumbres astrofísicas tienen un impacto despreciable en la trayectoria de estos cuerpos y, por lo tanto, en las ondas gravitacionales emitidas [4]. Además, en los últimos momentos de vida, estos sistemas binarios pueden adquirir velocidades muy altas ($v/c = 0.3 - 0.6$) de hasta dos órdenes de magnitud mayores que la velocidad orbital del púlsar doble. Al poder acceder a campos gravitacionales enormes y altamente dinámicos, con curvaturas gigantes del espacio-tiempo, uno podrá verificar la RG en un régimen nunca antes explorado. Esto nos permitirá ir mucho más allá del principio de equivalencia fuerte, y de los teoremas de agujeros negros sin pelo, explorando realmente la no linealidad de las ecuaciones de Einstein.

¿Pero qué aprenderemos realmente con la detección de ondas gravitacionales sobre la teoría fundamental de la gravedad? Una de las predicciones básicas de la RG es que las ondas gravitacionales tienen sólo dos polarizaciones, tal como las ondas electromagnéticas. En otras teorías, las ondas pueden tener hasta seis polarizaciones diferentes (dos escalares, dos vectoriales y dos tensoriales) que afectan al espacio-tiempo de manera diferente [1, 2, 4]. Por ejemplo, las ondas gravitacionales en teorías escalares-tensoriales poseen tres polarizaciones. La detección de ondas gravitacionales nos permitirá verificar esta predicción y cualquier desviación sería catastrófica para la RG.

Otro principio básico es que las ondas gravitacionales se propagan en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz. Este hecho está íntimamente relacionado con la interpretación de que las ondas gravitacionales son *gravitones*, partículas elementales que no tienen masa, que se propagan en el espacio-tiempo. Algunas teorías que intentan explicar la aceleración del universo reciente predicen que el gravitón tiene masa [21] y, por lo tanto, que se propaga a una velocidad menor que la de la luz. En estas teorías, la relación de dispersión de gravitones masivos sería diferente a la de RG, lo cual afectaría la evolución temporal de la fase de las ondas gravitacionales [4].

Las ondas gravitacionales también pueden limitar fuertemente violaciones de la simetría de Lorentz en el sector gravitacional, siempre y cuando las detectemos en coincidencia con ondas electromagnéticas emitidas por la misma fuente. Un ejemplo de esto sería la detección de ondas gravitacionales de la fusión de estrellas de neutrones en un sistema binario y, coincidentemente, ondas electromagnéticas de la subsiguiente explosión corta de rayos gamma [22]. Detecciones coincidentes de este estilo no son muy probables, pero una sola observación sería suficiente para imponer límites mucho más severos que los que existen actualmente [23].

La detección de ondas gravitacionales nos permitirá explorar la estructura multipolar de la radiación en su totalidad, en vez de sólo limitar la existencia de la radiación dipolar. La evolución frecuencia-temporal de las ondas gravitacionales codifican no sólo la presencia de esta última, sino también la existencia de modificaciones en la radiación cuadrupolar y de más alto orden multipolar. Una verificación de las predicciones de la RG tendría implicaciones drásticas en cuanto a la existencia de polarizaciones adicionales, ya que normalmente éstas también modifican el tipo de radiación gravitacional que es emitida por sistemas binarios.

Otro aspecto que podremos dilucidar con ondas gravitacionales es la estructura de la acción de Einstein y Hilbert. Las teorías de gravedad cuántica típicamente predicen modificaciones en la acción, que luego introducen modificaciones en las ecuaciones de campo. Éstas son generalmente correcciones cuadráticas (o de más alta potencia) en invariantes de la curvatura, que a su vez pueden modificar la estructura de los agujeros negros y de las estrellas de neutrones, como por ejemplo es el caso en la teoría dinámica de Chern-Simons [24] y la teoría de Einstein-Dilaten-Gauss-Bonnet [25]. Si uno requiere que estos modelos sean derivados en el límite de bajas energías de la teoría heterótica de las cuerdas, de teorías efectivas de la inflación, o de la teoría cuántica de bucles [24], toda modificación sería suprimida por la distancia de Planck. Pero requerimientos de este tipo pueden ser peligrosos, ya que pueden existir mecanismos a través de los cuales predicciones derivadas de argumentos di-

mensionales terminan siendo incorrectas, como en el caso de la constante cosmológica.

Las ondas gravitacionales también podrán limitar fuertemente teorías con *mecanismos de ocultación*, como algunas teorías escalar-tensoriales que han evadido controles basados en observaciones en el sistema solar. Este mecanismo hace que la gravedad se reduzca efectivamente a la RG cuando la curvatura del espacio-tiempo es pequeña. Pero en situaciones de gravedad extrema, como en las estrellas de neutrones, un campo escalar puede activarse y modificar la evolución de sistemas binarios a través de la emisión gravitacional dipolar. Este mecanismo de ocultación es opuesto a lo que a veces ocurre en cosmología, donde las situaciones con gravedad fuerte se reducen a RG, pero las predicciones de la teoría de Einstein son modificadas a grandes escalas [27]. La detección de ondas gravitacionales emitidas en la fusión de estrellas de neutrones puede restringir la existencia de estos efectos de manera comparable a la observación de púlsares binarios [28].

Finalmente, otro principio básico de la RG que podrá ser verificado con ondas gravitacionales es la existencia de horizontes de sucesos en agujeros negros. Cuando dos agujeros negros colisionan, el residuo es un nuevo agujero negro cuyo horizonte dinámico [29] vibra como una membrana [30], produciendo ondas gravitacionales con modos cuasi-normales. Estos modos pueden ser utilizados para confirmar los teoremas de no pelo de RG, y específicamente la estructura del espacio-tiempo de los agujeros negros dinámicos. A diferencia de las observaciones electromagnéticas con discos de acreción, estas pruebas no se ven afectadas por incertidumbres astrofísicas.

Todos estas comprobaciones de RG con ondas gravitacionales han sido encapsuladas en el marco del formalismo parametrizado post-einsteiniano [31] (ppE por sus siglas en inglés). En este formalismo, uno agrega ciertos términos a los filtros que serán utilizados para detectar ondas gravitacionales de sistemas binarios con la técnica de *filtros emparejados* [32]. Estos términos representan modificaciones en la evolución de la amplitud y la fase de las ondas gravitacionales de una meta-teoría que es capaz de reproducir todas las predicciones de teorías alternativas, incluyendo la RG. Usando métodos estadísticos de Bayes, se puede identificar la meta-teoría que mejor se adapta a los datos experimentales u observacionales.

Otro marco en el cual se pueden realizar tests de la RG con ondas gravitacionales es mediante el uso de las relaciones de *I-Love-Q* [33]. Estas relaciones predicen que el momento de inercia (*I*), el número de Love (que determina la deformabilidad de las estrellas), y el momento cuadrupolar (*Q*) de las estrellas de neutrones están inter-relacionados de una manera que es aproximadamente *independiente* de la estructura interna de las estrellas, pero depende de la teoría de la gravedad. Es posible que observa-

ciones futuras de púlsares binarios permitan medir el momento de inercia de las estrellas de neutrones. Es también posible que la detección de ondas gravitacionales producidas en la colisión de estrellas de neutrones permitan medir el número de Love. Por lo tanto, a través de las relaciones de I-Love uno puede verificar si estas observaciones son consistentes con las predicciones de RG, sin que importe la estructura interna de las estrellas. Este tipo de pruebas permitirán limitar severamente la existencia de ciertas teorías efectivas de la gravedad cuántica [33].

Caminante no hay camino

Una de las áreas fundamentales de la ciencia es la falsificación de hipótesis y el derrumbamiento de estructuras teóricas para dar lugar a rascacielos cada vez más inclusivos. Preguntarse por qué seguir poniendo a prueba la teoría de Einstein es como preguntarse por qué intentar entender el funcionamiento del universo. No se puede avanzar en la ciencia, y en particular en la astrofísica, sin un continuo cuestionamiento de nuestros métodos y nuestros resultados. No hacerlo sería establecer un dogma que estancaría el progreso de la ciencia indefinidamente. En los últimos cien años, la comunidad científica ha realizado estos cuestionamientos de manera exhaustiva, y, sin embargo, tal vez insospechadamente, la RG ha aguantado sistemáticamente todos estos exámenes y todos los intentos de modificación. Pero aún así queda mucho más por hacer. ¿Son los objetos oscuros y compactos del universo realmente los agujeros negros de Einstein? ¿Los gravitones son masivos o no? ¿Es el universo simétrico, como lo predijeron Lorentz y Einstein con su principio de equivalencia? Tal vez las estructuras fundamentales del universo son más que un promedio de las fluctuaciones que sólo efectivamente pueden ser descritas por un tensor métrico. Estas preguntas y muchas más podrán responderse en los próximos años a través de los increíbles esfuerzos teóricos y experimentales que están hoy recién empezando. Es imposible adivinar el camino que la ciencia seguirá en el futuro cercano; sólo podemos esperar y seguir haciéndonos camino al andar.

Referencias

- [1] C. M. WILL, *Living Rev. Rel.* **17**, 4 (2014), 1403.7377.
- [2] C. M. WILL (2014), 1409.7871.
- [3] D. PSALTIS, *Living Rev. Rel.* **11**, 9 (2008), 0806.1531.
- [4] N. YUNES y X. SIEMENS, *Living Rev. Rel.* **16**, 9 (2013), 1304.3473.
- [5] S. SCHLAMMINGER, K.-Y. CHOI, T. WAGNER, J. GUNDLACH y E. ADELBERGER, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 041101 (2008), 0712.0607.
- [6] D. MATTINGLY, *Living Rev. Rel.* **8**, 5 (2005), gr-qc/0502097.
- [7] R. F. C. VESSOT, M. W. LEVINE, E. M. MATTISON, E. L. BLOMBERG, T. E. HOFFMAN, G. U. NYSTROM, B. F. FARRER, R. DECHER, P. B. EBY y C. R. BAUGHER, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 2081 (1980).
- [8] K. NORDTVEDT, *Phys. Rev.* **169**, 1014 (1968).
- [9] C. EVERITT, D. DEBRA, B. PARKINSON, J. TURNEAURE, J. CONKLIN, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 221101 (2011), 1105.3456.
- [10] I. CIUFOLINI y E. PAVLIS, *Nature* **431**, 958 (2004).
- [11] D. R. LORIMER, *Living Rev. Rel.* **8**, 7 (2005), astro-ph/0511258.
- [12] A. LYNE, M. BURGAY, M. KRAMER, A. POSSENTI, R. MANCHESTER, F. CAMILO, M. McLAUGHLIN, D. LORIMER, N. D'AMICO, B. JOSHI *et al.*, *Science* **303**, 1153 (2004), astro-ph/0401086.
- [13] S. RANSOM, I. STAIRS, A. ARCHIBALD, J. HESSELS, D. KAPLAN *et al.* (2014), 1401.0535.
- [14] R. HULSE y J. TAYLOR, *Astrophys. J.* **195**, L51 (1975).
- [15] T. DAMOUR y J. H. TAYLOR, *Phys. Rev.* **D45**, 1840 (1992).
- [16] K. YAGI, D. BLAS, N. YUNES y E. BARAUSSE, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 161101 (2014), 1307.6219.
- [17] T. JACOBSON y D. MATTINGLY, *Phys. Rev.* **D64**, 024028 (2001), gr-qc/0007031.
- [18] D. BLAS, O. PUJOLAS y S. SIBIRYAKOV, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 181302 (2010), 0909.3525.
- [19] A. RICARTE y J. DEXTER, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 1973 (2015), 1410.2899.
- [20] D. PSALTIS, F. OZEL, C.-K. CHAN y D. P. MARRONE (2014), 1411.1454.
- [21] C. DE RHAM, G. GABADADZE y A. J. TOLLEY, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 231101 (2011), 1011.1232.
- [22] A. NISHIZAWA y T. NAKAMURA, *Phys. Rev.* **D90**, 044048 (2014), 1406.5544.
- [23] D. HANSEN, N. YUNES y K. YAGI (2014), 1412.4132.
- [24] S. ALEXANDER y N. YUNES, *Phys. Rept.* **480**, 1 (2009), 0907.2562.
- [25] N. YUNES y L. STEIN, *Phys. Rev. D* **83**, 104002 (2011), 1101.2921.
- [26] T. DAMOUR y G. ESPOSITO-FARESE, *Classical and Quantum Gravity* **9**, 2093 (1992).
- [27] J. KHOURY y A. WELTMAN, *Phys. Rev.* **D69**, 044026 (2004), astro-ph/0309411.
- [28] L. SAMPSON, N. YUNES, N. CORNISH, M. PONCE, E. BARAUSSE *et al.*, *Phys. Rev.* **D90**, 124091 (2014), 1407.7038.
- [29] A. ASHTEKAR y B. KRISHNAN, *Living Rev. Rel.* **7**, 10 (2004), gr-qc/0407042.
- [30] K. S. THORNE, R. H. PRICE y D. A. MACDONALD, BLACK HOLES, *The membrane paradigm* (Yale University Press, 1986).
- [31] N. YUNES y F. PRETORIUS, *Phys. Rev. D* **80**, 122003 (2009), 0909.3328.
- [32] P. JARANOWSKI y A. KROLAK, *Living Rev. Rel.* **8**, 3 (2005), 0711.1115.
- [33] K. YAGI y N. YUNES, *Phys. Rev. D* **88**, 023009 (2013), 1303.1528.

Nicolás Yunes

Department of Physics,
Montana State University,
Bozeman, EE. UU.



Ondas gravitacionales: mensajeras del universo

Gabriela González y Alicia M. Sintés

© NASA/C. Henze

El siglo pasado ha sido testigo de enormes avances en nuestra comprensión del universo. Hemos llegado muy lejos usando la radiación electromagnética como herramienta para observar el universo. Por ejemplo, la astronomía óptica ha probado que el universo se expande. La radio-astronomía nos ha dado el fondo de radiación cósmico, los chorros de rayos alimentados por agujeros negros en los núcleos galácticos y el descubrimiento de estrellas de neutrones en forma de púlsares. La astronomía de rayos X nos ha dado la interacción entre estrellas de neutrones y agujeros negros. Los rayos infrarrojos nos han dado evidencia de la existencia de agujeros negros supermasivos en el núcleo de nuestra propia galaxia. Sin embargo, la gravedad es el motor de muchos de los procesos en el universo y gran parte de su acción es invisible a la radiación electromagnética. Si la radiación electromagnética nos aporta los ojos con los que ver el universo, la radiación gravitatoria nos proporciona los oídos con los que escucharlo. En estos momentos aún estamos sordos ante estos susurros en forma de ondas gravitacionales del universo. Pero en los próximos años habrá una red ultra-sensible de detectores terrestres que se complementarán con observatorios espaciales dispuestos a oír este universo gravitacional, que cubrirán un rango de frecuencias entre los nanohercios hasta varias decenas de kilohercios, y que inevitablemente descubrirán fenómenos totalmente inesperados, mientras que profundizarán en los fenómenos astrofísicos conocidos. Las ondas gravitacionales son nuevos mensajeros que nos permitirán abrir una nueva ventana al cosmos que podría revolucionar la comprensión del universo en que vivimos.

El papel de la relatividad general

En 1905, Albert Einstein publicó una serie de artículos en los que se cuestionaba la propia naturaleza del espacio y del tiempo de la física clásica. Estos demostraron la existencia de moléculas como entidades físicas, pusieron en marcha el pensamiento que dio lugar a la mecánica cuántica y sentaron las bases de la teoría de la relatividad especial. Luego se pasó la siguiente década desarrollando su teoría de la *relatividad general* [1]. En esta nueva teoría, la gravitación es el resultado de la deformación del espacio-tiempo producida por la presencia de materia y energía, es decir que el espacio deja de ser ese marco inalterable y uniforme en el que se sitúan los objetos y suceden los fenómenos. El desarrollo de esta nueva teoría nos lleva a la conclusión de que el espacio-tiempo

puede ser objeto de investigación empírica, al igual que lo son los átomos, las moléculas o el campo electromagnético. Esta nueva teoría de la gravitación es uno de los logros más imponentes de la física del siglo veinte y es la teoría que actualmente nos da la mejor descripción del universo.

La existencia de la radiación gravitatoria fue predicha por Einstein en 1916 [2, 3], como una de las consecuencias importantes de su nueva teoría de la relatividad general, aunque él creía que no serían físicamente detectables. Su derivación inicial fue mediante el estudio de fenómenos dentro del marco de su teoría linealizada. Sin embargo, debido a la complejidad física y matemática de la teoría de la relatividad general, en un principio se cuestionó si estas ondas gravitacionales describían fenómenos físicos reales o simplemente eran efectos de coordenadas. No fue hasta la década de los 1950, gracias a Pirani, Feynman, Bondi y posteriormente Isaacson, en que se entendió la naturaleza física de las ondas gravitacionales e interpretada como grados de libertad que llevan consigo energía.

La energía en ondas gravitacionales perdida por un sistema binario de estrellas produce que las estrellas se acerquen, y esto fue comprobado cuando Hulse y Taylor descubrieron en los setenta el primer púlsar en un sistema binario PSR B1913+16 [4]. Mediciones precisas durante los siguientes 40 años han mostrado acuerdo con la teoría de Einstein, con una precisión relativa del 0.2 %. Por este descubrimiento Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel de Física en 1993.

Según la teoría de la relatividad general, cualquier cuerpo acelerado de forma no esféricamente simétrica produce un cambio en el campo gravitatorio que se propaga en el universo a la velocidad de la luz de igual modo que las ondas electromagnéticas se crean por cargas en movimiento. Las ondas gravitacionales son estas distorsiones del espacio-tiempo que llevan consigo información sobre sus orígenes. Debido a que la gravedad es la más débil de las cuatro interacciones fundamentales, las ondas gravitacionales interactúan muy débilmente con la materia. Estas prácticamente no pueden ser absorbidas, desviadas ni apantalladas, cosa que ha imposibilitado hasta ahora su observación directa, pero a la vez les permite viajar sin ser distorsionadas a lo largo de distancias cosmológicas. Puesto que el universo ya era transparente a la gravedad momentos después del Big Bang y mucho antes de serlo a la luz, las ondas gravitacionales nos permitirán observar la historia del universo hasta instantes muy remotos, e incluso nos podrían decir cómo

era el universo cuando tenía menos de un segundo, cosa completamente imposible con los telescopios convencionales. Eventos cataclísmicos en el universo, dos estrellas de neutrones fundiéndose en un agujero negro, colisiones de galaxias con agujeros negros masivos en su centro o estrellas explotando en supernovas emiten ondas gravitacionales que, cuando se detecten, proveerán información prístina sobre las estrellas masivas en el universo.

Las ondas gravitacionales no son simplemente una nueva banda, son todo un nuevo espectro con propiedades diferentes y complementarias a las ondas electromagnéticas. El efecto que producen es una compresión fraccional del espacio-tiempo perpendicular a la dirección de propagación, con una amplitud $h = \Delta L/L$ pequeñísima, dependiendo del origen de las ondas y la distancia a la que se observen. Expresado en términos físicos, una onda gravitacional intensa emitida por la colisión de dos estrellas de neutrones produciría en la Tierra distorsiones en una distancia de 10 kilómetros del orden de 10^{-18} metros —una cantidad 1 000 veces más pequeña que el diámetro del protón—. Como esta clase de sistemas son poco frecuentes, este tipo de fuentes se han de buscar a distancias de millones de años luz, sucediendo en galaxias lejos de la Vía Láctea. Por tanto, la búsqueda de ondas gravitacionales implica intentar hallar los minúsculos efectos de algunos de los sistemas astrofísicos más energéticos en las profundidades del universo.

Los detectores terrestres

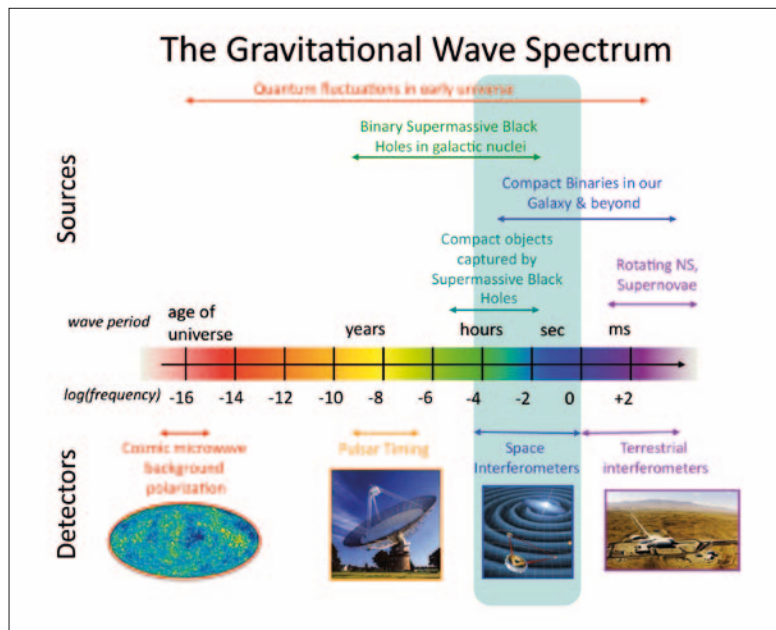
La construcción de un detector de ondas gravitacionales supone un gran reto tecnológico y tal empresa no comenzó hasta los años sesenta con el trabajo pionero de Joseph Weber en detectores resonantes [5]. En los noventa cinco barras criogénicas ALLEGRO, AURIGA, EXPLORER NAUTILUS y NIOBE estuvieron en operación de forma continuada, aunque hoy en día sólo dos (AURIGA y NAUTILUS) siguen operando, y también existen prototipos de detectores esféricos: MiniGRAIL y Mario Schenberg. En paralelo con el desarrollo de estos detectores resonantes ultracriogénicos, cuya sensibilidad se vio limitada, ya en los años sesenta se empezó a considerar la utilización de luz láser, tanto en Europa como en Estados Unidos. Estos detectores son básicamente interferómetros del tipo Michelson-Morley dispuestos en forma de L y el concepto de funcionamiento es relativamente simple: cuando una onda gravitacional incide perpendicularmente al plano del detector produce cambios cuadrupolares en la longitud de los brazos del interferómetro, de forma que mientras uno se acorta el otro se alarga y viceversa. Estos cambios dan lugar a interferencias medidas con fotodetectores, de las cuales se puede inferir el patrón de las ondas gravitacionales que han atravesado el detector.

En los noventa comenzó la construcción de los detectores interferométricos terrestres: LIGO en

Estados Unidos con un observatorio en Hanford (Washington) y otro en Livingston (Louisiana), Virgo en Italia, GEO600 en Alemania y TAMA en Japón. La red de detectores kilométricos con LIGO, GEO y Virgo estuvo operando entre los años 2005-2011, cubriendo la banda de frecuencias entre 50 Hz y 3 kHz. Estos detectores tuvieron una precisión sin precedentes a fluctuaciones del espacio-tiempo, con sensibilidad suficiente para detectar señales de agujeros negros formados a 60 millones de años luz. Esto fue el resultado de grandes innovaciones tecnológicas en campos diversos, usando láseres infrarrojos de gran estabilidad, espejos masivos con superficies pulidas con precisión única para su tamaño, suspendidos en complejos sistemas de aislamiento sísmico del movimiento de la superficie terrestre. Los interferómetros están instalados en sistemas de ultra-vacío, que se mantienen continuamente. La tecnología usada fue en muchas instancias desarrollada por la industria por primera vez para estos detectores, moviendo la frontera de lo que es posible para instrumentos de precisión, y para otras aplicaciones.

Los datos obtenidos en 2005-2010 fueron analizados cuidadosamente, sin hallar evidencias de ondas gravitacionales. Esto era esperado, porque las expectativas de detección eran pequeñas, derivadas del conocimiento de las estrellas de neutrones en el universo —se estima que se necesita una sensibilidad diez veces mejor para esperar detecciones frecuentes—. Aún así estos esfuerzos han servido para producir nueva ciencia mediante el análisis de las consecuencias de las no detecciones al nivel de sensibilidad conseguido. Las observaciones de LIGO y Virgo han puesto límites a la densidad de energía almacenada en el fondo cosmológico de radiación gravitatoria, mejorando los límites impuestos por la teoría de formación de elementos primordiales. A veces la ausencia de ondas gravitacionales también nos da información importante: se observaron algunas intensas explosiones de rayos gamma que se supone se originan en la coalescencia de estrellas de neutrones; al no observar ondas gravitacionales simultáneamente, sabemos que los orígenes de los rayos gamma están muy lejos, fuera del horizonte de los detectores.

No todas las ondas gravitacionales son producidas por eventos violentos extra-galácticos: estrellas de neutrones con desviaciones de la esfericidad producen ondas gravitacionales periódicas. Es de destacar el estudio de púlsares como los que hay en las constelaciones de Cangrejo y Vela. La frecuencia rotacional de estos púlsares disminuye con el tiempo. LIGO y Virgo han sido capaces de limitar a un 1 % y 10 %, respectivamente, la contribución a la pérdida de energía en forma de radiación gravitatoria, lo cual indica que estas estrellas tienen pequeñísimas diferencias con esferas perfectas. En los datos de detectores se podrían esconder indicios de estrellas rotantes en la galaxia de las que no



<http://science.gsfc.nasa.gov/663/images/gravity/GWspec.jpg>

recibimos señales electromagnéticas, pero generarían ondas gravitacionales. Estas búsquedas computacionales son muy costosas, por lo que la mejor manera de realizarlas es usando miles de computadoras de voluntarios que donan sus ciclos: este proyecto se llama Einstein@home —todos están invitados a contribuir al descubrimiento de estas señales (para más información sobre los resultados astrofísicos obtenidos pueden consultar [6]).

Entrado ya este siglo se han desarrollado los detectores interferométricos de segunda generación, con láseres más potentes, espejos más grandes y mejores, suspendidos de fibras de vidrio en péndulos cuádruples en lugar de péndulos simples suspendidos de fibras de metal, mejor aislamiento sísmico que mide y cancela el movimiento del terreno, topologías más sofisticadas del interferómetro y de los sistemas de detección fotoeléctrica y muchos otros cambios que resultarán en detectores más robustos y más sensibles. La era de los detectores avanzados está a punto de empezar con los detectores avanzados de LIGO (Advanced LIGO), tomando datos este año por 3 meses, aun cuando no se haya alcanzado todavía la óptima sensibilidad diseñada. En 2016, se espera que el detector de Virgo esté listo para unirse a la red de LIGO, y tomar datos por algunos meses, con mayor rango de alcance a eventos astrofísicos. Estos nuevos detectores, sensibles a la banda de frecuencia entre 10 Hz-10 kHz, se esperan que lleguen paulatinamente a su sensibilidad de diseño entre 2016-2020. A ellos se unirá en un futuro el detector japonés KAGRA, que se convertirá en el primer observatorio de ondas gravitacionales subterráneo y criogénico. También se espera que un tercer detector LIGO se instale en la India. Todo ello resultará en una red mundial de detectores con un alcance diez veces superior al de sus predecesores, lo cual equivale a aumentar en tres órdenes de magnitud

el volumen del cosmos que cubrirán, y que nos permitirá “oír” señales a un ritmo mensual o incluso semanal. Advanced LIGO y Virgo serán sensibles a señales provenientes de sistemas binarios de estrellas de neutrones hasta distancias de 200 Mpc (1 Mpc ~ 3 millones de años luz) y a la fusión de agujeros negros estelares a distancias 1 000 veces superior que la distancia a la galaxia Andrómeda, junto con estallidos de rayos gamma, estrellas de neutrones en rotación en nuestra galaxia o incluso fondos astrofísicos de diverso origen. Está clara la necesidad de contar con esta red mundial de detectores y de expandirla añadiendo un detector en el hemisferio sur, para así mejorar la resolución angular, aumentar el tiempo de observación global, poder identificar fuentes y determinar mejor las propiedades de los objetos que las emiten.

Astronomía de multimensajeros

Se espera que algunas de las fuentes de radiación gravitatoria más energéticas produzcan a su vez suficiente radiación electromagnética como para ser observada desde telescopios espaciales o terrestres. Por ejemplo, las parejas de estrellas de neutrones emiten una gran cantidad de energía de ondas gravitacionales cuando se mueven en espiral una respecto a la otra y, cuando los dos objetos se fusionan, producen material altamente radiactivo. Se cree que los estallidos cortos de rayos gamma, que acompaña a la fusión, provienen de esos chorros de radiación de alta energía expulsados por la fusión de estas estrellas. La observación conjunta de un evento astronómico, tanto con luz como con ondas gravitacionales, sería sin duda uno de los descubrimientos más interesantes de la astronomía moderna. Los dos tipos de ondas son muy diferentes. Las ondas gravitacionales revelan datos sobre el funcionamiento interno de un sistema, mientras que la luz proporciona información acerca de un sistema desde su superficie y su interacción con el entorno. Mediante la observación de una fuente usando ambos tipos de ondas, podemos comparar las señales y obtener un panorama más completo de los procesos astrofísicos ocurridos.

LIGO y Virgo se encuentran totalmente inmersos en esta astronomía de multimensajeros. Ambas colaboraciones tienen firmados memorandos de entendimiento con docenas de diversos observatorios ópticos, rayos X, rayos gamma y neutrinos para recibir y enviar alertas junto con el análisis conjunto de los datos.

La saga continúa. Las nuevas fronteras

Está clara la necesidad de ir mejorando esta red de detectores terrestres para así maximizar los posibles resultados científicos, tanto en lo que se refiere a hacer pruebas fundamentales de la relatividad general como de las observaciones astrofísicas. Durante los últimos años se han ido desarrollando nuevos enfoques y nuevas tecnolo-

gías para la detección de ondas gravitacionales. En el horizonte está el proyecto europeo Einstein Telescope (ET). ET mejoraría la sensibilidad un orden de magnitud con respecto a los detectores avanzados y extendería el rango de sensibilidad hasta 1 Hz. Esto permitiría explorar los sistemas binarios hasta distancias cosmológicas y explorar una gran variedad de fenómenos. ET sería el ejemplo culminante de más de 40 años de continuo desarrollo de los interferómetros ópticos. En estos momentos se están planteando implementar nuevas tecnologías como, por ejemplo, la interferometría atómica, aún en estudio.

Por otra parte, las observaciones electromagnéticas del universo junto con los modelos teóricos, sugieren que una gran parte del espectro gravitacional es inaccesible a estos detectores terrestres. Por consiguiente es necesario contar con una amplia gama de detectores para explotar todo el potencial de la astronomía de las ondas gravitacionales. Además de los detectores terrestres, se están desarrollando detectores espaciales para cubrir el rango entre 0.1 mHz y 100 mHz. En 2013, la Agencia Espacial Europea (ESA) seleccionó el tema “El universo Gravitacional” propuesto por el Consorcio de eLISA como futura misión L3 de su programa Cosmic Vision para ser lanzada a partir del 2034. La antena espacial eLISA se compone de tres naves espaciales dispuestas en un triángulo equilátero, de un millón de kilómetros de lado, que sigue una órbita heliocéntrica detrás de la Tierra. Sus posiciones relativas serán monitoreadas con interferometría láser de alta precisión, pero utilizando conceptos y tecnología completamente diferente a los detectores terrestres. Debido a esta gran novedad, una misión precursora llamada LISA Pathfinder se encargará de demostrar que se pueden lograr los niveles de exigencia requeridos. El lanzamiento de LISA Pathfinder está previsto para finales de noviembre de 2015.

eLISA es el único proyecto de detector de ondas gravitacionales del que conocemos fuentes garantizadas. Se tratan de los sistemas binarios galácticos ultracompactos, con periodos inferiores a 2 horas, conocidos como binarias de verificación. Además de los sistemas estelares binarios en nuestra galaxia y algunos extra-galácticos, se espera que eLISA observe la colisión de agujeros negros masivos (de 10^4 - 10^6 masas solares) como los que existen en los centros de prácticamente todas las galaxias, la captura y posterior caída orbital de objetos estelares compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros estelares) hacia esos agujeros negros supermasivos y fondos de radiación gravitatoria de origen cosmológico.

En paralelo al diseño de todos estos detectores basados en interferometría, existen dos métodos más completamente diferentes para detectar (directa o indirectamente) la radiación gravitacional

en otros rangos de frecuencia. El primero de ellos se basa en buscar los modos B de la polarización del fondo cósmico de microondas, que nos proporcionaría evidencias de ondas gravitacionales a 10^{-16} Hz. Este es uno de los objetivos de observatorios como BICEP3, Planck o de futuros como CMBPol. A frecuencias algo más altas, entre 10^{-9} y 10^{-7} Hz, se pueden detectar ondas gravitacionales basándose en el ajuste temporal (*timing*) de un conjunto de púlsares con periodos de milisegundos. En la actualidad hay tres grandes colaboraciones que trabajan conjuntamente en un proyecto internacional IPTA utilizando los radiotelescopios más grandes del mundo. Estos son: Parkes Pulsar Timing Array (PPTA), European Pulsar Timing Array (EPTA) y Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav). En un futuro se espera que también contribuya SKA. Las fuentes en esta banda incluyen los agujeros negros más masivos, con masas superiores a 10^8 masas solares y fondos de radiación gravitatoria producidos por cuerdas cósmicas o inflación. La caracterización del fondo producido por la colisión de agujeros negros supermasivos nos dará información sobre los modelos de evolución de galaxias y sobre la formación y crecimiento de agujeros negros. En cambio, el fondo de origen cosmológico nos podrá dar información sobre la física a energías correspondientes a las teorías de la gran unificación e incluso más allá. Todo ello permitirá probar la teoría de la relatividad general y restringir teorías de gravedad alternativas.

Qué ciencia esperamos hacer

Los detectores de ondas gravitacionales estudiarán fuentes caracterizadas por condiciones físicas extremas: campos fuertes no lineales, movimientos relativistas, densidades, temperaturas y campos magnéticos muy altos. Nos servirá para dar respuesta a muchas de las siguientes preguntas:

Astrofísica

- ¿Cuán abundantes son los agujeros negros de masa estelar?
- ¿Cuál es el mecanismo que genera explosiones de rayos gamma?
- ¿Cuáles son las condiciones en los núcleos de las galaxias dominadas por enormes agujeros negros?
- ¿Dónde y cuándo se forman los agujeros negros masivos, y qué papel juegan en la formación de las galaxias?
- ¿Qué sucede cuando colapsa una estrella masiva?
- ¿Cómo se forman y evolucionan los sistemas de estrellas binarias, y cuál ha sido su efecto sobre las tasas de formación de estrellas?
- ¿Cuál es la composición y estructura de las estrellas de neutrones?
- ¿Qué pasó en los primeros segundos del universo?

Física Fundamental

- ¿Cuáles son las propiedades de las ondas gravitacionales?
- ¿Se propagan las ondas gravitacionales a la velocidad de la luz? (Otra manera de preguntar esto es: ¿tiene masa el gravitón, o no tiene masa como los fotones?)
- ¿Sigue siendo válida la relatividad general bajo condiciones de gravedad fuerte?
- ¿Son los agujeros negros de la naturaleza como los agujeros negros de la relatividad general?
- ¿Cómo se distorsiona el espacio tiempo cerca del horizonte de agujeros negros?
- ¿Cómo se comporta la materia en condiciones extremas de densidad y presión?

Cosmología

- ¿Cuál es la historia de la expansión acelerada del universo?
- ¿Hubo transiciones de fase en el universo temprano?

Otro artículo en esta revista provee detalles acerca de cómo se puede comprobar la validez de la teoría de la Relatividad General con observaciones de ondas gravitacionales.

Culminando décadas de trabajo, el campo de astronomía gravitacional comenzará esta década con detectores de sensibilidad exquisita, y cientos de físicos y astrónomos buscando y encontrando los mensajes del universo escondidos en detalles de ondas gravitacionales. Esto será sólo el principio de un camino por recorrer, con muchas lecciones y sorpresas.

Referencias

- [1] A. EINSTEIN, "The foundation of the general theory of relativity", *Annalen Phys.* 49:769-822, 1916.
- [2] A. EINSTEIN, *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation* (Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte: 688-696, 1916).
- [3] A. EINSTEIN, *Über Gravitationswellen* (Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin, Sitzungsberichte: 154-167, 1918).
- [4] R. A. HULSE y J. H. TAYLOR, "Discovery of a pulsar in a binary system", *Astrophys. J.* 195:L51-L53, *Astrophys. J.* 1975.
- [5] J. WEBER, "Gravitational-Wave-Detector Events", *Phys. Rev. Lett.* 20, 1307, 1968.
- [6] <http://www.ligo.org/scientists/>

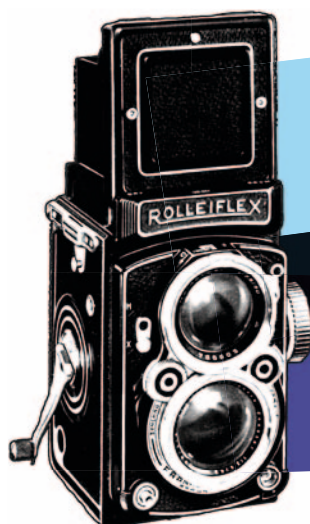
Gabriela González

Louisiana State University,
EE. UU.



Alicia Sintes

Departament de Física,
Universitat de les Illes Balears



Abrimos nuestra dirección de correo (revista.de.fisica@rsef.es) a todas aquellas fotos, dibujos e ilustraciones que nos queráis hacer llegar a la redacción.

¿ERES UN AMANTE DE LA FOTOGRAFÍA?

La Revista de Física busca contribuciones que puedan ser utilizadas en futuros artículos.
¡Vuestras contribuciones hacen la revista!

Cosmología Relativista

Mar Bastero-Gil



La cosmología relativista no es más que el estudio de la evolución de nuestro universo en expansión [1], a partir de la Teoría General de la Relatividad (TGR) de Einstein. La TGR es la teoría relativista que describe la interacción gravitatoria a cualquier escala, y, dado su carácter de largo alcance, es la fuerza que dominará la evolución del universo. En la famosa ecuación de Einstein de la relatividad general:

$$R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2 = 8 \pi G/c^4 T_{\mu\nu},$$

el lado geométrico de la derecha describe el campo gravitatorio asociado a la métrica $g_{\mu\nu}$ en función del tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$ y el escalar de curvatura R , cuya fuente es el contenido de materia y energía del universo dado por el tensor de energía-momento $T_{\mu\nu}$. Así que inmediatamente después de su propuesta los físicos, incluido Einstein, empezaron a buscar soluciones cosmológicas, es decir, aplicables a nuestro universo como un todo.

Un elemento fundamental en la búsqueda de soluciones cosmológicas es lo que se conoce como “Principio Cosmológico”, introducido por el propio Einstein en 1917. Dicho principio no es más que la versión moderna del “Principio copernicano”, básicamente que no ocupamos un lugar especial en el universo (ni la Tierra, ni el Sol, ni la Vía Láctea están en el centro del universo). Así que el universo que querían describir era un universo homogéneo (igual a cualquier escala, invariante bajo traslaciones) e isótropo (igual en cualquier dirección, invariante bajo rotaciones). Y aunque inicialmente se introdujo como un principio teórico, hoy en día está basado en las observaciones de nuestro universo a grandes escalas. Tanto de las observaciones del fondo de radiación de microondas, como de los grandes cartografiados de galaxias, se puede decir que a escalas mayores que aproximadamente 100 Mpc el principio cosmológico se cumple¹.

El universo de Einstein de 1917 describía un universo homogéneo e isótropo, y estático, con la métrica espacial de una esfera. En esa época en astrofísica todavía se discutía si había o no otras galaxias y objetos extragalácticos, y la tendencia (cierto prejuicio teórico) era asumir que además el universo era estático. Sin embargo dicho universo no era solución de sus ecuaciones. Para poder ajustar su solución a sus ecuaciones

introdujo el término de la constante cosmológica, Λ , modificando el lado geométrico,

$$R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2 + g_{\mu\nu} \Lambda = 8 \pi G/c^4 T_{\mu\nu}.$$

Dicha constante actúa como una fuerza repulsiva que contrarresta la fuerza atractiva de la materia contenida en nuestro universo, para dar lugar a un universo estático. También en 1917 el físico holandés De Sitter obtuvo una solución completamente opuesta de las mismas ecuaciones con constante cosmológica: un universo vacío, pero en continua expansión acelerada. Estático o dinámico, la respuesta la dieron las observaciones a partir de los años 1920-1930. El astrónomo Edwin Hubble en 1929 observó que las galaxias se alejan en promedio con una velocidad proporcional a su distancia [2], lo que definitivamente inclinó la balanza hacia un universo en expansión. Hoy en día el ritmo de expansión, parámetro fundamental para describir nuestro universo a gran escala, se conoce como parámetro de Hubble H , y su valor actual es la constante de Hubble H_0 .

Después del descubrimiento de Hubble, Einstein abandonó su universo estático, y de paso la constante cosmológica. Las observaciones la quitaron, pero harán que vuelva a aparecer en las ecuaciones 70 años después.

En los años treinta, Howard P. Robertson y Arthur G. Walker establecieron, independientemente, la métrica que describe un universo homogéneo, isótropo y en expansión. En realidad tres posibles métricas, dependiendo de su curvatura espacial: plana, cerrada o abierta. Anteriormente Alexander Friedmann y Georges Lemaître también habían desarrollado modelos cosmológicos usando la misma métrica. Y hoy en día sigue siendo el elemento principal para describir nuestro universo a grandes escalas: la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker, o simplemente métrica FLRW. Estudiar la evolución de nuestro universo ya sólo depende de lo que pongamos en el lado derecho de la ecuación de Einstein: el contenido de materia y energía.

Dado que la expansión hace que el volumen del universo aumente, y por lo tanto la densidad de energía disminuya en el tiempo, si vamos hacia atrás en el tiempo llegaremos al instante inicial en que el volumen tiende a cero, y la densidad de energía diverge. A esa conclusión llegó Lemaître en 1931: en el pasado, toda la masa del universo debía estar concentrada en un sólo punto, lo que llamó el “átomo primordial”. El universo debía haber empezado en un estado muy denso, caliente, y en un volumen pequeño a partir del cual se empezó a expandir. Esta idea fue desarrollada por los físicos George Gamow, Ralph A. Alpher y Robert Herman en 1948 al proponer su modelo cosmológico

1 En cosmología y astrofísica necesitamos usar unidades “astronómicas” para medir distancias: $1\text{pc} = 3 \times 10^{13} \text{ km} = 3.26 \text{ años-luz}$, $1\text{Mpc} = 1 \text{ millón de pc}$.

[3]: el “Big Bang” (BB) o la “Gran explosión”². Las predicciones que lo establecieron como el modelo cosmológico actual, fueron: (a) las abundancias relativas de los primeros núcleos ligeros (helio, deuterio, helio-3 y litio-7), sintetizados en menos de 3 minutos después del inicio durante lo que se conoce como nucleosíntesis primordial; (b) el fondo cósmico de radiación que debía ser observable en el rango del microondas; dicho fondo se originó cuando la materia se desacopló de la radiación debido a la expansión, aproximadamente cuando el universo tenía unos 300.000 años de edad.

Ambas predicciones han sido confirmadas por las observaciones. Las abundancias primordiales de los elementos ligeros son difíciles de predecir en el ratio correcto fuera del modelo del Big Bang, y de hecho hoy en día se utilizan también para restringir los modelos cosmológicos alternativos: un exceso de radiación, o cualquier otra forma de materia o energía en esa época daría lugar a unos valores distintos de los observados. El fondo de radiación cósmico de microondas (en inglés, “Cosmic Microwave Background Radiation” o CMB) lo detectaron en 1964 de forma casual los radioastrónomos Arno Penzias y Robert Wilson [4]. Detectaron un “ruido” de fondo en su experimento, una radiación en microondas difusa y uniforme a una temperatura de aproximadamente 3 K, una reliquia del pasado de nuestro universo. Exactamente como predecía el modelo del BB, como sus colegas Robert Dicke y Jim Peebles en Princeton les hicieron notar. La radiación era consistente con el espectro de un cuerpo negro, el espectro más preciso observado hasta la fecha, a una temperatura hoy en día de 2.73 K. Cuando se originó la temperatura era superior a 3000 K, y se ha ido enfriando debido a la expansión.

Así que a lo largo de todo el siglo xx se establecieron los pilares fundamentales, tanto teóricos como observacionales, en los que se asienta la cosmología moderna: (a) la TGR y la métrica de FLRW; (b) la expansión del universo y el parámetro de Hubble; (c) la predicción de las abundancias de los elementos ligeros; (d) y el CMB.

Lo que está claro es que aunque el principio cosmológico nos describa el universo a grandes escalas, en realidad el universo está lleno de estructura (la Tierra, el sistema solar, estrellas, galaxias...). Las semillas de la formación de estructura tenían que estar ya presentes en el tiempo del desacople, cuando se originó el CMB, y se tenían que poder observar como pequeñas variaciones en la temperatura del CMB. Se observaron por primera vez con el satélite COBE³ (“COsmic Background Explorer”)

de la NASA en 1992 [5]. COBE observó el espectro de fluctuaciones en temperatura a grandes escalas, del tamaño de nuestro universo observable. Dichas fluctuaciones son aproximadamente una parte en 100.000 la temperatura del CMB. Lo que en sí a su vez confirma el principio cosmológico: el universo es prácticamente homogéneo e isótropo, como el CMB, a escalas cosmológicas.

El objetivo ahora era observar el espectro completo del CMB, desde las escalas observadas por COBE, hasta escalas menores correspondientes al tamaño del universo cuando las estrellas y galaxias se empezaron a formar, unos 400 millones de años después del BB (que vuelven a difundir la radiación del CMB a esa escala y hace que no pueda llegar hasta nosotros). Desde los años 90, los sucesivos experimentos han ido mejorando la caracterización del espectro: Boomerang, Maxima, DASI, CBI, entre otros, y WMAP y PLANCK. WMAP (“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”) fue el satélite de la NASA lanzado en 2001, que permitió empezar a ajustar los parámetros cosmológicos con una precisión desconocida hasta entonces en cosmología [6]. PLANCK es el experimento de la ESA (“European Space Agency”), lanzado en 2009, y que publicó en 2013 y 2015 los datos cosmológicos más precisos hasta la fecha [7].

Dicho espectro se puede predecir a partir de las ecuaciones de Einstein dado un cierto contenido de materia y energía, y un espectro inicial de temperatura. Los experimentos del CMB nos dan un espectro de fluctuaciones en temperatura que se ajusta perfectamente a la predicción teórica. Nos bastan 6 parámetros cosmológicos para describir el universo observable: la amplitud y el índice espectral del espectro inicial, los parámetros de densidad de materia y energía, el parámetro de Hubble, y la profundidad óptica al tiempo de reionización. Y aunque es un universo un poco aburrido y sencillo a primera vista, no está exento de sorpresas.

Lo primero que nos da el espectro es que en realidad la geometría espacial de nuestro universo es plana: de las tres posibles métricas de Robertson y Walker, el CMB nos selecciona una de ellas. La radiación no juega un papel importante en el balance de energía, pero sólo aproximadamente un 30 % del total es materia (masa que gravita). El otro 70 % tiene unas características peculiares: se comporta como un fluido con presión negativa, y es responsable de la expansión acelerada que se observa en el universo hoy en día. Algo parecido a la constante cosmológica introducida por Einstein en sus ecuaciones, y que justamente produce el efecto observado por De Sitter.

² El nombre se lo dió Fred Hoyle, defensor de un modelo del universo en expansión pero estacionario, en una entrevista en la BBC.

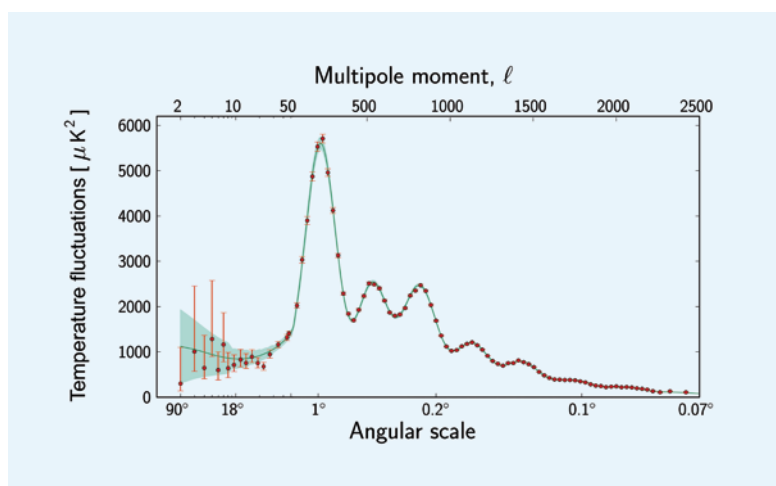
³ Las observaciones pioneras del CMB han sido fundamentales para el desarrollo de la cosmología moderna y han sido

galardonadas con el premio Nobel: A. Penzias y R. Wilson en 1978 por el descubrimiento del CMB, y J. Mather y G. Smoot en 2006 por la detección de las fluctuaciones en el espectro con el satélite COBE.

Para poder predecir el espectro del CMB, necesitamos las condiciones iniciales, es decir las fluctuaciones primordiales presentes en nuestro universo en el momento del desacople. El paradigma que mejor explica las condiciones iniciales del CMB se conoce como inflación: un periodo de expansión acelerada (casi exponencial) en la evolución temprana del universo (antes de nucleosíntesis). La expansión acelerada se obtiene con un parámetro de Hubble prácticamente constante, que a su vez nos lleva a algo que se comporta como una constante cosmológica. Inflación no es más que un universo cuasi-De Sitter durante un tiempo limitado.

En realidad, antes de las observaciones de las fluctuaciones del CMB, el mecanismo de inflación se propuso en los años ochenta para explicar los problemas teóricos del modelo estándar cosmológico (confirmados por las observaciones después): el problema de la planitud y el Principio Cosmológico. Si las observaciones nos dicen que el universo es espacialmente plano, siempre podemos seleccionar la métrica de FLRW adecuada para describirlo. Pero si la expansión ha sido siempre decelerada, las ecuaciones de Einstein predicen que cualquier pequeña⁴ desviación de un universo plano en el pasado nos lleva inexorablemente a un universo abierto o cerrado. Un cierto periodo de expansión acelerada produce el efecto contrario y hace que el universo observable sea cada vez más plano. Es simplemente un problema de escalas: dado que la velocidad de la luz es finita, sólo podemos “observar” (enviar y recibir rayos de luz) una distancia finita que se denomina horizonte, que determina el tamaño del universo observable (independientemente del tamaño “real” de nuestro universo). Al expandirse de forma acelerada, aunque el universo sea cerrado o abierto, la región del universo que hoy en día observamos corresponde a una región pequeña de todo el universo, que para nosotros es plana.

Y es la presencia de horizontes en un universo en expansión lo que dificulta entender el principio cosmológico, es decir, por qué el CMB es tan homogéneo y la temperatura de todas las regiones que observamos es la misma. Es un sistema en equilibrio, un cuerpo negro perfecto, pero para que un sistema esté en equilibrio las distintas regiones han tenido que estar en contacto causal en algún momento, es decir, la radiación ha tenido que interactuar. Pero si vamos hacia atrás en el tiempo, para un universo en expansión decelerada descubrimos que este no es el caso, y en realidad el CMB estaría formado por aproximadamente 10^5 regiones que nunca estuvieron en contacto causal. Pero un periodo de expansión exponencial nos ayuda a ampliar la historia de nuestro universo antes del CMB y permitir que las distintas regiones entren en contacto causal.



También nos ayuda a diluir de forma eficiente cualquier reliquia exótica que se haya producido en la historia temprana de nuestro universo, por ejemplo, defectos topológicos en las transiciones de fase, y que interfieran con la nucleosíntesis primordial, formación de estructura, etc. El problema de los horizontes, de la planitud, y de las reliquias del pasado, fueron las primeras motivaciones para proponer los modelos inflacionarios. Pero inmediatamente se dieron cuenta de que también nos proporciona un mecanismo causal para generar el espectro primordial de las fluctuaciones, con las propiedades adecuadas.

Las ecuaciones de Einstein son ecuaciones clásicas, pero el lado derecho de la ecuación, el contenido de materia y energía, proviene del mundo cuántico, de las partículas fundamentales y sus interacciones. Las fluctuaciones cuánticas son amplificadas durante inflación, y las longitudes de onda que inicialmente son menores que el tamaño del universo observable durante inflación (y en contacto causal con el resto) crecen con la expansión hasta “salir” del horizonte. Una vez fuera, ya no están en contacto causal, su amplitud no varía, y se comportan como fluctuaciones clásicas. Cuando termina inflación, el horizonte vuelve a crecer más rápido que la longitud de onda de las fluctuaciones primordiales, y estas vuelven a “entrar” y a estar en contacto causal. Y vuelven a ser la fuente del lado izquierdo de la ecuación de Einstein que nos permite calcular el espectro del CMB. Como la única escala que tenemos en el problema durante inflación es el valor del parámetro de Hubble, cuasi constante, el espectro primordial de fluctuaciones es prácticamente invariante de escala: todas las escalas tienen aproximadamente la misma amplitud. Y esta característica es justamente lo que se observa en el CMB para el espectro primordial.

No sólo el CMB nos da información sobre nuestro universo, hay otras observaciones importantes, que se han venido realizando y mejorando desde el siglo XX hasta nuestros días: 1) los grandes cartografiados de galaxias, que nos permiten también estimar el contenido de materia de

⁴ “Pequeña” quiere decir por ejemplo una parte en 10^{16} al tiempo de nucleosíntesis.

nuestro universo, y que son consistentes con ese 30 % de materia. 2) Las curvas de rotación de las galaxias, que ya desde los años 80 con el estudio sistemático realizado por Vera Rubin indicaban que no toda la masa que existe en el universo “emite” luz; sólo hay aproximadamente un 5 % que podemos explicar con la materia conocida, el otro 25 % es oscura y de naturaleza desconocida. 3) Los diagramas actuales de Hubble realizados con supernovas tipo IA, que fueron los primeros en observar que efectivamente el universo está en expansión acelerada⁵, y nos hace falta un 70 % de un fluido más exótico denominado “Energía Oscura”. Otro dato a favor de la aceleración reciente de la expansión del universo es que ha ayudado a resolver uno de los problemas observacionales de la cosmología del siglo xx: la edad del universo. Básicamente es proporcional al inverso de la constante de Hubble H_0 , pero en un universo sólo con materia y radiación los valores observados de H_0 daban un universo más joven que la edad de las estrellas más viejas (los cúmulos globulares). La expansión acelerada resuelve el problema y hace que el universo en realidad sea más “viejo” de lo que pensábamos. Nuestro universo espacialmente plano lleva expandiéndose unos 13.700 millones de años por acción de la gravedad, la mayor parte del tiempo en expansión decelerada (desde que se sintetizaron los primeros núcleos), y sólo recientemente la “energía oscura” ha empezado a dominar y a acelerar la expansión.

La buena noticia es que todas las observaciones concuerdan con el mismo modelo y valores de los parámetros cosmológicos. Pero el modelo actual que tenemos de nuestro universo está compuesto por un 95 % de materia y energía del cual desconocemos su naturaleza. El paradigma inflacionario nos proporciona un mecanismo elegante y causal para generar el espectro primordial, pero todavía nos falta un modelo concreto de las muchas propuestas a las que más de 30 años de investigación desde los primeros modelos han dado lugar. Y la pregunta que siempre está detrás es si realmente la gravedad es clásica y distinta al resto de las interacciones entre partículas o tiene también un origen cuántico.

Al mundo cuántico accedemos cuando reducimos la escala a la que observamos nuestro sistema. Nos basta la interacción gravitatoria como fuerza clásica para describir los fenómenos de buena parte de la historia de nuestro universo. Pero en los primeros instantes, lo que denominamos “Big Bang”, el tamaño del universo es justamente del orden de magnitud de la escala a la que esperaríamos que los efectos cuánticos de la gravedad no fuesen despreciables. Los intentos por cuantizar la gravedad surgieron prácticamente con la TGR,

al mismo tiempo que se desarrollaba la cosmología. Pero un siglo después no tenemos todavía una buena descripción cuántica de la gravedad, ni indicaciones experimentales u observacionales de que esté cuantizada. Desde el punto de vista teórico se espera que los efectos cuánticos resuelvan el problema de la singularidad inicial de la teoría clásica: ese instante inicial donde el universo tiene volumen cero y la densidad de energía diverge. Justamente el “átomo primordial” de Lemaître. Los efectos cuánticos introducen una longitud mínima y una densidad máxima en el sistema evitando la singularidad. Las distintas propuestas para cuantizar la métrica del espacio-tiempo, como la teoría de supercuerdas o la teoría de lazos cuánticos han desarrollado a su vez modelos cosmológicos incluyendo los efectos cuánticos. Pero no están exentos de problemas (inestabilidades en la evolución, modelado efectivo de las ecuaciones más que derivaciones a partir de la teoría fundamental...), y todavía no hay predicciones claras que puedan o bien confirmar o falsear la teoría.

La materia oscura es uno de los puzzles de nuestro universo, ese 25 % de masa que no podemos asociar a ninguna partícula fundamental conocida, producida y observada en los grandes aceleradores de partículas. Pero confiamos en que sea una partícula (o varias) con masa (como indican las observaciones), que interacciona débilmente con el resto (y por eso todavía no la hemos detectado), y que tarde o temprano conseguiremos “cazar” en los experimentos de detección directa o indirecta de materia oscura.

La naturaleza de la energía oscura es uno de los interrogantes mayores de la cosmología moderna. Las observaciones nos indican que nos basta algo muy parecido a una constante cosmológica para explicar los datos que tenemos, pero no nos dicen mucho más sobre su naturaleza u origen. Está claro que para poder entenderla tendremos que modificar la ecuación de Einstein, o bien en su lado geométrico, como hizo el propio Einstein al introducir su constante cosmológica, o bien introducir un fluido exótico en el lado del contenido de materia-energía. Ambas extensiones de la teoría están relacionadas mediante un cambio de sistema de referencia, es decir, de métrica. Son lo que se llama las teorías de gravedad modificada. Las realizaciones concretas intentan predecir sus efectos por ejemplo en el CMB, y sobre todo en la formación de estructura a gran escala. En los próximos años, de la información que obtengamos de los grandes cartografiados de galaxias esperamos poder responder preguntas como si es realmente una constante o un fluido que evoluciona.

En un modelo inflacionario necesitamos terminar inflación a tiempo (no podríamos generar los núcleos primordiales durante inflación) y recuperar la historia estándar de nuestro universo empezando por un periodo dominado por la ra-

5 A. Riess, B. Schmidt líder del “High-z team”, y S. Perlmutter líder del “Supernova cosmology project”, recibieron el premio Nobel en 2011 por la expansión acelerada del universo.

diación. El mecanismo que hace de puente entre inflación y radiación es lo que se conoce como “recalentamiento”. Pero necesitamos de otras interacciones aparte de la gravitatoria para poder producir suficiente radiación. Así que esperamos que la física de partículas y posibles extensiones del modelo estándar de partículas puedan aportar más información sobre la física de dicha fase de recalentamiento y, por extensión, de inflación. Y aunque el paradigma inflacionario de momento sea el que mejor explica los problemas de la cosmología estándar, dada la falta de un modelo concreto también se siguen explorando alternativas.

Después de un siglo de cosmología relativista, el estudio de la evolución del universo ha superado la mayoría de edad y alcanzado la madurez. Las ecuaciones de Einstein nos proporcionan la herramienta fundamental para el estudio del universo. Y de la combinación de teoría y observaciones surge lo que se conoce como modelo estándar cosmológico, dado en función de sólo 6 parámetros. Podemos describir nuestro universo con un conjunto de parámetros reducido, pero ahora el reto es entenderlo.

Referencias

- [1] S. DODELSON, *Modern Cosmology*, (Academic Press, 2003).
- [2] E. P. HUBBLE, “A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 15, 168-173 1929.
- [3] R. A. ALPHER, H. BETHE y G. GAMOW, “The Origin of Chemical Elements”, 1948, *Physical Review* 73 (7): 803-804; “Evolution of the Universe”. R. A. ALPHER y R. Herman, *Nature* 162 (4124): 774-775 1948.
- [4] A. A. Penzias, y R. W. Wilson, “A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s”, *Astrophysical Journal* 142: 419 1965.
- [5] G. F. SMOOTH *et al.*, “Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps”, *Astrophysical Journal Letters* 396 (1): L1-L5 1992.
- [6] G. F. HINSHAW, *et al.*, “Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmology Results”, *ApJS*, 208, 19H 2013.
- [7] PLANCK COLLABORATION *et al.*, “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters”, 2014, *A&A*, 571A, 16P.

Mar Bastero-Gil

Departamento de Física Teórica
y del Cosmos, Universidad de
Granada.



Un paso de gigante en la generación de vacío

TURBOVAC i / iX

Bombas turbomoleculares híbridas
Sin aceite. Y SIN MANTENIMIENTO.



En sus diferentes versiones garantizan: máxima compresión, mayor throughput y elevadísimo caudal también para gases ligeros, además de una total flexibilidad de instalación.

¡Nunca ha sido tan fácil como ahora mejorar sus procesos!

Oerlikon Leybold Vacuum Spain S.A.
Oficina De Ventas y Servicio de Asistencia
Técnica en España y Portugal
C/ Huelva 7
E-08940 Cornellá de Llobregat (Barcelona)

T: +34 93 666 43 11
F: +34 93 666 43 70
info.vacuum.ba@oerlikon.com
www.oerlikon.com/leyboldvacuum

oerlikon
leybold vacuum

Astrofísica Relativista

José A. Font

La Astrofísica Relativista es el campo de la astrofísica que emplea la Teoría de la Relatividad de Albert Einstein como modelo físico-matemático con el que estudiar el universo. Así, esta disciplina analiza aquellos contextos astronómicos en los que las leyes de la mecánica clásica y la ley de Newton de la gravitación no son válidas. Esta situación se da cuando se alcanzan velocidades próximas a la velocidad de la luz ($c \sim 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$), pero también cuando el campo gravitatorio es muy intenso, o cuando la presión y la densidad de energía de la materia es muy alta, incluso superior a la densidad de masa en reposo multiplicada por la velocidad de la luz al cuadrado. Por extremas que parezcan, estas condiciones se dan de manera habitual en escenarios que involucran la presencia de los denominados objetos compactos, objetos astronómicos asociados, a escala estelar, con los últimos estadios de la evolución estelar, tales como las enanas blancas, las estrellas de neutrones y los agujeros negros, y también, a escalas mucho mayores, con los agujeros negros supermasivos en el núcleo de galaxias y cuásares [1].

Tales objetos astronómicos son examinados rutinariamente mediante telescopios diseminados por todo el rango de frecuencias del espectro electromagnético, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, tanto en observatorios terrestres como espaciales. Además, constituyen los principales blancos de observación de los próximos detectores de radiación gravitatoria, tanto para los basados en interferometría laser, como los terrestres LIGO, VIRGO y KAGRA, sensibles a las frecuencias típicas de las supernovas o de la colisión de estrellas de neutrones ($\sim \text{kHz}$) o el espacial eLISA, sensible a la colisión de agujeros negros o binarias galácticas no resueltas ($\sim \text{mHz}$), como para los detectores basados en “pulsar timing”, como IPTA o el futuro SKA, sensibles a frecuencias ultrabajas ($\sim \text{nHz}$) (ver, por ejemplo, [2] y referencias allí citadas). La detección directa de esta escurridiza radiación —arrugas en la curvatura del espacio-tiempo— es una de las principales motivaciones de la investigación actual en astrofísica relativista.

El término “Astrofísica Relativista” se utilizó por vez primera en los años 60 del siglo XX, y está asociado con el descubrimiento de los cuásares. En 1962, Maarten Schmidt identificó la presencia de hidrógeno en el espectro de la radiofuente 3C273. Las líneas espectrales de dicho objeto —líneas anchas de emisión de la serie de Balmer— estaban

significativamente desplazadas al rojo, un 16 % respecto a sus valores en el laboratorio. Esto demostraba que 3C273 se alejaba a una velocidad de $\sim 47\,000 \text{ km s}^{-1}$. En diciembre de 1963, Ivor Robinson, Alfred Schild y Engelbert Schucking organizaron un congreso científico en Dallas (Texas, EE. UU.) con el objetivo de analizar la información que comenzaba a acumularse sobre unos objetos enigmáticos denominados cuásares (del inglés *quasars* o *quasi-stellar radio sources*). Lo desconcertante de dichos objetos radicaba en la dificultad de explicar el mecanismo generador de una emisión de energía al extraordinario ritmo de un billón de veces el de nuestro Sol y procedente, además, de una región relativamente pequeña. De hecho, 3C273 aparecía en las placas fotográficas como una fuente puntual, lo que justifica el término “cuasi-estelar” en su nombre. El congreso fue denominado *Texas Symposium on Relativistic Astrophysics* y los resultados fueron publicados en 1965 por la Universidad de Chicago bajo el título *Quasi-Stellar Sources and Gravitational Collapse* (una interesante reseña histórica aparece en [3]). El término “Astrofísica Relativista” quedaba oficialmente acuñado entre la comunidad científica. Por los mismos años, Yákov Zeldovich e Igor Novikov trabajaban en su obra *Relativistic Astrophysics*, cuyo primer volumen (*Stars and Relativity*) apareció, en ruso, en el año 1967. En diciembre de 2013 se celebró la edición número 27 del *Texas Symposium*, la última hasta la fecha, y tuvo lugar de nuevo en Dallas para conmemorar los 50 años de Astrofísica Relativista. Al congreso asistieron unos 500 delegados y contó con 49 sesiones paralelas, lo que demuestra la importancia de este campo de la astronomía moderna.

Desde sus inicios, la teoría de la relatividad general fue confirmada en multitud de experimentos y encontró aplicación inmediata en astrofísica y cosmología. Uno de los tests clásicos fue la comprobación del principio de equivalencia entre masa inercial y gravitatoria que, en su formulación débil, ha sido comprobado con una precisión superior a 10^{-12} . Otro test clásico fue la explicación de la precesión anómala del perihelio de Mercurio, donde las correcciones relativistas dieron cuenta de la discrepancia en la precesión debida al tirón gravitatorio de los otros planetas del Sistema Solar, del orden de 43 segundos de arco por siglo. El test clásico más espectacular de la teoría es quizá la medida de la desviación gravitatoria de la luz al pasar por las proximidades de un objeto masivo. La teoría de Einstein predice un efecto exactamente superior en un factor 2 al predicho por la teo-

ría newtoniana. La medida experimental de dicho factor en la famosa expedición del eclipse de Sir Arthur Eddington en 1919 proporcionó prestigio mundial a Einstein. Las medidas más recientes concuerdan con la teoría con una precisión de $\sim 3 \times 10^{-4}$.

La desviación relativista de la luz es responsable del denominado efecto lente gravitatorio. El ejemplo más dramático se observa cuando la luz procedente de una fuente a distancia cosmológica (típicamente un cuásar) es desviada por una galaxia o por un cúmulo de galaxias que se encuentra en el camino de la luz entre la fuente y el observador. Si la lente es una única galaxia, el ángulo de desviación es 1 segundo de arco, mientras que para un cúmulo de galaxias puede llegar a ~ 20 segundos de arco. Como consecuencia, se producen imágenes múltiples de la fuente, especialmente cuando el alineamiento entre fuente, lente y observador es bueno, algo que ocurre típicamente una vez por cada 1 000 galaxias. Las observaciones de tales lentes gravitatorias gigantes se utilizan para detectar halos de materia oscura y para inferir detalles de la fuente. A escala estelar el mismo efecto es conocido como “microlente” y se da cuando es una estrella la que magnifica la luz de estrellas lejanas. Pese a que este efecto es mucho menos habitual, típicamente una vez por cada millón de estrellas, con rastreados suficientemente grandes puede ser observado y se usa de hecho para el descubrimiento de exoplanetas.

La primera predicción de la relatividad general fue el corrimiento al rojo gravitacional, que indica la variación relativa de la longitud de onda λ de la luz cuando ésta asciende por un potencial gravitatorio $\Phi = -GM/r$ donde G es la constante gravitatoria, M es la masa del objeto que genera el campo gravitatorio y r es el radio. Dicha variación relativa viene dada por $\Delta\lambda/\lambda \sim \Delta\Phi/c^2$. Mientras para el Sol es tan sólo $\sim 2 \times 10^{-6}$, para un objeto compacto como una enana blanca es ~ 0.001 y para una estrella de neutrones es ~ 0.1 . Dicho corrimiento al rojo gravitacional ha sido medido de forma muy precisa en púlsares, pero también con una precisión de $\sim 10^{-4}$ utilizando relojes atómicos en cohetes espaciales.

Un ejemplo astrofísico paradigmático de la importancia de utilizar gravedad e hidrodinámica relativistas en lugar de sus equivalentes clásicos lo proporciona el colapso del núcleo de una estrella masiva, con una masa en secuencia principal en el rango $\sim 9 - 30 M_{\odot}$, en el curso de una explosión supernova (M_{\odot} es la masa del Sol, $M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33}$ g). Al final de su evolución termonuclear, dichas estrellas desarrollan un núcleo dinámicamente inestable, compuesto principalmente por ^{56}Fe . El colapso del núcleo de hierro conduce a la formación de estrellas de neutrones (y posiblemente a agujeros negros para progenitores suficientemente masivos) liberando una energía

de ligadura gravitacional de $\sim 10^{53}$ erg, suficiente para producir una explosión supernova. Conforme el núcleo colapsa, la densidad en su centro llega incluso a superar la densidad de la materia nuclear, $\sim 2 \times 10^{14}$ g cm $^{-3}$. La materia está tan comprimida que una cucharada de la misma tendría una masa superior a 100 millones de toneladas. La evolución dinámica del colapso origina una onda de choque tras el rebote de la parte más interna del núcleo, una vez su densidad excede la densidad nuclear. Sofisticadas simulaciones numéricas que incorporan gravitación y magnetohidrodinámica relativistas, transporte radiativo de neutrinos y ecuaciones de estado microfísicas para describir la termodinámica de la materia nuclear (un aspecto sujeto a importantes incertidumbres) tratan de demostrar si la onda de choque es lo suficientemente fuerte como para alcanzar la superficie de la estrella y producir la explosión [4].

Durante la fase de colapso, la materia puede alcanzar velocidades de $\sim 0.4c$, lo que implica la necesidad de una descripción cinemáticamente relativista. Para la suerte del propio colapso, las predicciones de la gravedad newtoniana o relativista son marcadamente diferentes —en la teoría de Einstein la gravedad en las regiones centrales es hasta un 30 % más intensa—. Esto hace indispensable una descripción relativista de la hidrodinámica y de la gravedad, especialmente en el caso de un núcleo estelar en rotación donde existe un delicado balance entre la fuerza centrífuga y el tirón gravitatorio.

La relatividad general es también esencial para describir la estructura de los objetos resultantes de las explosiones supernova, las estrellas de neutrones. En relación a estrellas normales de masa comparable, $1 - 3M_{\odot}$, las estrellas de neutrones tienen un radio mucho menor, $\sim 10^{-5} R_{\odot}$ (R_{\odot} es el radio del Sol, $R_{\odot} = 6.9599 \times 10^{10}$ cm) y, por tanto, un potencial gravitatorio de superficie mucho mayor, $GM/Rc^2 \sim 10^{-1}$, y una velocidad de escape de $\sim 0.3c$. El enorme valor del potencial implica que la relatividad general es necesaria para determinar la estructura de las estrellas de neutrones. Incluso para las enanas blancas, donde el potencial de superficie es $\sim 10^{-4}$ y la gravedad newtoniana es adecuada para describir su estructura y equilibrio, la relatividad general es importante para analizar su estabilidad frente a perturbaciones. Dada una ecuación de estado para una estrella de neutrones, es posible calcular su radio, su momento de inercia y su estabilidad en función de su masa y su periodo de rotación, y comparar con las observaciones. El proceso inverso permitiría obtener las propiedades de la materia nuclear y su ecuación de estado, uno de los problemas abiertos más importantes de la astrofísica nuclear.

Las estrellas de neutrones pueden observarse directamente como radiofuentes pulsantes o púlsares, el primero de los cuales fue observado en

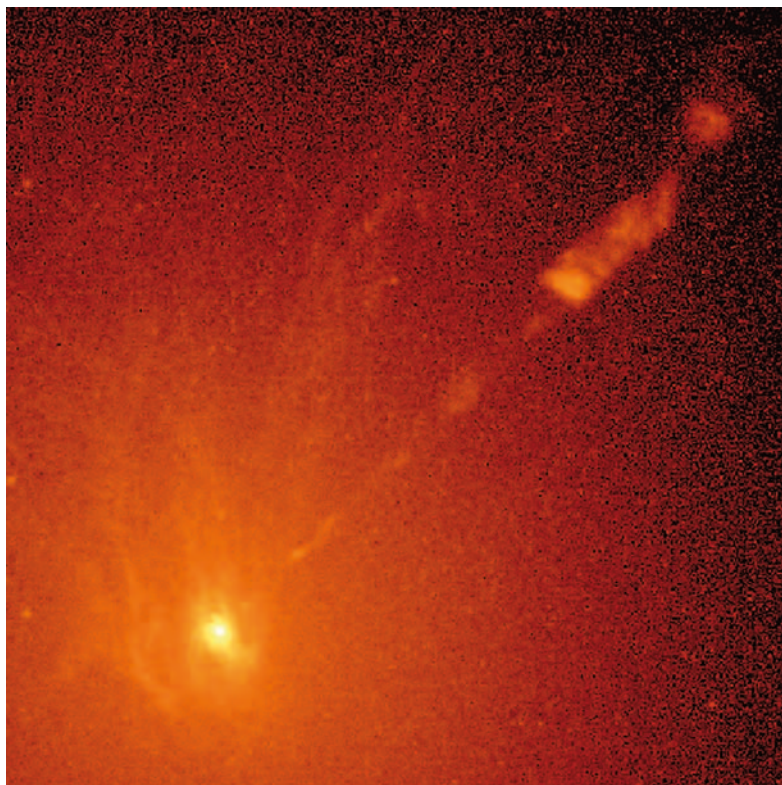


Fig. 1. Imagen del disco de acrecimiento del núcleo de la galaxia activa M87 y chorro relativista asociado, obtenida por el NASA/ESA Hubble Space Telescope. Las medidas del HST muestran que el disco gira tan rápidamente que debe contener un agujero negro supermasivo en el centro. Reconocimientos: Holland Ford, Space Telescope Science Institute/Johns Hopkins University; Richard Harms, Applied Research Corp.; Zlatan Tsvetanov, Arthur Davidsen y Gerard Kriss del Johns Hopkins; Ralph Bohlin y George Hartig del Space Telescope Science Institute; Linda Dressel y Ajay K. Kochhar del Applied Research Corp. en Landover, Md.; y Bruce Margon from the University of Washington en Seattle NASA/ESA.

1967 por Jocelyn Bell y Antony Hewish, e indirectamente como fuentes periódicas de rayos X en sistemas binarios (púlsares de rayos X). En particular, en las denominadas binarias de rayos X de baja masa, se han observado oscilaciones cuasi-periódicas a frecuencias de kHz que se corresponden con escalas temporales asociadas con las regiones más internas y, por tanto, más relativistas, de los discos de acrecimiento que rodean a la estrella de neutrones en tales sistemas.

Del mismo modo, una descripción relativista es necesaria en situaciones que involucran el colapso gravitatorio de estrellas con masas superiores a $\sim 30M_{\odot}$ para formar agujeros negros, o durante los últimos ciclos de la colisión de dos estrellas de neutrones en una binaria compacta. En la actualidad se cree que estos dos tipos de sucesos son los responsables de las llamadas erupciones de rayos gamma, destellos de radiación gamma asociados a explosiones extraordinariamente energéticas observadas en galaxias lejanas (a distancias cosmológicas). En particular, el colapso estelar (modelo colapsar o hipernova) es considerado el mecanismo responsable de las erupciones de larga duración (~ 20 s) mientras que la colisión de dos estrellas de neutrones (o una estrella de neutrones y un agujero negro) se considera responsable de las de corta duración (~ 0.2 s).

Tales erupciones están entre los eventos electromagnéticamente más brillantes del universo. Puesto que tienen lugar (afortunadamente) a distancias de billones de años luz de la Tierra, el hecho de que incluso a esas distancias sean visibles como un fenómeno extremadamente brillante implica la producción de enormes cantidades de

energía en el proceso —comparable a transformar completamente la masa del Sol en rayos gamma en unos pocos segundos y en una región espacial de $\sim 2\,000$ km de longitud—. Las observaciones indican que los rayos gamma no son emitidos de forma isótropa (en todas direcciones por igual como en la emisión de una bombilla) sino que la emisión está focalizada (como la luz del haz de un faro, que tan sólo puede verse cuando apunta directamente al observador), lo que da cuenta de parte del brillo percibido. El mecanismo para la focalización de la energía a lo largo de un haz relativamente estrecho, implica que la materia se propaga a velocidades relativistas formando un chorro (o jet). Los modelos teóricos estiman que la materia responsable de la emisión gamma debe viajar a velocidades ultrarrelativistas, superiores al 99.99 % de la velocidad de la luz [5].

La teoría de la relatividad general se ha incorporado de manera esencial en la descripción de los agujeros negros [6]. La primera solución de las ecuaciones de Einstein, asumiendo simetría esférica, fue obtenida por Karl Schwarzschild en diciembre de 1915, apenas un mes después de la publicación de la teoría. Esta solución, que se conoce como métrica de Schwarzschild, describe el campo gravitatorio en el exterior del horizonte de sucesos de un agujero negro estático sin carga eléctrica ni momento angular, y que se origina tras un proceso de colapso gravitatorio en simetría esférica. Dicho objeto viene pues totalmente caracterizado por su masa únicamente. Años más tarde, en 1963, Roy Kerr obtuvo la solución de las ecuaciones de Einstein que describe el espacio-tiempo exterior a un agujero negro en rotación y sin carga eléctrica. Un agujero negro de Kerr está completamente caracterizado por tan sólo dos números, su masa y su momento angular específico (por unidad de masa). El descubrimiento de la métrica de Kerr, que coincidió con la obtención del primer espectro de un cuásar, el de la radiofuente 3C273, tuvo implicaciones astronómicas muy importantes, pues podía explicar una de las mayores fuentes de energía del universo. En efecto, al poco tiempo de su descubrimiento se puso de manifiesto que un agujero negro podía transformarse en un objeto luminoso al capturar materia de sus alrededores. Este proceso, denominado acrecimiento, no es radial para un agujero negro de Kerr sino que debido a la rotación y al arrastre del espacio exterior, ocurre típicamente a través de un disco. La viscosidad en el disco es la causante de que el gas no se encuentre en órbitas circulares estables alrededor del agujero negro. Así, un protón alcanzará el radio interno del disco en una órbita espiral, liberando su energía de ligadura en forma de calor antes de caer desde dicho radio hasta el horizonte de sucesos. La energía liberada por unidad de masa en este proceso es inmensa y varía desde $\sim 0.06c^2$ para un agujero negro sin rotación

(es decir, de Schwarzschild) hasta $\sim 0.42c^2$ para un agujero negro de Kerr girando a la máxima rotación permitida. La eficiencia de este proceso es muy superior a la obtenida en procesos de fisión nuclear. Aquí radica su atractivo para explicar las primeras observaciones de los enigmáticos cuásares, analizadas en el primer *Texas Symposium* en 1963, que pueden brillar hasta 1000 veces más que las galaxias en las que habitan. En la actualidad, existe consenso científico en considerar a un cuásar como la región compacta en el centro de una galaxia masiva rodeando a un agujero negro supermasivo central. El tamaño de la región puede alcanzar hasta 10 000 veces el radio de Schwarzschild, $2GM/c^2$, y su luminosidad deriva de la masa del disco de acrecimiento al ser capturada por el agujero negro.

En muchos contextos astrofísicos que involucran procesos de acrecimiento, la teoría newtoniana de la gravedad es suficiente. La experiencia ha demostrado que la exploración del régimen relativista se beneficia del uso de potenciales gravitatorios modelo. En particular, el potencial pseudo-newtoniano de Paczyński-Wiita para un agujero negro de Schwarzschild aproxima los efectos de relatividad general con una precisión del 10-20 % fuera del radio de la órbita marginalmente estable, situada en $r = 6GM/c^2$. Sin embargo, para estudios rigurosos se requiere un formalismo capaz de dar cuenta del agujero negro con rotación máxima. Para tales espacio-tiempos con rotación, las fuerzas gravitatorias no pueden ser totalmente descritas con formalismos basados en potenciales escalares. Además, modelar regiones geométricas del agujero negro de Kerr como la ergosfera, sería complicado sin una descripción métrica. Mientras el grueso de la emisión electromagnética implicada en procesos de acrecimiento sobre agujeros negros ocurre en regiones donde el campo gravitatorio es newtoniano (débil) sólo las características observables atribuidas a las regiones más internas y próximas al horizonte de sucesos, como las líneas de emisión de rayos X, corridas al rojo gravitacionalmente y ensanchadas por efectos relativistas en las inmediaciones de un agujero negro de Kerr, pueden depender crucialmente de la naturaleza del espacio-tiempo.

Uno de los fenómenos astronómicos más comúnmente observados son los chorros bipolares de plasma, significativamente colimados, y emitidos a altas velocidades a lo largo del eje de rotación de un objeto central. En ocasiones, dicho material puede alcanzar velocidades relativistas, como en los chorros observados en núcleos activos de galaxias, micro-cuásares y erupciones de rayos gamma. Tales chorros relativistas pueden llegar a alcanzar longitudes de varios miles de años luz, como el observado en la galaxia elíptica M87 y cuya fotografía acompaña este artículo. En los chorros de muchas radiofuentes asociadas

con núcleos activos de galaxias es habitual inferir velocidades superiores a c . Esta ilusión óptica se produce cuando la materia se mueve a velocidades muy próximas (pero inferiores) a la velocidad de la luz, acercándose (o alejándose) casi frontalmente al (del) observador. Para que ocurra dicha ilusión, las velocidades reales del chorro deben alcanzar al menos el 99 % de la velocidad de la luz. Un ejemplo es el blazar 0827+243 (un blazar es un núcleo activo de galaxia cuyo chorro más próximo se acerca al observador de manera casi frontal) donde se han detectado velocidades aparentes del plasma de hasta $25c$, mientras en realidad tan “sólo” se mueve a más de $0.999c$.

Los procesos físicos que producen tales chorros relativistas involucran la aceleración magnetohidrodinámica de material del disco de acrecimiento (mecanismo de Blandford-Payne) o la extracción de energía rotacional de la ergosfera de un agujero negro de Kerr por procesos magnéticos (mecanismos de Penrose y de Blandford-Znajek). El modelo de Blandford-Payne (7) se basa en la existencia de un campo magnético poloidal de gran escala atravesando el disco. Por conservación del momento angular, puede demostrarse la formación de flujos acelerados cuando las líneas de campo forman un ángulo suficientemente grande con el disco. En el mecanismo de Blandford-Znajek [8], el agujero negro es un conductor giratorio magnetizado cuya energía rotacional puede extraerse mediante un par de fuerzas magnético que da lugar a un flujo de Poynting. Finalmente, en el mecanismo de Penrose magnetizado [9] las líneas de campo magnético que cruzan la ergosfera son retorcidas como consecuencia del arrastre del espacio-tiempo. El trenzado de las líneas se propaga hacia fuera como un tren de ondas de Alfvén torsionales, transportando energía electromagnética. La viabilidad de estos mecanismos se intenta esclarecer mediante simulaciones numéricas.

La teoría de la relatividad general también predijo la existencia de radiación gravitatoria, ondulaciones del espacio-tiempo producidas por la aceleración de grandes masas en regiones compactas, como las colisiones de agujeros negros o estrellas de neutrones o las explosiones supernova. Estas ondas, sin análogo newtoniano, se propagan a la velocidad de la luz, llevando información sobre sus orígenes. De naturaleza y propiedades distintas a las ondas electromagnéticas, su detección directa y su estudio pueden provocar una revolución en nuestra comprensión del universo. Lejos de las fuentes que las producen, su amplitud es tan extraordinariamente pequeña que permanecen esquivas a su detección directa. Hasta la fecha, sólo han sido indirectamente “detectadas” en conexión con el descubrimiento en 1974 del púlsar binario PSR 1913+16 por Russell Hulse y Joseph Taylor [10]. La relatividad general proporciona la explicación teórica de la dinámica orbital

de dicho objeto, pues el ritmo al cual las ondas gravitatorias extraen energía y momento angular del sistema proporciona el ritmo de disminución del periodo orbital, obteniéndose un acuerdo entre la teoría y los datos observacionales con una precisión de 10^{-3} . Similares resultados se han obtenido más recientemente para el púlsar doble PSR J0737-3039. Como ya hemos comentado, hay en marcha importantes esfuerzos experimentales (LIGO, VIRGO, KAGRA, eLISA, IPTA, SKA) para la detección directa de ondas gravitatorias [2]. Dicho objetivo constituye uno de los principales desafíos de la investigación actual en astrofísica relativista.

Para terminar, conviene también señalar que el modelo cosmológico estándar descansa sólidamente en la relatividad general. Soluciones de las ecuaciones de campo que describen un universo en expansión, con curvatura espacial, isótropo y homogéneo, fueron encontradas por Friedman, Lemaitre y otros, y constituyen la base del modelo estándar, el denominado modelo de concordancia del Big Bang o modelo Λ -CDM. Las observaciones de la radiación de fondo de microondas y del universo local, han permitido concluir que el universo es actualmente plano, tiene una edad de $\sim 13.7 \times 10^9$ años, y se encuentra en expansión acelerada bajo la influencia de una constante cosmológica dominante, la denominada energía oscura, que constituye alrededor del 69% del contenido energético del universo. Además, contiene un 26% de materia oscura fría no bariónica y apenas un 5% de materia bariónica ordinaria.

Pese a que la Astrofísica Relativista ha conseguido explicar muchos de los enigmas asociados con los fenómenos más energéticos del universo, todavía aguardan por delante muchos desafíos. Éstos van desde los objetos compactos a la astro-

física de plasmas, pasando por el “sector oscuro” del universo y la física del universo primigenio. Los avances tecnológicos en la observación, en la supercomputación, y en la modelización teórica, incorporando la relatividad general como pieza fundamental del análisis, permitirán seguir avanzando en nuestro conocimiento del cosmos.

Referencias

- [1] S. L. SHAPIRO y S. A. TEUKOLSKY, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars: The Physics of Compact Objects* (Wiley Online Library, 2007).
- [2] J. A. FONT, A. SINTES y C. SOPENA, arXiv:1506.08474
- [3] E. L. SCHUCKING, *Physics Today*, **42**, 8, 46 (1989).
- [4] H.-Th. Janka, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, **62**, 407-451 (2012).
- [5] N. GEHRELS, E. RAMIREZ-RUIZ y D. B. FOX, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **47**, 567-617 (2009).
- [6] S. CHANDRASEKHAR, *The Mathematical Theory of Black Holes* (OUP Oxford, 1998).
- [7] R. D. BLANDFORD y D. G. PAYNE, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **199**, 888-908 (1982).
- [8] R. D. BLANDFORD y R. L. ZNAJEK, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **179**, 488-456 (1977).
- [9] R. PENROSE, *Riv. Nuovo Gimento*, **1**, 252-276 (1969).
- [10] R. A. HULSE y J. H. TAYLOR, *ApJ*, **195**, L51 (1975).

José A. Font
Departamento de Astronomía
y Astrofísica,
Universitat de València,
Observatori Astronòmic,
Universitat de València



I REUNIÓN GELUR (RSEF) USTS 2015 “ULTRAFast SCIENCE AND TECHNOLOGY SPAIN 2015”

Martes 24 de noviembre de 2015 - 12:00 pm

La I Reunión “Ultrafast Science and Technology Spain 2015” está en marcha



Más información en USTS 2015. Para cualquier duda, por favor, manda un email a usts2015@ultrafast.es



La relatividad numérica

Miguel Alcubierre

Max-Planck-Institute for Gravitational Physics (Albert-Einstein-Institute), Potsdam; Zuse-Institute, Berlin; Center for Computation & Technology at Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana; AHM Software GmbH, Innsbruck, Austria (cortesía de Werner Benger).

Introducción

La relatividad general es la teoría moderna de la gravitación. Postulada por Einstein en 1915, la relatividad general ha mostrado tener un enorme poder predictivo y hasta la fecha ha pasado con extraordinaria precisión todas las pruebas experimentales y observacionales a que se le ha sometido. Entre sus logros más importantes se encuentran la predicción de objetos exóticos como las estrellas de neutrones y los agujeros negros, así como el modelo cosmológico de la Gran Explosión. Otra de sus predicciones son por supuesto las ondas gravitacionales, que si bien aún no han sido detectadas de manera directa, cuentan con una poderosa evidencia indirecta en la forma del decaimiento de la órbita del pulsar binario de Hulse y Taylor [1]. Más aún, hoy en día existe una red internacional de detectores de ondas gravitacionales, entre los que se puede mencionar a GEO600, VIRGO y LIGO [2], que muy probablemente detecten dichas ondas de manera directa en los próximos años, y casi con seguridad antes de que termine esta década¹.

Sin embargo, pese a su elegancia conceptual, la relatividad general resulta ser una teoría enormemente compleja. Las ecuaciones de campo de Einstein forman un sistema de 10 ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales en 4 dimensiones, y en su forma más general contienen varios miles de términos. Debido a esto, soluciones exactas a dichas ecuaciones solo se conocen en situaciones con alto grado de simetría: soluciones con simetría esférica o axial, soluciones homogéneas e isotrópicas, soluciones estacionarias, etc. Si se busca encontrar soluciones en situaciones astrofísicas realistas, con campos gravitacionales intensos y dinámicos, es necesario recurrir al uso de técnicas numéricas. De aquí surge el campo de la relatividad numérica.

El inicio de la relatividad numérica propiamente dicha se puede fijar en 1964 con los trabajos pioneros de Hahn y Lindquist [3], en donde intentaron simular por primera vez la colisión de frente de dos agujeros negros. Es interesante notar que este trabajo ocurrió incluso antes de que el término “agujero negro” fuera acuñado por Wheeler en 1967. En esa época aún no quedaba clara la manera de escribir las ecuaciones de la relatividad general como un problema de valores

iniciales, y se entendía muy poco sobre cómo elegir de manera adecuada las coordenadas. Las primeras simulaciones realmente exitosas fueron las que llevaron a cabo Smarr y Eppley a mediados de los 70 [4], de nuevo en el contexto de la colisión de frente de dos agujeros negros. Debido al escaso poder de cómputo con que se contaba en esa época, esas primeras simulaciones se vieron restringidas al caso de simetría axial con baja resolución.

Esta situación ha cambiado de manera radical en las últimas décadas. En la actualidad la relatividad numérica ha alcanzado un estado de gran madurez. El desarrollo de técnicas numéricas robustas, junto con un creciente entendimiento de la estructura de las ecuaciones de campo y condiciones de coordenadas, así como una explosión en la velocidad y capacidad de memoria de las supercomputadoras, han tenido como resultado el hecho de que hoy en día sea posible simular la colisión de agujeros negros con masas y espines distintos en órbitas espirales, permitiendo un cálculo preciso de la emisión de ondas gravitacionales. Por otro lado, el desarrollo de técnicas numéricas de hidrodinámica, e incluso magneto-hidrodinámica relativista, han permitido estudiar en detalle el colapso y la colisión de estrellas de neutrones. La relatividad numérica se ha acercado recientemente al campo de la astrofísica relativista, permitiendo simulaciones de sistemas cada vez más complejos y realistas. Es importante también mencionar el descubrimiento de Choptuik de fenómenos críticos en el colapso gravitacional [5], un resultado que ha dado lugar a un gran número de estudios tanto numéricos como teóricos.

El formalismo de la relatividad numérica

En la relatividad general el campo gravitacional se describe como una distorsión de la geometría del espacio-tiempo. Dicho de otra manera, en presencia de un campo gravitacional el espacio-tiempo deja de ser plano y se vuelve curvo. Las ecuaciones que describen este campo gravitacional se conocen como las ecuaciones de campo de Einstein, y relacionan la curvatura del espacio-tiempo con la distribución de energía y momento asociada a la materia que actúa como la fuente del campo. Las ecuaciones de Einstein son conceptualmente muy elegantes, pero dicha elegancia esconde una enorme complejidad. En lugar de una ecuación sencilla para el potencial gravitacional en la teoría de la gravitación de Newton, en el caso de la relatividad general obtenemos un conjunto de 10 ecuaciones altamente complejas. Mas aún, en dichas

¹ Escribo estas palabras a menos de una semana de que la versión avanzada de LIGO entrara en operación. Una detección de ondas gravitacionales parece ya inminente, y lo mismo podría ocurrir en un año que en unos pocos días. Es realmente un momento de gran emoción.

ecuaciones el espacio y el tiempo aparecen de una manera equivalente, y no es evidente cómo separar uno de otro. Esto representa un importante obstáculo cuando se requiere pensar en la evolución del campo gravitacional en el tiempo.

Históricamente se han propuesto varias formas de separar las ecuaciones de Einstein de manera que nos permitan estudiar la evolución de un campo gravitacional en el tiempo dados ciertos valores iniciales. La más comúnmente usada (que no la única) se conoce como el formalismo 3+1, y consiste en rebanar el espacio-tiempo de 4 dimensiones en una serie de “hojas” tridimensionales que representan distintos instantes de tiempo en el espacio físico. Dado que en la relatividad la simultaneidad no es absoluta, esta elección de rebanadas instantáneas es altamente arbitraria. Una vez hecho esto, las ecuaciones de Einstein se separaron de manera natural en dos grupos: 4 ecuaciones que relacionan la geometría del espacio en un instante dado, conocidas como las constricciones (o ligaduras) de energía y momento, y 6 ecuaciones más que representan la evolución de dicha geometría en el tiempo. El resultado de este procedimiento da lugar a las llamadas ecuaciones de Arnowitt-Deser-Misner (ADM) [6], derivadas por primera vez en 1962 en el contexto de la cuantización de la gravedad, pero posteriormente adaptadas para su uso en la relatividad numérica por York en 1979 [7].

El estudio de las 4 ecuaciones de restricción resultó en el pronto desarrollo de técnicas para encontrar datos iniciales adecuados para varias situaciones físicas. En particular, para finales de la década de los 70 se entendía muy bien cómo obtener datos iniciales semi-analíticos para múltiples agujeros negros en interacción con distintas masas y momentos angulares, generalizando así varios trabajos de 15 años atrás [8]. El estudio de las restantes 6 ecuaciones de evolución, sin embargo, resultó ser considerablemente más complejo, y hasta cierto punto detuvo el desarrollo de la relatividad numérica durante cerca de 20 años. Esto desde luego no significa que en durante las décadas de los 80 y 90 no se continuara con avances importantes en la complejidad de las simulaciones que se realizaban, sino que dichas simulaciones mostraban serias inestabilidades numéricas que impedían estudiar los sistemas de interés por tiempos largos, y cuyo origen no era entendido del todo.

El problema de fondo resultó estar relacionado con la estructura de las ecuaciones de Einstein, y en particular lo que se conoce como la formulación de valores iniciales de la teoría, es decir, la posibilidad de encontrar soluciones de las ecuaciones a partir de ciertos valores iniciales de manera única y continua. Es sabido desde los trabajos seminales de Choquet-Bruhat en 1952 [9] que la relatividad general admite un problema de valores iniciales bien planteado. Sin embargo, dicho resultado depende crucialmente tanto de la manera en la que se sepa-

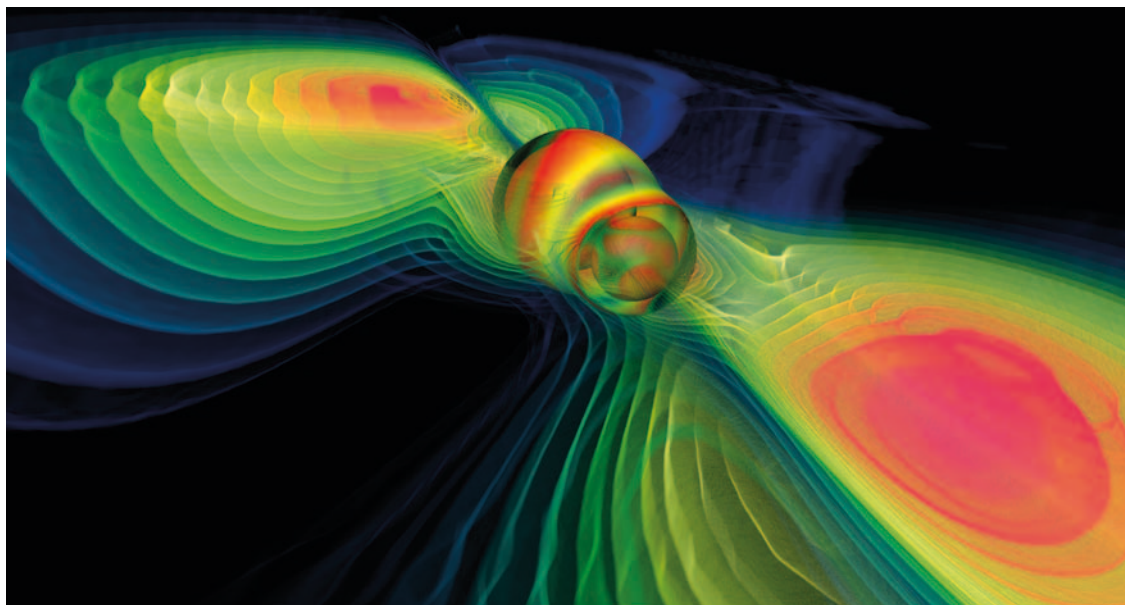
ren las ecuaciones de Einstein como de la manera en la que se eligen las coordenadas. Las ecuaciones de evolución obtenidas por ADM no son únicas, y siempre se les puede añadir múltiples arbitrarios de las constricciones que no afectan a las soluciones físicas pero que pueden alterar de manera significativa su estructura matemática. Las ecuaciones originales de ADM y York resultan no tener la estructura adecuada, y durante las décadas de los 80 y 90 se hicieron una serie de intentos por modificarlas para obtener sistemas de ecuaciones mejor comportados matemáticamente. Durante la década de los 90 varios grupos, entre los que destacan Shibata y Nakamura, y Baumgarte y Shapiro [10] propusieron una modificación de las ecuaciones ADM que resultó ser mucho mejor adaptada a las simulaciones numéricas. Dicha formulación, conocida como BSSN por las siglas de sus autores, ha resultado ser tan robusta que hoy en día la utilizan la mayor parte de los códigos de relatividad numérica. Cabe mencionar, sin embargo, que la formulación BSSN no es la única que se utiliza, y que nuevas formulaciones han sido propuestas durante los últimos 15 años.

Paralelamente al trabajo sobre la estructura matemática de las ecuaciones de evolución fue necesario estudiar las condiciones de coordenadas que podían usarse de manera exitosa en la relatividad numérica. En el formalismo 3+1 dicha elección de coordenadas consiste primero en elegir la manera en la que se rebana el espacio-tiempo en hojas tridimensionales, conocida como la elección de la foliación, y segundo en elegir como se propagan las coordenadas del espacio tridimensional de una hoja a la siguiente al avanzar el tiempo, conocida como la elección de vector de corrimiento. Desde finales de los 70 existían ya propuestas en ambos sentidos, desarrolladas principalmente por Smarr y York [11], motivadas por argumentos geométricos y que resultaban ser muy bien comportadas matemáticamente. Sin embargo, dichas propuestas requerían resolver sistemas de ecuaciones diferenciales parciales de tipo elíptico que resultaban muy complejas en la práctica, particularmente en tres dimensiones. La búsqueda de condiciones inspiradas en las propuestas clásicas de Smarr y York, pero más simples de aplicar en la práctica, dio fruto en la década de los 90 e inicios del 2000 con los trabajos de Bona y Masso y Alcubierre *et al.* [12].

Así, a principios de la década de los 2000 parecía que todos los ingredientes estaban ya listos para lograr simulaciones robustas y estables de espacio-tiempos complejos y dinámicos sin simetrías, en particular en el caso de sistemas de dos agujeros negros.

Simulaciones de agujeros negros

La simulación de la colisión de dos agujeros negros fue considerada durante cuatro décadas como el santo grial de la relatividad numérica, desde los trabajos pioneros de Hahn y Lindquist. Existen



Max-Planck-Institute for Gravitational Physics (Albert-Einstein-Institute), Potsdam; Zuse-Institute, Berlin; Center for Computation & Technology at Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana; AHM Software GmbH, Innsbruck, Austria (cortesía de Werner Benger).

varias razones para ello. En primer lugar, los agujeros negros son soluciones de vacío, por lo que se pueden estudiar sin añadir complicaciones extras como la hidrodinámica o el transporte de radiación. Debido a esto representan un problema más limpio, y son la expresión más pura del problema de dos cuerpos en la relatividad general. Por otro lado, la colisión de dos agujeros negros es quizá el fenómeno astrofísico más violento que podemos imaginar, y por lo mismo son la fuente más prometedora de ondas gravitacionales en el universo. Por supuesto, los agujeros negros tienen sus propias complicaciones, desde la existencia de un horizonte de eventos que separa causalmente al interior del exterior, hasta la presencia de singularidades en su centro donde el campo gravitacional se vuelve infinito. Diversas técnicas fueron desarrolladas para tratar con estas complicaciones, entre las que vale la pena mencionar la idea de cortar el interior de un agujero negro de la simulación numérica, conocida como “escisión de la singularidad” y propuesta inicialmente por Unruh en 1984.

Durante los 70 y 80 las simulaciones se restringieron a colisiones de frente, astrofísicamente poco realistas pero que tenían la ventaja de tener simetría axial por lo que podían realizarse con recursos de cómputo relativamente modestos. Para principios de los 90 el poder de cómputo había crecido, y se puso la mira en la simulación de la colisión en espiral de dos agujeros negros en órbita, un problema mucho más realista y que estaba motivado por la posibilidad de predecir las señales de ondas gravitacionales que podrían observarse con los detectores avanzados que en ese momento iniciaban su construcción. En los Estados Unidos un consorcio de universidades lanzó un “gran reto” para lograr la solución de este problema, pero las simulaciones estaban plagadas de inestabilidades numéricas debido en gran medida a que aún no se habían desarrollado las formulaciones ni las con-

diciones de coordenadas adecuadas, por lo que el proyecto no logró el éxito.

El problema fue finalmente resuelto por dos vías muy distintas en el año 2005 con unos pocos meses de diferencia. La primera solución fue lograda por Pretorius [13], quien utilizando una formulación no basada en el formalismo 3+1, más una mezcla condiciones de coordenadas desarrolladas por él mismo y técnicas de escisión de singularidades, logró por primera vez simular la colisión de dos agujeros negros tras varias órbitas. Meses después, y de manera independiente, los grupos de Campanelli *et al.* y Baker *et al.* [14] lograron también simular órbitas con un método más estándar que utilizaba el formalismo 3+1, las ecuaciones BSSN, las condiciones de coordenadas de Bona-Masso y Alcubierre *et al.*, y un ingrediente extra que resultó crucial y que consistía en dejar evolucionar la singularidad en el centro de los agujeros libremente. Este método, conocido como “punturas en movimiento”, ha resultado enormemente exitoso y es utilizado por la mayoría de los grupos de relatividad numérica hoy en día. Uno de los primeros resultados de estas simulaciones fue el comprobar que al chocar dos agujeros negros en órbita espiral, aproximadamente un 5 % de la masa inicial del sistema se pierde en la forma de ondas gravitacionales, quizá la conversión de materia a energía más eficiente que se conoce después de la aniquilación de materia y antimateria.

Después del éxito inicial, distintos grupos han realizado simulaciones de colisiones de agujeros negros cada vez más complejas, considerando agujeros de distintas masas y espines, en situaciones más y más realistas. Un resultado muy importante de dichas simulaciones es el hecho de que cuando la situación inicial es asimétrica, con agujeros negros de distintas masas o espín, el agujero negro final que resulta de la fusión termina con una velocidad de retroceso distinta de cero

respecto al centro de masa del sistema original. A primera vista este resultado puede resultar no sólo contraintuitivo sino incluso chocante, pues nuestra intuición basada en la conservación del momento lineal en colisiones de objetos newtonianos dice que esto no debería pasar. Sin embargo, basta recordar que el sistema emite una fuerte cantidad de ondas gravitacionales y dichas ondas llevan consigo no sólo energía sino momento, para ver que estas llamadas “patadas gravitacionales” son sólo el resultado de una emisión asimétrica de radiación gravitacional. Para ciertas configuraciones iniciales de los agujeros negros, particularmente el caso de espines inicialmente opuestos y perpendiculares al plano de la órbita, se obtienen “superpatadas” que impulsan al agujero negro final con velocidades de varios miles de kilómetros por segundo, velocidad suficiente para escapar incluso del pozo gravitacional de las galaxias más grandes que se conocen. Desarrollos recientes han visto a la comunidad de relatividad numérica sumando esfuerzos con la comunidad que opera los detectores de ondas gravitacionales para producir bancos de simulaciones que permitan deducir los parámetros de los agujeros negros originales (masas y espines) a partir simplemente de la señal de las ondas gravitacionales.

En otra dirección interesante, recientemente se han realizado simulaciones de colisiones de agujeros negros a velocidades relativistas, con posibles aplicaciones a la formación de agujeros negros microscópicos en aceleradores de partículas.

Hidrodinámica y campos magnéticos

Existe también gran interés en las simulaciones de sistemas astrofísicos con materia, en particular en el colapso gravitacional o la colisión de estrellas de neutrones. Esto ha motivado el desarrollo de códigos tridimensionales que no sólo resuelven las ecuaciones de campo de Einstein, sino las ecuaciones de la hidrodinámica, e incluso la magnetohidrodinámica, relativistas. Este tipo de códigos utilizan las mismas técnicas que los códigos que simulan agujeros negros, pero con la complejidad extra de las ecuaciones de Euler relativistas.

En este contexto vale la pena mencionar un desarrollo fundamental que se llevó a cabo a principios de los 90. Las ecuaciones de la hidrodinámica relativista se conocen desde hace décadas, pero para poder simularlas de manera robusta es necesario reescribirlas en lo que se conoce como la forma conservativa, donde las ecuaciones toman la forma de un balance entre el cambio en el tiempo de una densidad (de masa, energía o momento) y la divergencia de un flujo. La manera de escribir las ecuaciones de hidrodinámicas relativistas como un sistema conservativo fue desarrollada por el grupo de la Universidad de Valencia en 1991 [15].

Otro aspecto que es importante señalar es el hecho de que las ecuaciones hidrodinámicas pre-

sentan complicaciones propias ya que permiten la formación de ondas de choque, donde las distintas cantidades físicas desarrollan discontinuidades a partir de datos iniciales suaves. Las técnicas numéricas para simular de manera consistente este tipo de soluciones en el caso newtoniano fueron desarrolladas durante los 70 y 80 y resultan ser altamente sofisticadas. La formulación de Valencia permitió utilizarlas también en el caso relativista.

La hidrodinámica relativista en el contexto de la relatividad numérica ha tenido ya aplicaciones importantes en diversos problemas que van desde el flujos y acreción en objetos compactos, el estudio de jets relativistas, el estudio de estrellas en rotación, el colapso de estrellas compactas a agujeros negros, y la dinámica de binarias de estrellas de neutrones y de una estrella de neutrones y un agujero negro [16].

Retos futuros

La relatividad numérica ha alcanzado un estado de madurez en las últimas décadas. Desde sus inicios inciertos en los 60, ha logrado resolver importantes problemas conceptuales que impedían el desarrollo de su máximo potencial. Aunado al avance exponencial del poder de las computadoras, se ha llegado a la situación en la que es posible simular de manera robusta la colisión de dos agujeros negros, o de dos estrellas de neutrones, y predecir la señal de ondas gravitacionales que deberán detectar los grandes observatorios como LIGO, VIRGO o GEO600. Ha permitido también el descubrimiento de fenómenos críticos en el colapso gravitacional. Y más recientemente ha incursionado en el estudio de interacciones gravitacionales en dimensiones extra predichas por la teoría de cuerdas. ¿Cuáles son sus retos futuros?

Por supuesto, durante los próximos años la relatividad numérica continuará realizando simulaciones cada vez más precisas explorando el espacio de parámetros de las colisión de objetos compactos, ya sean agujeros negros o estrellas de neutrones. Continuará también estudiando el colapso del núcleo de una estrella de neutrones, y es de esperarse que aplicando técnicas más sofisticadas de hidrodinámica y transporte de radiación pueda ser de gran utilidad en la simulación de supernovas que hasta la fecha se realiza con códigos newtonianos. De la misma manera, la introducción de campos magnéticos y transporte de radiación permitirá estudiar de manera mucho más realista los discos de acreción alrededor de objetos compactos, en particular agujeros negros. El futuro de la relatividad numérica en el estudio de sistemas astrofísicos promete ser brillante.

Pensando más allá de los sistemas astrofísicos, es de esperarse que la relatividad numérica juegue un papel cada vez más importante en la cosmología. Las simulaciones cosmológicas de formación de estructura hasta el momento son en general

newtonianas, salvo algunas pocas excepciones en casos de alta simetría. La razón es doble: en primer lugar dichas simulaciones se llevan a cabo en general considerando un gran número de partículas y la fuerza gravitacional entre pares, lo que representa un obstáculo en el caso de la relatividad general, donde la gravitación no es una fuerza sino un campo extendido por todo el espacio. Desde un punto de vista más físico, el utilizar aproximaciones newtonianas parece estar bien justificado dado que en el caso cosmológico el campo gravitacional es débil y los tiempos característicos son muy grandes comparados con el tiempo que toma a la luz cruzar el dominio de la simulación. Incluso cuando se considera una constante cosmológica para simular los efectos de la energía oscura, esto se hace de manera newtoniana considerando una fuerza repulsiva externa. Pero hay diversas circunstancias cuando la aproximación newtoniana deja de ser adecuada y la relatividad numérica puede jugar un papel importante. Por ejemplo, en épocas muy cercanas a la Gran Explosión cuando el campo gravitacional deja de ser débil. O cuando se consideran volúmenes espaciales comparables con la escala del horizonte cosmológico, cuando no se puede ignorar la velocidad finita de la gravedad. Hay además otra suposición tácita cuando se utiliza la aproximación newtoniana, en general se asume que las presiones son bajas comparadas con la densidad de energía. Pero existen casos cuando esto no es así, como por ejemplo cuando se considera un campo escalar para modelar ya sea la materia o la energía oscuras.

Más allá de problemas astrofísicos o cosmológicos, considerando la enorme complejidad de las ecuaciones de Einstein, la relatividad numérica puede tener importantes aplicaciones para el estudio de problemas puramente teóricos en la relatividad general. El estudio de fenómenos críticos en el colapso gravitacional iniciado por Choptuik [5] es un claro ejemplo de esto. La relatividad numérica también puede ser de gran utilidad para buscar posibles contraejemplos a la conjetura de la censura cósmica. De hecho a principios de los 90 Shapiro y Teukolsky realizaron un estudio del colapso de configuraciones axisimétricas de polvo (partículas no colisionales) y mostraron una posible evidencia de la formación de singularidades desnudas para el caso de condiciones iniciales que corresponden a esferoides prolados [17], aunque dichos resultados han sido fuertemente criticados. Finalmente, la relatividad numérica puede ser de utilidad en el estudio de la formación de singularidades, tanto cosmológicas como en el interior de agujeros negros. Trabajo pionero en esta dirección ha sido llevado a cabo por Berger y Moncrief [18].

En conclusión, una vez habiendo superado los problemas iniciales, tanto a nivel de la formulación adecuada de las ecuaciones y las condiciones de coordenadas, así como las técnicas numéricas, la relatividad numérica ha alcanzado un estado de

madurez y promete tener importantes aplicaciones en astrofísica, cosmología e incluso a nivel de problemas teóricos. Podemos decir, sin temor a equivocarnos, que la relatividad numérica está iniciando una verdadera edad de oro.

Referencias

- [1] R. HULSE y J. TAYLOR, *Astrophys. J.* 195:L51–L53 (1975).
- [2] www.geo600.org; www.ego-gw.it; www.ligo.org
- [3] S. G. HAHN y R. W. LINDQUIST, *Ann. Phys.* 29:304 (1964).
- [4] K. EPPLEY, PhD thesis (Princeton University, Princeton, New Jersey, 1975); L. SMARR, A. CADEZ, B. DEWITT y K. EPPLEY, *Phys. Rev. D* 14(10):2443 (1976).
- [5] M. W. CHOPTUIK, *Phys. Rev. Lett.* 70:9 (1993).
- [6] R. ARNOWITT, S. DESER y C. W. MISNER, en *Gravitation: An Introduction to Current Research*, L. Witten (ed.) (John Wiley, p. 227, 1962).
- [7] J. W. YORK, en *Sources of Gravitational Radiation*, L. Smarr (ed.) (Cambridge Univ. Press, p. 83, 1979).
- [8] C. MISNER, *Phys. Rev.*, 118(4):1110 (1960); D.S. BRILL, y R. W. LINDQUIST, *Phys. Rev.* 131(1):471 (1963); J. M. Bowen y J. W. York, *Phys. Rev. D* 21(8):2047 (1980).
- [9] Y. BRUHAT, *Acta Mathematica* 88:141 (1952).
- [10] M. SHIBATA y T. NAKAMURA, *Phys. Rev. D* 52:5428 (1995); T. W. BAUMGARTE y S. L. SHAPIRO, *Phys. Rev. D* 59:024007 (1999).
- [11] L. SMARR y J. W. YORK, *Phys. Rev. D* 17(10):2529, (1978).
- [12] C. BONA, J. MASSO, E. SEIDEL, y J. STELA, *Phys. Rev. Lett.* 75:600 (1995); M. ALCUBIERRE, B. BRUEGMANN, P. DIENER, M. KOPPITZ, D. POLLNEY, E. SEIDEL, y R. TAKAHASHI, *Phys. Rev. D* 67:084023 (2003).
- [13] F. PRETORIUS, *Phys. Rev. Lett.* 95:121101 (2005).
- [14] M. CAMPANELLI, C. O. LOUSTO, P. MARRONETTI y Y. ZLOCHOWER, *Phys. Rev. Lett.* 96:111101 (2006); J. G. BAKER, J. CENTRELLA, D.-I. CHOI, M. KOPPITZ y J. VAN METER, *Phys. Rev. D* 73:104002 (2006).
- [15] J. M. MARTÍ, J. M. IBÁÑEZ y J. A. Miralles, *Phys. Rev. D* 43:3794 (1991).
- [16] L. REZZOLLA y O. ZANOTTI, *Relativistic Hydrodynamics* (Oxford Univ. Press, 2013).
- [17] S. L. SHAPIRO y S. A. TEUKOLSKY, S. A., *Physical Review Letters* 66, 994-997 (1991).
- [18] B. K. BERGER, Proceedings of the 14th International Conference on General Relativity and Gravitation, World Scientific, Singapore (1997); B. K. BERGER y V. MONCRIEF, *Phys. Rev. D* 48: 4676 (1994).

Miguel Alcubierre

Instituto de Ciencias Nucleares,
Universidad Nacional Autónoma
de México





Agujeros negros, sus análogos y termodinámica

Carlos Barceló

La Relatividad General conceptualiza la gravedad como geometría. Esta atractiva circunstancia nos ha conducido a imaginar el universo como un todo formado por un continente sin fronteras, el espacio-tiempo, relleno de materia. Continente y contenido evolucionan dinámicamente de una forma ligada regida por las ecuaciones de Einstein. Sin embargo, cuando se calcula esta evolución partiendo de ciertas condiciones iniciales que parecen darse en la naturaleza, estas ecuaciones dan lugar a la aparición de singularidades, lugares donde el continente se desgarrando al descubierto un mar de incertidumbres. Dos son las situaciones en las que la aparición de singularidades parece inevitable: el origen del universo en forma de Big Bang y los agujeros negros, el destino final de la materia estelar tras su colapso gravitatorio. De alguna forma, en ambas situaciones la gravedad llega a actuar de forma extrema, por lo que quedan expuestos aspectos fundamentales de su comportamiento según la descripción relativista.

En este artículo vamos hablar de la segunda situación: vamos a exponer en forma de breve recorrido lógico los distintos pensamientos que han rodeado a los largo de los años al concepto de agujero negro. La narración no será estrictamente cronológica, tampoco pretende ser un estudio his-

toriográfico y mucho menos exhaustivo; más bien propone, como digo, seguir una lógica argumental a modo de lectura personal de la historia de los agujeros negros.

Nacimiento

En 1916, inmediatamente después de que Albert Einstein publicara la forma definitiva estándar de las ecuaciones de la nueva gravedad, Karl Schwarzschild encontró las primeras soluciones exactas de estas ecuaciones [1]. Las soluciones correspondían a cómo sería el campo gravitatorio alrededor de una distribución de materia incompresible con simetría esférica (el modelo más simple de estrella). En la nueva gravedad el campo gravitatorio viene especificado por 10 potenciales, en contraste con el único potencial de Newton, que se interpretan como descriptores de las características geométricas del tejido espacio-temporal. La materia curva el espacio-tiempo a su alrededor de una forma precisa regida por las ecuaciones de Einstein. Pues bien, la curvatura causada por una distribución esférica de materia era tal que si esta se compactaba en un radio menor que un radio crítico, conocido como radio de Schwarzschild o radio gravitacional y proporcional a la masa del objeto, algunos potenciales se hacían infinitos. También observó que, antes de llegar a una compacidad 1 (la compacidad se define como la razón entre el radio gravitacional y el radio estelar), compacidades mayo-

Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com)

res que $8/9$ daban lugar a una presión infinita en el centro de la configuración, por lo que ya sugirió que la Relatividad General no permitía estructuras tan compactas. Los números le daban la razón, para que el Sol alcanzara compacidades críticas éste tendría que colapsar hasta tener un radio de tan solo 3 km (actualmente tiene ~ 500.000 km) y una densidad mayor que la de los núcleos atómicos; la Tierra tendría que compactarse hasta tener 1 cm de radio. En aquellos días no parecía posible que esto pudiera suceder, se creía que las fuertes presiones que se generarían en la materia lo evitarían.

Inevitabilidad del colapso y regularidad del horizonte

La geometría de Schwarzschild parecía tener un final singular en la esfera asociada al radio gravitacional (una esfera de tamaño absolutamente macroscópico para masas estelares), por lo que muchos consideraron que en este límite dejaba de tener sentido físico. Aunque pudiera ser solamente un ejercicio matemático, algunos científicos se preguntaron qué les pasaría a las partículas que se dirigieran hacia esta superficie esférica. Costó alrededor de 45 años tener una respuesta clara y completa a esta pregunta matemática (esta se asocia a los trabajos de Martin Kruskal y George Szekeres de 1960 [2]). La respuesta es que la esfera de Schwarzschild no es singular, la geometría se extiende de forma regular más allá de esta esfera, por lo que las partículas podrían atravesarla sin encontrar ninguna obstrucción. En el interior de esta esfera, sin embargo, sí hay una singularidad genuina, la que corresponde a un radio cero.

Sin embargo, la pregunta fundamental seguía siendo, ¿puede este tipo de configuraciones formarse en la naturaleza? Un trabajo pionero de Robert Oppenheimer y Hartland Snyder en 1939 [3] mostró que una estructura estelar esféricamente simétrica podría colapsar bajo su propio peso compactándose sin límite hasta llegar a un radio cero. En el momento en que la estrella tuviese un radio menor que su radio gravitacional, la esfera de radio de Schwarzschild se convertiría en un horizonte de sucesos: las partículas podrían atravesar este horizonte pero solamente de fuera hacia dentro; desde el interior del horizonte de sucesos nada podría escapar hacia el exterior, ni siquiera la luz.

Por otra parte, en los años 30 Subrahmanyan Chandrasekhar y otros se dieron cuenta de que, utilizando la forma de presión cuántica más extrema conocida (la basada en la aversión de los fermiones a superponerse) no era posible encontrar estructuras estelares estables con masas mayores que unos ciertos límites [4]. En los años 60 la escuela capitaneada por John Wheeler dedujo una serie de teoremas estableciendo que esto era así para cualquier contenido material razonable [5]

(por contenido material razonable se entiende aquel que satisface las condiciones de energía de la relatividad general, condiciones que esencialmente requieren que la energía no adquiera valores negativos). Una estrella estable siempre podría ser desestabilizada añadiéndole más materia de tal forma que comenzara a implosionar bajo su propio peso. Si la estructura colapsa desde un radio inicial suficientemente mayor que su radio gravitacional (una compacidad inicial suficientemente alejada de la unidad), no parece haber una forma razonable de parar este colapso antes de cruzarse el radio gravitacional. Téngase en cuenta que si la masa en proceso de colapso fuese arbitrariamente grande, la densidad de la materia durante todo el colapso, incluido el momento de cruce del radio gravitacional, sería arbitrariamente baja, lo que hace difícil pensar en un mecanismo originado en la materia capaz de parar el colapso antes del cruce del radio gravitacional. Es interesante mencionar, aun sin entrar en detalles, que, si la materia comenzase el colapso partiendo de compacidades ya muy cercanas a la unidad, existe un mecanismo basado en la polarización del vacío cuántico que entraría en juego pudiendo cambiar la situación [6]. Sin embargo, ¿cómo se llegaría a una estructura de gran compacidad en primer lugar? Por ejemplo, un teorema debido a Hans Buchdahl [7] afirma bajo hipótesis razonables que no existen estructuras estables con compacidad mayor que $8/9$ (reminiscente del trabajo original de Schwarzschild). Como decimos, no parece posible evitar el cruce del radio gravitacional una vez que el colapso se ha iniciado.

Antes de seguir adelante necesito presentar aquí un concepto fundamental en relatividad general introducido en 1965 por Roger Penrose: las superficies atrapadas cerradas [8]. La materia causa curvatura en el espacio-tiempo y este espacio-tiempo a su vez rige el comportamiento de la materia que se mueve en él; en particular el movimiento de la luz, considerada como un tipo de materia, traza la causalidad del espacio-tiempo puesto que nada puede superar su velocidad. Pues bien, la curvatura de un espacio-tiempo puede ser tal que existan superficies bidimensionales, que por sencillez podemos imaginar como esferoidales, tal que si colocáramos emisores de luz en ellas incluso los rayos de luz enviados hacia fuera de la superficie viajarían en realidad inicialmente hacia dentro. Cuando en un colapso esférico se cruza el radio gravitacional se forman superficies atrapadas. La superficie que separa la zona con superficies atrapadas de aquella sin superficies atrapadas se conoce como horizonte atrapado, pues separa zonas al menos instantáneamente desconectadas causalmente. Este concepto de horizonte es local, instantáneo y no presupone ninguna simetría: solamente habla de la tendencia inicial de los rayos enviados hacia afuera, no de si esa tendencia se

mantendrá o no en el futuro; un horizonte de sucesos por el contrario se define como la separación entre zonas para siempre desconectadas.

Esta distinción entre horizonte absoluto (de sucesos) o temporal (atrapado) es fundamental: lo que la relatividad general predice con gran robustez es la inevitable formación de horizontes atrapados a partir de colapsos gravitatorios.

Singularidades y horizontes

Roger Penrose encontró unas relaciones fundamentales entre la presencia de horizontes atrapados y la de singularidades. Si se genera una superficie atrapada en el espacio-tiempo, la materia satisface una condición de energía y se cumple una condición razonable sobre la causalidad del espacio-tiempo, entonces se demuestra que en el interior de la superficie atrapada debe aparecer al menos una singularidad. La presencia de singularidades en el colapso gravitacional no era por tanto algo que aparecía debido a la hipótesis no realista de esfericidad exacta, es algo genérico. De forma recíproca Penrose también conjeturó que la aparición de una singularidad conllevaría la aparición de un horizonte de sucesos ocultándola para siempre a la vista (producir una demostración de un enunciado de este tipo sigue siendo un área activa de investigación). Por tanto la relatividad general estándar predice rupturas del continente espacio-temporal. Sin embargo, éstas solamente serían vistas por intrépidos observadores que se aventuraran a cruzar los horizontes de sucesos. Para el resto de observadores menos aventureros la relatividad general sería una teoría perfectamente autoconsistente.

Es importante destacar que los teoremas de singularidades, aunque matemáticamente incuestionables, no deberían interpretarse con la misma lógica física que la inevitabilidad de la formación de horizontes atrapados. En concreto, pensar que la materia en zonas cercanas a una singularidad va a satisfacer las condiciones de energía es una hipótesis fácilmente soslayable. Por el contrario, la importancia de los teoremas de singularidades reside en evidenciar que la forma de evitar la aparición de singularidades (sin introducir efectos causales) es hacer que la materia (entendida ahora como la parte que se iguala al tensor de Einstein en sus ecuaciones) desarrolle alguna violación de las condiciones de energía.

Las relaciones entre singularidades y horizontes no terminan aquí. Dado que la relatividad general estándar permite trabajar de forma consistente con soluciones de tipo agujero negro matemático (es decir, objetos con un horizonte de sucesos y singularidades internas) se puede estudiar la dinámica clásica de conjuntos de agujeros negros. En los años 70 se encontraron unas leyes que deberían obedecer estos agujeros negros, o más precisamente sus horizontes de sucesos (casi un

sinónimo de agujero negro). Estas leyes seguían un sorprendente patrón análogo a las leyes básicas de la termodinámica [9]. Por otra parte, en la misma época Jacob Bekenstein había argumentado que los agujeros negros deberían tener entropía (siendo esta proporcional al área de su horizonte de sucesos) para no producir su presencia una ruptura de la segunda ley de la termodinámica [10]. Sin embargo, por definición un agujero negro no emite nada desde su horizonte por lo que no se le puede asociar una temperatura. Entonces, ¿cómo podían tener entropía sin tener temperatura?

La pieza que le faltaba al puzzle la aportó Stephen Hawking en 1975 [11]. El éxito de la teorías cuánticas de campos y el sueño de una teoría unificada hizo pensar que la gravedad también debería tener una descripción cuántica más fundamental. Además, el que los agujeros negros tengan singularidades parece una llamada de auxilio directa a la teoría cuántica. Pues bien, Hawking incorporó parcialmente aspectos cuánticos a la formación de un agujero negro deduciendo que sus horizontes deberían radiar térmicamente con una temperatura inversamente proporcional a su masa. Las leyes de la termodinámica de agujeros negros dejaban de ser formales para adquirir una entidad real; la segunda ley de la termodinámica quedaba salvaguardada al añadir al conteo entrópico los agujeros negros (se habla en este caso de leyes generalizadas de la termodinámica). Sin embargo, aparecieron nuevos problemas...

El problema de la información

La emisión de radiación por parte de un agujero negro implicaba que éste iría perdiendo su masa progresivamente, se iría evaporando. Suponiendo la presencia de una singularidad en su interior, la evaporación del agujero negro se desarrolla formando pares de partículas en el horizonte de tal manera que el miembro de la pareja de energía positiva se emite hacia el espacio exterior (es la radiación que veríamos) mientras que el de energía negativa se dirige hacia la singularidad donde cancela parte de la energía allí acumulada; así hasta la completa desaparición de la misma. La naturaleza de este proceso hizo pensar a Hawking que la información cuántica en forma de correlaciones entre los pares desaparecerían con la desaparición del agujero negro y, por tanto, que el proceso de evaporación implicaría una pérdida de información (o coherencia) fundamental en el sistema [12]. Una de las reglas básicas de la mecánica cuántica sería violada por la formación y evaporación de agujeros negros. También hay que destacar que una vez añadido el ingrediente cuántico, tampoco los observadores exteriores a agujeros negros puede obviar para su evolución futura lo que sucede en el interior de los mismos: al final del proceso de evaporación la física que rija el comportamiento de la región singular quedaría a la vista.

Desde su formulación en 1976, este problema ha sido fuente de controversia y motivador de multitud de investigaciones. En la actualidad existe un cierto consenso sobre que es perfectamente posible y esperable que los agujeros negros se evaporen de forma completa y regular, sin dar lugar a ninguna pérdida de información; en 2004 el propio Hawking afirmó haber cambiado de opinión a la luz de los nuevos desarrollos [13]. La información estaría presente en la radiación de Hawking resultante pero distribuida de una forma altamente compleja (similar a lo que sucede cuando se quema un material y se analizan sus cenizas y gases resultantes). No hay un consenso sobre el mecanismo real que estaría detrás de la evaporación regular habiendo varias propuestas alternativas. Sin embargo, en todas ellas se deduce que los agujeros negros realmente no tendrían ningún horizonte de sucesos. Los agujeros negros ni son negros ni están causalmente desconectados del resto del universo. De hecho, ¿por qué los seguimos llamando agujeros negros? Pues porque estos agujeros negros en evaporación regular comparten con sus primos los agujeros negros clásicos el poseer horizontes atrapados de larga duración. Es éste el verdadero rasgo definitorio de lo que entendemos en la actualidad —muchas veces tácitamente— por agujero negro. Esta es una definición un tanto cualitativa pero adecuada; llamar agujero negro a cualquier objeto con un horizonte atrapado —definición que sería precisa— no tiene mucho sentido: si el horizonte atrapado tuviera una pequeña duración en términos astrofísicos y vista desde el exterior, el objeto no tendría ninguna característica reminiscente de lo que se ha venido entendiendo por agujero negro.

En las últimas décadas se ha trabajado mucho en analizar qué propiedades de los horizontes de sucesos son compartidas de alguna forma por los horizontes atrapados de larga duración, los cuales encarnan un concepto más débil, con menos estructura. Por ejemplo, se ha visto que las leyes generalizadas de la termodinámica siguen siendo válidas para esta nueva encarnación de los agujeros negros.

El problema trans-planckiano

Inmediatamente después de la propuesta evaporativa de Hawking, William Unruh señaló que ésta tenía un importante problema, aunque a la vez ofrecía una oportunidad única en la física [14]. El horizonte del agujero negro actuaba como una enorme lupa dejando al descubierto la física operante a escalas de longitud minúsculas, mucho más pequeñas que la escala de Planck (10^{-35} metros), o lo que es lo mismo, a frecuencias sobradamente trans-planckianas. La derivación de Hawking requería que la física a esas escalas fuese esencialmente equivalente a la que conocemos en escalas órdenes de magnitud mayores. Sin embargo, a la

escala de Planck la lógica cuántica sugiere que la propia estructura del espacio-tiempo como un continuo podría comenzar a desvanecerse. Por tanto, ¿se podía confiar en la propuesta de Hawking?

Una potencial respuesta a esta pregunta ha aparecido siguiendo un camino sorprendente. En 1981 el mismo Unruh identificó una analogía entre la propagación del sonido en ciertos fluidos y la de la luz en espacio-tiempos curvos; en principio se podría generar configuraciones de fluidos que simularan algunas de las características de los agujeros negros [15]. Este artículo de Unruh se suele tomar como el precursor de una nueva área de investigación conocida como gravedad análoga: el estudio de modelos análogos (maquetas) de configuraciones de interés gravitatorio, contruidos usando sistemas materiales típicos de laboratorio (fluidos, átomos fríos, sistemas ópticos, etc.), con la idea de obtener nuevas claves en el estudio de la gravedad. Uno de los puntos más atractivos de esta estrategia es que permite incluso realizar experimentos de laboratorio con los sistemas análogos, experimentos imposibles en sus contrapartidas reales. A partir de un artículo de Matt Visser de 1998 profundizando en la propuesta de Unruh, esta área comenzó un fuerte desarrollo estudiándose diversos modelos que en la actualidad están empezando a proporcionar importantes desarrollos experimentales [16].

Dado un agujero negro análogo, por ejemplo acústico, es evidente que su descripción continua deja de ser apropiada cuando nos acercamos a la escala de longitud en la que se comienza a apreciar la verdadera estructura atómica del fluido con el que está construido; de hecho, de forma efectiva las ondas acústicas adquieren relaciones de dispersión modificadas para longitudes de onda cortas o altas frecuencias —es decir, a partir de una frecuencia las ondas empiezan a viajar a velocidades distintas para frecuencias distintas—. Aunque estrictamente la relatividad general clásica no permite dispersión, pudiera ser que los efectos cuánticos en la escala de Planck introdujeran efectos dispersivos similares a los de los modelos análogos. En cualquier caso, esta perspectiva inmediatamente sugirió las siguientes preguntas: una relación de dispersión modificada ¿haría que un agujero negro no emitiera radiación de Hawking o la emitiera de forma distorsionada?, o por el contrario ¿la emisión de radiación de Hawking es algo robusto que no depende de las características propagativas de las altas frecuencias?

Después de diversas investigaciones al respecto hoy podemos decir que la presencia de radiación de tipo Hawking es fuertemente independiente de las leyes físicas que rijan las altas frecuencias por lo que, en este sentido, puede verse como un efecto de bajas energías asociado a la presencia de horizontes. Como contrapartida, estas investigaciones también indican que la observación de

radiación Hawking poco nos va a decir sobre la física trans-planckiana: el soñado efecto lupa parece no estar disponible.

Radiación Hawking en un laboratorio

Aunque el fenómeno de radiación de Hawking es como hemos visto de fundamental importancia conceptual, su observación en su contexto astrofísico se antoja imposible. La temperatura de Hawking que tendría un agujero negro de masa solar sería de tan solo unos nanoKelvin por lo que estaría siempre enmascarada por temperaturas mayores en el entorno (recuérdese que la radiación de fondo de microondas que llena el universo tiene una temperatura aproximada de 3 Kelvin). De aquí que las investigaciones en gravedad análoga de este fenómeno hayan generado gran expectación: probablemente sea nuestra única oportunidad de observarlo. Estas investigaciones comenzaron con un carácter eminentemente teórico pero finalmente han penetrado con fuerza en el mundo experimental. Comentaré solamente el a mi entender más claro y espectacular resultado. Recientemente el grupo de Jeff Steinhauer ha conseguido observar un fenómeno primo del de radiación de Hawking usando condensados de Bose-Einstein [17]. Estos son fluidos a temperaturas tan cercanas a cero que su comportamiento es totalmente cuántico y la aparición de radiación de tipo Hawking discernible. En concreto, tras la preparación de una configuración de fluido con un horizonte negro y otro blanco (el inverso de un horizonte negro, nada puede entrar en él, todo sale), se ha observado la aparición de lo que se conoce como efecto láser en agujeros negros: una amplificación de la radiación Hawking del horizonte negro debida a la reflexión en el horizonte blanco. Es de esperar que en unos años éste u otro grupo obtenga la primera observación de la versión análoga del fenómeno Hawking propiamente dicho.

Y después de 100 años...

Los agujeros negros han sido objeto de repulsión y fascinación a partes iguales; a nadie dejan impasible. A partir de los 60, tras conocerse la existencia de objetos tan compactos como los púlsares y la ingente cantidad de energía que emitían los cuásares (más allá de las razones esperables a partir de procesos de fusión nuclear), se empezó a considerar realista la idea de que hubiera agujeros negros en el universo. En la actualidad ¡sabemos! que existen objetos estelares muy oscuros, compactos y sin superficie aparente. Después de toda una historia problemática parece que los agujeros negros se han acabado por reivindicar ahí afuera. Sin embargo, en mi modesta opinión aún quedan muchas páginas por escribir de la historia de los agujeros negros.

¿Qué se esconde realmente detrás de estos objetos oscuros y compactos? Aunque el consen-

so actual (al menos aparente) es que sea alguna forma regular de agujero negro en evaporación, es importante resaltar que las observaciones de las que disponemos no garantizan que éste sea el caso; sólo las observaciones dictarán sentencia. Además, si estos objetos tienen realmente horizontes atrapados de larga duración puede que esta sentencia se retrase más que demasiado (¡la vida en evaporación de un agujero negro aislado de masa solar sería órdenes de magnitud mayor que la edad del universo!). ¿Se puede evitar este problema? ¿Hay todavía espacio para nuevas sorpresas? [18].

Baste decir para terminar estas líneas que regularizar la singularidad de un agujero negro clásico es un acto de naturaleza absolutamente no perturbativa: la geometría resultante del proceso regulador podría alejarse fuertemente de la geometría sin corregir. Tanto es así, que de entre los posibles finales a la historia de los agujeros negros no podemos descartar uno en el que tan sólo existieron en nuestros pensamientos.

Referencias

- [1] K. SCHWARZSCHILD, "On the Gravitational Field of a Point-Mass", "According to Einstein's Theory" y "On the Gravitational Field of a Sphere of Incompressible Liquid", "According to Einstein's Theory", publicadas en alemán en *Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften*; pp. 189 y 424 (1916); traducciones al inglés en *The Abraham Zelmanov Journal*, pp. 10 y 20 (2008).
- [2] M. KRUSKAL, "Maximal extension of Schwarzschild metric", *Phys. Rev.* 119, 1743 (1960); G. SZEKERES, "On the singularities of a Riemannian manifold", *Publ. Mat. Debrecen* 7, 285 (1960).
- [3] R. OPENHEIMER y H. SNYDER, "On Continued gravitational contraction", *Phys. Rev.* 56, 455 (1939).
- [4] S. CHANDRASEKHAR, "The maximum mass of ideal white dwarfs", *Astrophys. J.* 74, 81 (1931).
- [5] B. K. HARRISON, K. S. THORNE, M. WAKANO y J. A. WHEELER, *Gravitation Theory and Gravitational Collapse* (Univ. Chicago Press, 1965).
- [6] C. BARCELÓ, S. LIBERATI, S. SONEGO y M. VISSER, "Fate of gravitational collapse in semiclassical gravity", *Phys. Rev. D* 77, 044032 (2008).
- [7] H. A. BUCHDAHL, "General Relativistic Fluid Spheres", *Phys. Rev.* 116, 1027 (1959).
- [8] R. PENROSE, "Gravitational Collapse and spacetime singularities", *Phys. Rev. Lett.* 14, 57 (1965).
- [9] J. M. BARDEEN, B. CARTER y S. W. HAWKING, "The four laws of black hole mechanics", *Commun. Math. Phys.* 31, 161 (1973).
- [10] J. BEKENSTEIN, "Generalized second law of thermodynamics in black hole physics", *Phys. Rev. D* 9, 3293 (1974).
- [11] S. W. HAWKING, "Particle Creation by Black Holes", *Commun. Math. Phys.* 43, 199 (1975).
- [12] S. W. HAWKING, "Breakdown of predictability in gravitational collapse", *Phys. Rev. D* 14, 2460 (1976).

- [13] S. W. HAWKING, *Black holes and the information paradox*, en los "Proceeding" de la "17th International Conference, GR17", Dublín, Irlanda, julio 18-23 (2004); Editado por P. Florides, B. Nolan y A. Ottewill. Hackensack, USA: World Scientific (2005).
- [14] W. G. UNRUH, "Notes on black hole evaporation", *Phys. Rev. D* 14, 870 (1976).
- [15] W. G. UNRUH, "Experimental black hole evaporation", *Phys. Rev. Lett.* 46, 1351 (1981).
- [16] M. VISSER, "Acoustic black holes: Horizons, ergospheres, and Hawking radiation", *Class. Quant. Grav.* 15, 1767 (1998).
- [17] J. STEINHÄUER, "Observation of self-amplifying Hawking radiation in an analog black hole laser", *Nature Phys.* 10, 864 (2014).
- [18] C. BARCELÓ, R. CARBALLO-RUBIO, L. J. GARAY y G. JANNES, "The lifetime problem of evaporating black holes: mutiny or resignation", *Class. Quantum Grav.* 32, 035012 (2015).



Carlos Barceló

Instituto de Astrofísica
de Andalucía, IAA-CSIC, Granada



Con motivo de su décimo aniversario, la revista *Nature Physics* ha publicado una viñeta presentando diez de los mayores avances (o no) de la Física en los últimos diez años, que reproducimos con su permiso. Su autor es Jorge Cham, el creador de los populares PhD Comics, que narran las desventuras de un grupo de estudiantes de doctorado (y algún postdoc).

Gravedad cuántica de lazos

Jorge Pullin

La gravedad cuántica de lazos es uno de los enfoques que se están estudiando para aplicar las reglas de la mecánica cuántica al campo gravitatorio descrito por la teoría de la Relatividad General de Einstein. Presentamos un resumen introductorio de las principales ideas y resultados recientes.

© Freepik

De acuerdo a nuestro entender moderno, existen cuatro interacciones fundamentales en la naturaleza: fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria. Las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas son importantes en el dominio atómico y subatómico. Sabemos que en dichos dominios es necesario apelar a la teoría cuántica para tener una descripción correcta de la naturaleza. La fuerza gravitatoria, por otro lado, es irrelevante a nivel atómico y subatómico. La misma es importante a nivel macroscópico, en particular a nivel astronómico. En dichas escalas la descripción clásica parece ser suficiente. Es por ende lícito preguntarse: ¿hace falta cuantizar la gravedad? La respuesta es afirmativa, dado que no sabemos cómo acoplar en forma consistente teorías clásicas y cuánticas. Como es bien sabido, la imagen de la realidad provista por la teoría cuántica es muy distinta de la clásica. En particular, existen propiedades de sistemas que no están definidas hasta que uno mide el sistema. Eso dificulta acoplar sistemas clásicos y cuánticos. Para mayores detalles ver el artículo de Carlip (2008).

O sea, que no hay necesidad experimental de cuantizar la gravedad pero sí necesidad conceptual. Eso sugeriría que debería ser muy fácil proponer teorías cuánticas de la gravedad, dado que no hay evidencia experimental que les imponga restricciones. Sin embargo, no es así. Han probado ser muy difíciles de construir. La razón de ello es que el entendimiento moderno de la gravedad, provisto por la teoría de la Relatividad General de Einstein, indica que la gravedad no es en realidad una fuerza sino una deformación del espacio-tiempo. En esta concepción, la Luna no desarrolla una órbita alrededor de la Tierra porque actúa sobre ella una fuerza, sino porque la presencia de la Tierra distorsiona el espacio-tiempo en su vecindad y la trayectoria más natural no es una línea recta sino una órbita como la que se observa. La Relatividad General es extremadamente exitosa experimentalmente. Roger Penrose (1996) ha observado que la predicción de la órbita del pulsar binario PSR1913+16 es de una parte en 10^{14} , lo cual constituye la predicción teórica confirmada experimentalmente con mayor precisión en toda la física. O sea, que es inevitable tomar la teoría muy en serio a la hora de su cuantización.

Esto es lo que hace el problema de la gravedad cuántica tan único. Nunca antes nos habíamos enfrentado con la cuantización de una geometría. Siempre se había confrontado el cuantizar fuerzas entre partículas que viven en una geometría

física. Cuando el objeto central de una teoría es la geometría misma, los puntos del espacio-tiempo son indistinguibles entre sí hasta que uno asigna una geometría dada, debido a que no hay manera de identificar los puntos en la ausencia de una geometría. Esto indica que este tipo de teorías es invariante ante redistribuciones (continuas) de los puntos. Esto se conoce técnicamente como invariancia ante difeomorfismos. Y es lo que subyace latente al hecho de que las ecuaciones de la Relatividad General sean invariantes ante cambios generales de coordenadas. Nunca antes habíamos confrontado la cuantización de teorías invariantes ante difeomorfismos. Sólo en las últimas dos décadas se ha experimentado con teorías de este tipo, pero con ejemplos mucho más sencillos en su dinámica que la de la Relatividad General.

Aun ignorando estos asuntos conceptuales, existen problemas prácticos para cuantizar la gravedad. Las dos técnicas más importantes que se usaron para cuantizar las interacciones electrodébil y fuerte, el uso de teoría de perturbaciones y el uso de teoría de campos en el retículo, no funcionan en el caso de la gravedad. Los retículos chocan con la invariancia bajo difeomorfismos, dado que introducen una estructura rígida a priori que impide reasignar los puntos del espacio(tiempo). El enfoque perturbativo se enfrenta al problema de que la constante de acoplamiento de la gravedad no es adimensional sino que tiene dimensiones de longitud al cuadrado (las dimensiones de la constante de Newton en unidades naturales donde $\hbar=c=1$). Cuando uno hace perturbaciones aparecen diagramas de Feynman que involucran integrales en momento. Para mantener las expresiones dimensionalmente homogéneas, la presencia de una constante de acoplamiento dimensional implica que las sucesivas integrales en las potencias de la constante de acoplamiento en la serie perturbativa requieren potencias del momento cada vez más altas en el numerador, lo que las hace progresivamente más y más divergentes. Las divergencias en teoría cuántica de campos se suelen eliminar redefiniendo las constantes de acoplamiento a través del procedimiento conocido como renormalización. Sin embargo, debido al progresivo deterioro de las integrales en el caso de la gravedad, uno rápidamente se queda sin constantes para absorber las divergencias. Se podrían agregar contraterminos en la acción para corregir la situación, pero requeriría el uso de un número infinito de los mismos, lo que hace que la teoría no tenga poder predictivo. Se requerirían infinitos experimentos para determinar todos los términos.

Estos problemas llegaron a un punto muerto hacia la década de los 70, que llevó a dos perspectivas sobre el problema. Una porción de físicos considera que los problemas indican que la teoría de Einstein no es fundamental sino una aproximación a bajas energías de una teoría más fundamental y es esta última la que es renormalizable. Un ejemplo de esto es provisto por la teoría de Fermi de las interacciones débiles que también es no renormalizable y que resulta ser una aproximación de bajas energías de la teoría electrodébil, que sí lo es. Este grupo de físicos ha estado tratando durante las últimas cuatro décadas de encontrar dicha teoría subyacente. El ejemplo moderno más acabado de este enfoque son las teorías de (super) cuerdas.

Otro grupo de físicos considera que es prematuro abandonar la teoría de Einstein, fundamentalmente debido a lo distinta que es a todas las otras interacciones. Se considera que hay que examinar con más cuidado las técnicas de cuantización. Hay varios ejemplos de este enfoque, por ejemplo, gente que considera que hay que hacer teoría de perturbaciones de forma distinta, en el enfoque llamado *Asymptotic Safety*. O el uso de teorías en el retículo distintas a las usuales llamadas *Causal Dynamical Triangulations*. O el uso de conjuntos parcialmente ordenados, *Partial Ordered Sets*. La Gravedad Cuántica de Lazos forma también parte de este grupo de enfoques. De ella nos ocuparemos en este artículo.

La Gravedad Cuántica de Lazos ve su origen cuando Abhay Ashtekar (1986) notó que se podía reescribir la teoría de Einstein en términos de variables similares a las que se usan para describir las teorías de Yang-Mills que describen la interacción fuerte y la electrodébil. Inicialmente esto llevó a una gran esperanza de que las técnicas usadas para cuantizar dichas teorías se podrían importar de esta manera a la Relatividad General. Pero como argumentamos antes, dicha teoría es muy distinta a las otras teorías aun cuando uno la reescriba en términos de variables parecidas. Al final no muchas técnicas pudieron ser importadas, pero una sí lo fue: el uso de variables de lazos.

La mayoría de los físicos no está acostumbrado a tratar con funciones de lazos, lo cual puede llevar a confusión. La manera más sencilla de entender los lazos es pensar en el teorema de Stokes. El mismo nos dice que si uno conoce la circulación de un potencial vector (una “función de lazo” en el sentido que depende de una curva cerrada) uno conoce el flujo magnético en las áreas que tienen al “lazo” como frontera. No es difícil convencerse de que si uno supiera el valor de la circulación para todos los lazos posibles, uno puede reconstruir el campo magnético (simplemente tómense lazos pequeños para los que el flujo es proporcional al campo en un punto). Resulta que existen resultados similares para teorías de Yang-Mills. Estas úl-

timas son generalizaciones del electromagnetismo con múltiples campos y potenciales vectores que interactúan entre sí. A través de la conexión con Yang-Mills que Ashtekar planteó para la gravedad se pueden usar funciones de lazo para describir los estados cuánticos de la gravedad. Los primeros en proponer representaciones cuánticas de este tipo fueron Gambini y Trias (en esa época en Venezuela) para las teorías de Yang-Mills al comienzo de los 80 y para la gravedad en términos de variables de Ashtekar por Rovelli y Smolin en 1988.

Pero nuevamente el lector podrá preguntarse: esto es otro cambio de variables, ¿qué puede aportar conceptualmente? En sí, nada. Pero cambios de variables suelen ofrecer nuevas perspectivas sobre problemas. En primer lugar, es de hacer notar que debido a la simetría de la teoría bajo difeomorfismos uno necesita considerar funciones de lazos que sean invariantes bajo deformaciones continuas de los lazos. Este tipo de funciones está bien estudiada matemáticamente, se conocen como “invariantes de nudos”. En segundo lugar, Ashtekar y Lewandowski (1995) introdujeron un producto interno en este espacio, tornándolo un espacio de Hilbert. El producto interno escrito en términos de funciones de lazos es muy sencillo. Dos estados son ortogonales si sus lazos no se pueden deformar continuamente uno al otro. Y su producto interno es uno si lo son. Esto puede parecer increíblemente sencillo, pero Ashtekar y Lewandowski mostraron que si uno traduce de vuelta al lenguaje de potenciales vectores, esto define una medida en dicho espacio (técnicamente conocido como el espacio de conexiones módulo transformaciones de gauge). Dichas medidas, particularmente como esta que está dada en forma cerrada, son muy raras. Más aún, Lewandowski, Okolow, Sahlmann, Thiemann e independientemente Fleischhack (teorema conocido por sus iniciales como LOST-F) (2006) probaron que dada invariancia bajo difeomorfismos y otras condiciones muy generales dicha medida de integración es única. Esto puede sorprender, dado lo poco que aparentemente se ha presupuesto, pero requerir invariancia bajo difeomorfismos es un requisito importante y determina la unicidad. Algo parecido pasa en teoría de campos ordinaria, donde en principio hay infinitos vacíos inequivalentes pero si uno impone invariancia ante transformaciones de Poincaré esencialmente hay un único vacío.

Todo esto no está exento de controversia. Dado que nunca se habían usado espacios como este para estudiar teorías cuánticas de campos, hay gente que es escéptica. Algunos argumentan que el espacio considerado es “demasiado discreto” y hacen la analogía con considerar la recta real con una topología en la cual dos puntos están cerca sólo si coinciden. En dicha topología toda función es continua. Algunos argumentan que quizá esa es la razón por la que la gravedad cuántica de

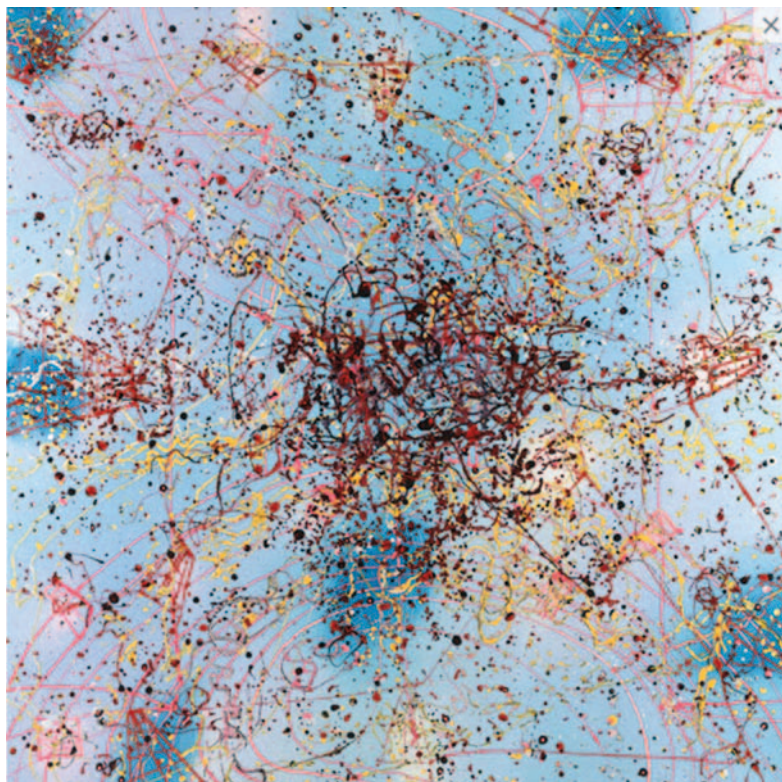


Imagen de Steven Bogart.

lazos no ve los infinitos de teorías cuánticas de campos. Hermann Nicolai y colaboradores (2005, 2007) han escrito un par de artículos críticos muy bien argumentados, y Thomas Thiemann (2007) ha respondido. Los lectores podrán darse una idea de los argumentos viendo esos artículos.

En términos de este espacio de Hilbert, Rovelli y Smolin (1995), también Ashtekar y Lewandowski mostraron cómo construir operadores cuánticos bien definidos asociados al área de una superficie y al volumen de una región del espacio. Las líneas de las variables de lazos (por estar en un caso con varios potenciales vectores como en las teorías de Yang-Mills, las líneas vienen etiquetadas por un número entero y pueden juntarse en vértices con múltiples valencias, no necesitan ser sólo curvas cerradas, formando lo que se conoce como “redes de espín”). La imagen que emerge es que las líneas de las redes de espín acarrearán “cuantos de área”. El área de una superficie está dada por cuantas líneas de la red de espín la atraviesan y el valor de sus enteros asociados. El volumen de una región está dado por cuantos vértices de la red de espín contiene y sus detalles. Estos son los “átomos” con los que se construye un espacio-tiempo. Es de notar que la separación típica de estas líneas de las redes de espín se espera que sea la distancia Planck, 10^{-33} cm, es decir que para superficies macroscópicas sus áreas aparentarán tomar valores esencialmente continuos. Pero si uno pudiera imaginar una superficie del tamaño de Planck, bien podría tener área cero si no es atravesada por ninguna línea de la red de espín.

En términos de estos operadores y espacio de Hilbert, Thomas Thiemann en 1996 pudo promo-

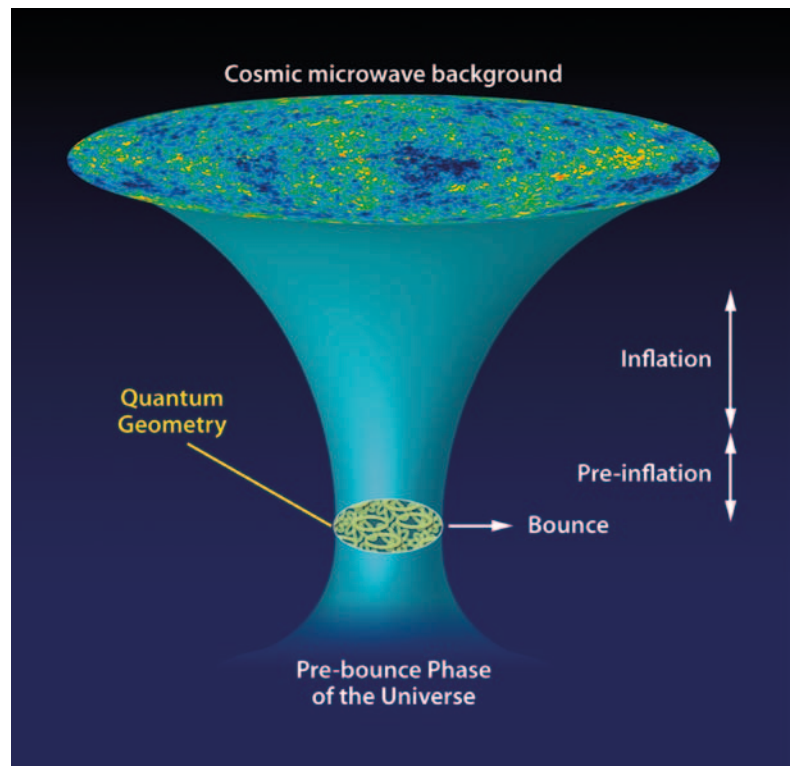
ver las ecuaciones de Einstein a operadores cuánticos bien definidos. Había obtenido la primera teoría no trivial, finita, sin anomalías de la gravedad cuántica. ¿Está el problema terminado entonces? La respuesta es negativa. Debido a la carencia de técnicas para lidiar con dicha teoría, ha resultado muy difícil determinar si la misma captura la física correcta a bajas energías. Que la teoría sea no trivial, finita y sin anomalías no quiere decir que es correcta al describir la naturaleza. Para dar una idea de la situación conviene imaginar la cromodinámica cuántica (teoría que describe las interacciones fuertes) pero sin poderla tratar en el retículo ni usar métodos perturbativos (que son factibles para la interacción fuerte por una propiedad llamada libertad asintótica, que la gravedad no parece tener). Hubiera sido muy difícil hacer algún avance en interacciones fuertes. Esa es la situación que confrontamos con la gravedad.

Para avanzar ante esta situación, investigadores se están concentrando en situaciones con mucha simetría donde los cálculos pueden simplificarse. Hay dos áreas centrales de actividad: una es la cosmología; la otra, espacio-tiempos con simetría esférica.

En cosmología, un enfoque llamado cosmología cuántica de lazos procede a congelar todos los grados de libertad del universo a menos de unos pocos, como, por ejemplo, la escala de tamaño del universo. Luego aplica técnicas inspiradas en las de lazos para su cuantización. Dado que uno está lidiando con un número finito de grados de libertad, uno está haciendo mecánica cuántica más que teoría de campos. Esto había sido intentado antes. Una de las preguntas salientes es qué le pasa al Big Bang. Teoremas muy generales de Hawking y Penrose argumentan que genéricamente los espacio-tiempos desarrollan singularidades. En particular, en modelos del universo donde el único grado de libertad es el factor de escala se observa que si uno retrotrae en el tiempo, el factor de escala se vuelve cada vez más pequeño hasta que se vuelve cero y la curvatura y densidad divergen: es el Big Bang. Se esperaba desde hace tiempo que correcciones cuánticas pudieran cambiar eso. Así como el átomo de hidrógeno es inestable clásicamente pero cuando uno lo cuantiza tiene un estado fundamental por debajo del cual no decae, se esperaba que efectos cuánticos pudieran detener el Big Bang. Dado que hablamos de un problema mecánico cuántico, el trabajo en el mismo predica la representación de lazos. Físicos en la década de los 70 estudiaron el problema y concluyeron que los efectos cuánticos no eliminaban el Big Bang. Dado que estamos hablando de un problema con un número finito de grados de libertad, existe el teorema de Stone von Neumann que dice que toda representación cuántica que uno encuentre será equivalente. Parecía no haber salida al problema, la teoría cuántica parecía no resolver la singu-

laridad del Big Bang. Pero la representación de lazos cambia las reglas del juego: la “discretitud” del producto interno de Ashtekar y Lewandowski viola una de las hipótesis del teorema de Stone von Neumann y una representación distinta es posible. Esto fue analizado por Bojowald (2000) y con más precisión por Ashtekar, Pawłowski y Singh (2007), que mostraron que la cuantización de lazos elimina el Big Bang. El mismo se reemplaza por un “rebote” en el que nuestro universo pasa por una región de gran curvatura con grandes fluctuaciones cuánticas y luego se reexpande hacia el pasado hacia un universo previo al nuestro de características clásicas.

Esto podrá parecer bastante académico, después de todo no hay ocasión de medir nada antes del Big Bang. Pero el resultado puede tener consecuencias observacionales. Iván Agulló (de Elche) con Ashtekar y Nelson (2013) estudiaron la evolución de campos cuánticos viviendo sobre el espacio tiempo del “rebote” para ver si podría haber efectos observacionales en el fondo de microondas cósmico. Al principio puede sorprender esto. Nuestro entendimiento moderno del fondo de microondas es que proviene de evolucionar un vacío cuántico para el inflatón a través del periodo de inflación. El espectro resultante es lo que observamos en el fondo de microondas. Durante la inflación la escala del universo ya es demasiado grande para que efectos de la gravedad cuántica puedan tener importancia. Eso ha llevado a muchos a desestimar que la gravedad cuántica pueda dejar rastros en el fondo de microondas. Sin embargo, esto está basado en el punto de vista de que el universo comienza cuando comienza la inflación. Si uno tiene un universo completo, como ocurre en el caso de cosmología cuántica de lazos, es más natural adoptar un punto de vista en el cual los datos iniciales no se dan al comienzo de la inflación sino que o se dan en el momento del “rebote” o se dan en el infinito pasado del universo previo al nuestro. En ambos casos, si uno pone un vacío para el inflatón y lo evoluciona a través del rebote o a partir del mismo, el campo que uno obtiene al comienzo de la época de inflación no estará en el estado de vacío. Así aparecen desviaciones de lo que predice la inflación usual. Los efectos son primordialmente para correlaciones de temperatura a grandes escalas angulares, donde el espectro está medido desafortunadamente con mucha incerteza aún. Por el momento las predicciones de inflación usual y las de cosmología cuántica de lazos no pueden ser distinguidas experimentalmente. En adición al espectro en sí, la cosmología cuántica de lazos tiene una predicción para la llamada “relación de consistencia”. En inflación usual el cociente de perturbaciones tensoriales a escalares, usualmente llamado r , es proporcional al índice espectral de perturbaciones tensoriales con un factor de proporcionalidad -8 . En el caso de cos-



mología cuántica de lazos el factor difiere. Aún no se conoce bien experimentalmente el valor de r y no se ha medido el índice espectral. Dependiendo del valor de r , la comprobación de la relación de consistencia tendrá más o menos grado de complejidad, si r es muy pequeño es posible que tome muchos años comprobarla, si no es posible que en los próximos años se pueda medir. Es de notar que las predicciones de cosmología cuántica de lazos dependen del valor del inflatón en el momento inicial (el rebote o el pasado del universo previo). Eligiendo el valor muy grande, las predicciones se pueden parecer a las de inflación usual tanto como se quiera. Pero para valores “naturales” hay una discrepancia potencialmente medible. Actualmente se investiga si el rebote cuántico que precede a la fase inflacionaria en la cosmología cuántica de lazos puede dar origen a ciertas anomalías que se han observado en el fondo cósmico de microondas y hasta el momento carecen de explicación.

Como tema final de aplicación, la teoría se ha estado estudiando en situaciones con simetría esférica. Hace pocos años se mostró que se puede completar la cuantización en el caso de espaciotiempos de vacío. En particular se puede encontrar la solución de las ecuaciones de Einstein cuánticas en forma cerrada. Este caso incluye el importante caso de agujeros negros. La geometría cuántica puede elegirse de modo tal que aproxima muy bien la geometría clásica de un agujero negro en su exterior (por lo menos para agujeros negros de masas grandes comparadas con la de Planck). Sin embargo, cuando uno se acerca a la región donde clásicamente se encontraba la singularidad en el interior del agujero negro, la cur-

Imagen de Alan Stonebraker. © American Physical Society.

vatura y sus fluctuaciones aumentan y no se puede aproximar la geometría cuántica por una clásica y uno transiciona sin infinitos por la región donde estaba la singularidad clásica hacia otro sector del espacio tiempo en el futuro donde la curvatura y sus fluctuaciones disminuyen y uno recupera una aproximación clásica al espacio tiempo (Gambini, Pullin 2013).

Se ha estudiado la evolución de campos sobre la geometría cuántica mencionada y se muestra que uno recupera la radiación de Hawking de agujeros negros con pequeñas modificaciones (Gambini, Pullin, 2014). Un elemento atractivo es que la naturaleza discreta de la geometría cuántica discretiza las ecuaciones de los campos como si uno las hubiera puesto en un retículo. Excepto que este retículo no es una herramienta matemática para aproximar una teoría continua sino que es la teoría de un campo viviendo en un espacio-tiempo cuántico. Para explorar qué efectos tiene esta natural discretización estudiamos con Gambini y Javier Olmedo (de Fuenlabrada) el efecto Casimir entre dos esferas viviendo en la geometría cuántica con un campo escalar (2015). Sumando la energía del campo dentro y fuera de la cavidad formada por las dos esferas y estudiando cómo varía la misma con la separación de las esferas se obtiene el resultado correcto para la fuerza de Casimir sin tener que regularizar la teoría ni renormalizarla.

La finitud natural de las teorías de campos viviendo en espacio-tiempos curvos abre nuevas posibilidades en el viejo problema de estudiar la reacción de la radiación de Hawking sobre el espacio-tiempo de fondo. Con Gambini, Miguel Campiglia y Olmedo estamos activamente estudiando este problema ahora.

Debido a las limitaciones de espacio he tenido que omitir importantes áreas de actividad en gravedad cuántica de lazos. En particular hay varias personas trabajando en calcular la entropía de agujeros negros usando este enfoque. También hay un núcleo importante de personas trabajando en utilizar estas técnicas para dar sentido a la integral de camino para la gravitación cuántica, un enfoque conocido como “espumas de espín” (spin foams). Refiero a los lectores a los libros de Rovelli y Thiemann citados en las referencias. Para los que quieran un tratamiento más elemental esta el libro que escribí con Gambini dirigidos a estudiantes de licenciatura mencionado al final.

Agradecimientos

Agradezco a Iván Agulló por sus comentarios. Este trabajo fue apoyado por subsidio PHY-1305000

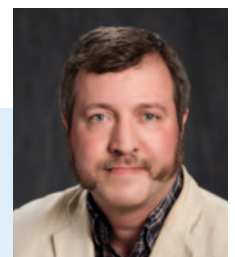
de la National Science Foundation, LSU-CCT y el Hearne Institute for Theoretical Physics.

Referencias Generales

- [1] C. ROVELLI, *Quantum Gravity* (Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2007).
- [2] R. GAMBINI y J. PULLIN, *Un primer curso en teoría cuántica de lazos* (Reverté, Méjico D. F., 2013) Edición en inglés: *A first course in loop quantum gravity* (Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 2011).
- [3] T. THIEMANN, *Modern canonical quantum general relativity* (Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2008).

Citadas

- [1] I. AGULLÓ, A. ASHTEKAR y W. NELSON, *Class. Quan. Grav.* 30, 085014, 2013.
- [2] A. ASHTEKAR, *Phys. Rev. Lett.* 57, 2244, 1986.
- [3] A. ASHTEKAR y J. LEWANDOWSKI, *J. Geom. Phys.* 17, 191, 1995.
- [4] A. ASHTEKAR y J. LEWANDOWSKI, *Class. Quan. Grav.* 14, A55, 1997.
- [5] S. CARLIP, *Class. Quan. Grav.* 25, 154010, 2008.
- [6] R. GAMBINI y A. TRIAS, *Phys. Rev. D* 22, 1380, 1980; *Phys. Rev. D* 23, 553; *Nucl. Phys. B* 278, 436, 1981.
- [7] R. GAMBINI, J. OLMEDO, J. PULLIN, *Class. Quan. Grav.* 32, 115002, 2015.
- [8] R. GAMBINI y J. PULLIN, *Phys. Rev. Lett.* 110, 211301, 2013; *Class. Quan. Grav.* 31, 115003, 2014.
- [9] J. LEWANDOWSKI, A. OKOLOW, H. SAHLMANN, T. THIE-MANN, *Commun. Math. Phys.* 267, 703, 2006; C. FLEISCHHACK, *Phys. Rev. Lett.* 97, 061302, 2006.
- [10] H. NICOLAI, K. PEETERS, M. ZAMAKLAR, *Class. Quan. Grav.* 22, R193, 2005; H. NICOLAI y K. PEETERS, *Lect. Notes Phys.* 721, 151, 2007.
- [11] R. PENROSE, *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness* (Oxford University Press, Oxford, Reino Unido, 1996).
- [12] C. ROVELLI, L. SMOLIN, *Phys. Rev. Lett.* 61, 1155, 1988; *Nucl. Phys. B* 133, 80, 1990.
- [13] C. ROVELLI, L. SMOLIN, *Phys. Rev. D* 52, 5743, 1995.
- [14] T. THIEMANN, *Phys. Lett. B* 380, 257, 1996.
- [15] T. THIEMANN, *Lect. Notes Phys.* 721, 185, 2007.



Jorge Pullin
Department of Physics and
Astronomy, Louisiana State
University, EE. UU.

Encuentros en la Tercera Fase: Una tarde de Ciencia y Cine

Alberto Bollero



El pasado 25 de septiembre tuvo lugar en la Residencia de Estudiantes de Madrid el evento “*Ciencia y científicos de cine ¿la realidad supera a la ficción?*”. Esta iniciativa formaba parte del proyecto europeo *La Noche Europea de los Investigadores de Madrid 2015*, que coordinaba la *Fundación madri+d* bajo una encomiable labor de dirección y organización por parte de la Dra. Begoña Moreno (IMDEA Software).

El objetivo de este tipo de actividades es acercar, no sólo la ciencia, sino también la figura del científico, a los ciudadanos a través de un programa atractivo y desenfadado. No cabe ninguna duda de que, ya desde los primeros momentos de la velada, este objetivo había quedado plenamente alcanzado. Y qué mejor línea argumental que la relación entre el cine y la ciencia para lograrlo. A través de la participación de investigadores de los distintos institutos IMDEA, y para deleite de los asistentes que cubrían un amplísimo rango de edades, se hizo un repaso a películas del género de la ciencia ficción. La amalgama de películas cubrió títulos visionarios como *2001: Odisea en el Espacio* (1968), desenfadados como *Regreso al Futuro* (1985) y catastrofistas —también en lo relativo a su base científica— como *Armageddon* (1998).

El estudio y los últimos avances realizados en materia de agua, energía, alimentación, materiales, nanociencia, redes y software tuvieron su representación a través de los investigadores participantes: Ignacio Martín Bragado (IMDEA Materiales), Junkal Landaburu (IMDEA Agua), Alberto Dávalos (IMDEA Alimentación), Alfonso Carrillo (IMDEA Energía), Arturo Azcorra (IMDEA Networks), Manuel Carro y Manuel Hermenegildo (IMDEA Software) y Fco. Javier Pedrosa y Alberto Bollero (IMDEA Nanociencia).

Los asistentes pudieron conocer, de mano de los investigadores, la motivación que les llevó a seguir una carrera científica, vicisitudes y anécdotas de eminentes científicos (Marie Curie, Richard Feynman, Nikola Tesla...) y exposición de los avances presentes y visión de futuro en sus respectivas disciplinas. Todo ello envuelto en un tono cómico y estimulante que los dos entrevistadores, Ignacio Martín y Manuel

Carro, se encargaron de mantener y transmitir exitosamente al público durante toda la velada.

Durante el evento, la cantante Andrea Iannetta (IMDEA Software) realizó un bonito y entrañable repaso a bandas sonoras (*Cantando Bajo la Lluvia*, *La Guerra de las Galaxias*, *El Hobbit...*) muy conocidas por todos los asistentes, como resultaba obvio por el balanceo generalizado de cabezas y pies en la sala.

El público participó de manera muy activa en el debate con los investigadores, con preguntas que abarcaron desde la *energía libre* propuesta por Tesla, la alimentación como base del bienestar y la creación de realidades virtuales, hasta las



aplicaciones que los avances científicos de los investigadores invitados están encontrando en el día a día. Alusiones a *HAL 9000*, el ordenador de a bordo de la nave espacial *Discovery* (*2001: Una odisea del espacio*), tuvieron lugar en diversos momentos del evento, en relación con los avances logrados en el desarrollo de inteligencia artificial. También *Blade Runner* (1982) y su visión distópica en el que la tecnología deshumaniza al hombre y vuelve más humanos a las máquinas, sirvió durante la tertulia como ejemplo de futuro tecnológico decadente, pero también como un ejemplo cinematográfico de

desarrollo de una inteligencia artificial superior al ser humano, fruto de una transferencia efectiva del cúmulo de conocimientos de generaciones en un ser artificial (*replicante*). El aerodeslizador que aparece en la secuela de *Regreso al futuro* sirvió como base para hablar de la levitación magnética, tecnología empleada en la actualidad en trenes (*Maglev*) capaces de alcanzar los 600 km/h. Asimismo, los avances de la tecnología aplicada al cine quedaron patentes al recordar la evolución que los efectos especiales han tenido, desde las primeras películas que usaron computación gráfica (*Tron*, 1982) hasta algunos de los últimos éxitos cinematográficos (*Avatar*, 2009).

Una pregunta del público que despertó gran interés entre todos los asistentes fue la referida a la curiosidad innata en el hombre (y aún más, si cabe, en el investigador) en cuanto a los posibles límites de la investigación científica: dónde parar y si los investigadores estarían dispuestos a hacerlo, a pesar de las dramáticas consecuencias que la continuación del desarrollo en áreas específicas pudiera acarrear. El cine cuenta con innumerables ejemplos catastrofistas resultados de científicos que deciden abrir la caja de Pándora. Todos los investigadores coincidieron en que la inmensa mayoría de las fuentes de financiación que permiten desarrollar una labor investigadora, y que en última instancia provienen de los ciudadanos, van supeditadas a necesidades que la sociedad

tiene, marcando ésta, por tanto, las líneas de investigación a seguir. Se remarcó que la ciencia es un instrumento a ser utilizado al servicio de la sociedad, y que el científico trabaja con el objetivo de lograr un estado de bienestar común. No obstante, y partiendo de estas premisas, se concluyó que es necesario seguir incrementando la cultura científico-tecnológica en la sociedad para garantizar no solamente un correcto desarrollo sino, igualmente importante, un buen uso de los avances científicos y tecnológicos.

Ya sobrepasando las tres horas de duración originalmente anunciadas, y con todavía preguntas pendientes, los presentadores pusieron punto final a una velada durante la cual los asistentes interpretaron su particular *Encuentros en la tercera fase*, en la que los científicos dejaron de verse como lejanos extraterrestres, y ciencia y música fueron vehículos de acercamiento.

To be continued... Next year.

Alberto Bollero
Imdea Nanociencia



¿te gusta investigar?

ATI
La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación
* alimentación HV-LV * crates de alimentación * racks * electrónica de control y adquisición * espectroscopia * detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

info@atisistemas.com

XXXV Reunión Bienal de la RSEF

Gijón acoge por vez primera la Bienal de la RSEF

Pedro Gorria y Jorge Pisonero

“**A**l fin llegó el día” comentábamos a mediodía del domingo 12 de julio de 2015 cuando nos acercábamos al recinto ferial “Luis Adaro” con la intención de supervisar que todo el material estuviera listo antes de que se abrieran las puertas del recinto. En efecto, Roberto, nuestro “director general de operaciones” ya había “reclutado” a varios estudiantes de nuestra Facultad para que nos echaran una mano de forma entusiasta, y todo estaba preparado antes de que comenzaran a llegar los primeros asistentes a la Bienal para registrarse. Y dieron las 16:00 h, y los primeros participantes de la Bienal asomaron, y comenzamos con los saludos de bienvenida, la entrega de documentación, y por supuesto los comentarios acerca de la temperatura tan agradable de la que disfrutábamos en Gijón (no alcanzamos los 300 K en toda la semana mientras que prácticamente toda la Península Ibérica llevaba más de un mes sumida en una intensa ola de calor). Y siguió llegando gente, cruzamos saludos, intercambiamos besos y abrazos con colegas que no veíamos desde la última Bienal, y antes de comenzar con la merendola de bienvenida, algunos participantes se animaron a visitar el museo etnográfico conocido como “Muséu del Pueblu d’Asturies”, al lado del recinto ferial. Pues sí, después de tantos meses de preparativos, llamadas de teléfono, cientos y cientos de e-mensajes, nervios, tensión, agobios... la Bienal estaba echando a rodar. Quedaban por delante cinco jornadas repletas de atractivas actividades enmarcadas en el ámbito de la Física y abarcando prácticamente todas sus disciplinas.

Daremos algunos números sobre esta XXXV Bienal de la RSEF. Fuimos casi 350 asistentes de los cuales cerca de 100 eran estudiantes. Las jornadas matinales se reservaron para las sesiones plenarias (14 conferencias en total), mientras que los 16 simposios programados (con diferentes duraciones entre uno y cuatro días) se celebraron en paralelo por las tardes (de lunes a jueves y con hasta 9 sesiones simultáneas). En esta ocasión, y con la intención de aumentar la participación en las sesiones de posters, se programaron hasta 7 sesiones de una hora de duración, permitiendo a los congresistas mantener expuesto su poster a lo largo de toda la Bienal y compartiendo espacio con los expositores comerciales (solamente 4 en esta Bienal). Además, estas sesiones de posters se hicieron coincidir con las pausas-café a media mañana y a media tarde, lo que redundó en una gran afluencia

de congresistas a las sesiones, favoreciendo la discusión e intercambio de ideas con los ponentes.

Coincidiendo con la celebración del “Año Internacional de la Luz” en 2015, tuvimos la oportunidad de albergar dos exposiciones de imágenes relacionadas con esta temática: “Un Universo de Luz” y “Light Beyond de Bulb”, amablemente cedidas por el CSIC y por la OTRI de la Universidad de Oviedo, respectivamente, y que tuvieron una magnífica acogida entre los participantes.



El acto de apertura de la XXXV Bienal de la RSEF tuvo lugar el lunes 13 de julio de 2015 a las 9:00 h en el Saló de Actos del Palacio de Congresos, presidido por el Rector Magnífico de la Universidad de Oviedo el Prof. D. Vicente Gotor y por el Excmo. Presidente de la RSEF el Prof. D. Adolfo de Azcárraga, acompañados en la mesa por Dña. Victorina Fernández, Directora General de Formación Profesional, Innovación y Evaluación Educativa del Principado de Asturias, D. Álvaro Muñiz, Director del área ferial y congresual de la Cámara de Comercio de Gijón, y por el Prof. D. Pedro Gorria presidente del comité organizador de la Bienal. Asistieron también varios medios de comunicación que cubrieron la noticia de la inauguración del Congreso.

Queremos destacar también la notable cobertura mediática que ha tenido la Bienal de la RSEF en los medios de comunicación regionales desde los días previos al comienzo de la reunión y a lo largo de todas las jornadas en las que ésta se desarrolló. Noticias sobre la Bienal de la RSEF han aparecido en varias emisoras de radio (SER Gijón, Onda Cero, RTPA,



Cope), cadenas de televisión (TPA, RTVE) y prensa escrita (*El Comercio*, *La Nueva España*). Además, se han publicado entrevistas con dos ponentes plenarios (Prof. Susana Marcos y Prof. Jozef Ongena) en periódicos regionales. Creemos que esta “visibilidad” en los medios de comunicación es necesaria si queremos concienciar a la sociedad de la importancia que el avance en el conocimiento científico, su transmisión y divulgación tiene en la mejora de la calidad de vida de todos nosotros.

Por otra parte, y gracias a las gestiones realizadas por el Grupo Especializado (GE) de Mujeres en Física y en particular por María Luisa Calvo y María Josefa Yzuel, pudimos contar con la Prof. Susana Marcos, directora del Laboratorio de Visión en el Instituto de Óptica del CSIC, para que impartiera la conferencia inaugural de la Bienal sobre “Luz y Óptica para mejorar la visión”. No podríamos haber hecho mejor elección, la excelente conferencia impartida por Susana entusiasmó a la audiencia, incluidos algunos periodistas que, como acabamos de mencionar, le solicitaron una entrevista al finalizar su intervención.

La sesión matutina de esta primera jornada continuó con dos magníficas charlas impartidas por el Prof. Félix Ritort, “The non-equilibrium thermodynamics of small systems”, propuesto por el GE de Termodinámica y por el Prof. François Richard, “Future of Accelerator Physics”, propuesto por el GE de Física de Altas Energías. Por la tarde del lunes comenzaron las primeras sesiones de los diferentes simposios. El de Termodinámica coordinado por J. R. Solana (Unican) finalizó con una reunión general del grupo especializado y en el de Nanociencia Molecular, coordinado por Fernando Luis (ICMA-CSIC, Unizar), cabe destacar las charlas invitadas impartidas por Marco Evangelisti (ICMA), Alicia Forment (ICMol, Univ. Valencia), Ignacio Pascual (CIC-Nanogune) y Jaime Ferrer (Uniovi).

Tres fueron los simposios de mayor duración, puesto que se extendieron de lunes a jueves. El que conjuntamente organizan los Grupos Espe-

cializados de Altas Energías y de Física Teórica, coordinado por María Victoria Fonseca (UCM) y Fernando Cornet (Univ. Granada), que contaron con numerosas contribuciones orales en su programa, incluyendo charlas invitadas a cargo de José Manuel Vizán (Uniovi), Antonio Dobado (UCM), Igor Oya (DESY) y Miguel Villaplana (INFN, Milán). También el Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física, coordinado por Verónica Tricio (Univ. Burgos), ocupó cuatro tardes con un programa muy denso e intenso, incluyendo conferencias temáticas, mesas redondas y comunicaciones orales que dieron lugar a interesantes debates durante y después de las sesiones.

El simposio de Física Nuclear, coordinado por Lola Cortina (USC), tuvo una duración de cuatro tardes con un programa repleto de interesantes comunicaciones orales, entre las que cabe destacar la conferencia impartida por José A. Lay (US), la entrega de premios ATI-GEFN, así como la asamblea general del GE que tuvo lugar el miércoles por la tarde.

Las sesiones correspondientes a los simposios organizados por los GE de Información Cuántica, coordinado por Adán Cabello (Univ. Sevilla), y de Física de Plasmas, coordinado por Lola Calzada (Univ. Córdoba), se desarrollaron durante las tardes del lunes y del martes. Cabe destacar que el segundo de ellos fue titulado “I Encuentro de Jóvenes Investigadores en Física de Plasmas y sus Aplicaciones”, siendo su principal objetivo promocionar la participación de jóvenes investigadores en este campo y ofrecerles la oportunidad de exponer y someter a discusión sus logros científicos más relevantes. Además, durante esta sesión se celebró una reunión abierta a todos los participantes con la intención de establecer las bases para un futuro máster inter-universitario relacionado con la Física de Plasmas.

Volviendo a la conferencias plenarias, el martes tuvimos la oportunidad de disfrutar de 4 excelentes ponencias. La primera de ellas impartida por el Prof. Carlos Fiolhais con la colaboración de Pedro Pombo, en la que mostraron diversos experimentos realizados “in situ” ante la audiencia, y que llevaba por título “Experiências históricas de interesse didáctico”. A continuación, el Prof. Harald Weinfurter, propuesto por el Grupo de Información Cuántica, disertó sobre “Experiments on Bell’s Theorem”. Más tarde, tras la sesión matinal de posters, los Profs. Mohamed Chaker y Jozef Ongena, completaron una interesantísima sesión plenaria ofreciendo las conferencias “Plasma-based materials synthesis and etching for device fabrication” y “Towards an effective sustainable energy future in Europe”, respectivamente.

El simposio de Comunicación y Divulgación de la Física, coordinado por Ángel Márquez, tuvo lugar el martes, y contó con la participación de Alberto Ibort y Antonio Fernández-Rañada como

protagonistas de las dos sesiones “Encuentros con el Experto” programadas para ese simposio. El martes fue el día en el que comenzó el simposio sobre Energía y Sostenibilidad, coordinado por José Manuel Martínez-Duart, y cuyas sesiones se extendieron hasta el jueves. En este simposio, también con un programa ciertamente intenso y diverso, se contó con varias ponencias invitadas que despertaron el interés de los participantes, especialmente las impartidas por Cayetano López, (Director General del CIEMAT) y por Andrés Seco (Director General de Operación de REE).

En la sesión plenaria del miércoles por la mañana tuvimos la oportunidad de conocer detalles sobre procesos climáticos en el área Mediterránea de la mano del Prof. Ricardo Trigo (Univ. Lisboa). A continuación, el Prof. Luigi Toffolatti (Uniovi) nos ofreció una amena conferencia, “El satélite Plank y el Universo temprano”, acerca de los últimos descubrimientos en el ámbito de la Astrofísica gracias a la información recopilada por el satélite Plank. Y para finalizar la sesión matutina, el Dr. Adolf Cortel mostro diversos experimentos en su ponencia titulada “Espectroscopia recreativa en el Año Internacional de la Luz”.

Por la tarde del miércoles comenzó el simposio “Strongly correlated electron systems” organizado por el GEFES y coordinado por nuestro compañero José Ignacio Martín (Uniovi). En su programa (miércoles y jueves) la comunicaciones orales se distribuyeron en 4 sesiones con diversas temáticas e incluyendo la charlas invitadas de Leni Bascones (ICMM-CSIC), Alejandro Manjavacas (Rice Univ., EE. UU.), Marco Gobbi (CNRS, Estrasburgo) y Verónica Salgueiriño (Univ. Vigo). También el miércoles por la tarde tuvo lugar una sesión conjunta de Enseñanza, Divulgación e Historia de la Física con dos conferencias temáticas a cargo de M. Esteban Piñeiro (Univ. Valladolid) y Amador Menéndez (ITMA, Asturias). Otros dos simposios se desarrollaron también el miércoles por la tarde, el de Astrofísica coordinado por José Miguel Rodríguez Espinosa (IAC), que contó con las conferencias invitadas de Eduardo Battaner (Univ. Granada) y de Diego Rodríguez (Uniovi); y el de Física de los Procesos Climáticos en Atmósferas y Océanos, coordinado por Luis Gimeno (Univ. Vigo).

La jornada del miércoles finalizó con la cena del congreso, una “Espicha”, que tuvo lugar en un llagar típico asturiano, y que permitió a los asistentes degustar una selección de viandas autóctonas acompañadas con sidra asturiana en un ambiente distendido, alegre y divertido. La anécdota de la velada fue protagonizada por un apagón general del recinto, que tuvo lugar por causas injustificadas, de manera que nos obligó a salir al exterior del llagar media hora antes de lo previsto.

El Prof. Piet Van Duppen (Institute for Nuclear and Radiation Physics, KU Leuven) abrió la sesión plenaria del jueves por la mañana con su confe-

rencia “Radioactive Ion Beams for Science and Society”. Le siguió la Prof. Yolanda Prezado (Lab. Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie, CNRS) que en su conferencia “Nuevas avenidas en radioterapia: moldeando la respuesta biológica” nos mostró un ejemplo más de transversalidad en la investigación uniando Física y Medicina. Tras la sesión de posters fue el turno del Prof. Antony Carrington (Univ. Bristol) que impartió una charla sobre uno de los temas de más actualidad en la investigación en Física del Estado Sólido, “Superconductivity near a quantum critical point: The case of Iron pnictide superconductors”.

La jornada matinal concluyó con dos mesas redondas en paralelo. Una de ellas dedicada a la nueva ley de educación LOMCE y enfocada fundamentalmente hacia el profesorado de educación secundaria. La segunda, coordinada por la Prof.



Pilar López Sancho y organizada por el grupo especializado de Mujeres en Física tuvo como objetivo central el análisis de los “Retos en la Carrera Científica en España”, pero especialmente desde el punto de vista y la experiencia de las mujeres. Los participantes en la mesa, María Josefa Yzual, Natalia Rinaldi-Montes, Alejandro Manjavacas y Pedro Gorria plantearon desde diferentes perspectivas profesionales y temporales las dificultades que, en general, se encuentran las mujeres a la hora de desarrollar su carrera como científicas y de lograr una promoción profesional en base a sus méritos científicos y/o académicos. Con una notable asistencia de congresistas, se estableció un intenso y edificante coloquio tras las intervenciones de los miembros de la mesa.

La sesión vespertina contó con hasta ocho simposios en paralelo, siendo los organizados por los GGEE de Mujeres en Física, Óptica Cuántica y Óptica No Lineal, y Física Médica los simposios cuyas sesiones se celebraron este día.

Para el último día de la Reunión Bienal quedó la conferencia plenaria impartida por la Prof. Elisabeth Giacobino (Univ. Pierre et Marie Curie, Ecole



Normale Supérieure, CNRS-UPMC) a propuesta de los GGEE de Mujeres en Física, Óptica Cuántica y Óptica No Lineal, y GEFES, y que tuvo como título “Quantum fluids of light in microcavities”. Tras dicha conferencia se llevó a cabo un acto homenaje a socios de la RSEF. Posteriormente se celebró la Asamblea de la RSEF, en la que se renovaron la mitad de los vocales de la Junta y el cargo de Vicepresidente de la RSEF, y finalmente se clausuró la XXXV Bienal de la RSEF.

Agradecimientos

Es nuestro deseo concluir este artículo con un profundo y cariñoso agradecimiento a todas las personas, instituciones y empresas que nos han ofrecido su apoyo a lo largo de muchos meses para que la Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física se celebrara por vez primera en Gijón. En primer lugar a la RSEF, y en especial a su presidente Adolfo de Azcárraga por su persistente, entusiasta y entrañable ayuda/empuje/ánimo que nos ha brindado. No queremos olvidar al resto de miembros de la Junta de Gobierno de la RSEF, y particularmente a Miguel Ángel Sanchís, que siempre ha estado dispuesto a resolver esas dudas

que nos surgían con detalles de la organización. Y por supuesto a Itziar Serrano por su inestimable asistencia antes, durante (in situ, en Gijón, a todas horas) y después de la Bienal en aspectos que sólo ella nos podía resolver de forma casi inmediata.

En cuanto a las instituciones, y además del agradecimiento a nuestra Universidad de Oviedo y a su Rector Vicente Gotor que nos acompañó en la ceremonia de apertura, queremos mencionar de forma muy especial al Ayuntamiento de Gijón, a Carolina García y Cristina Bernabeu del Gijón Convention Bureau, y a la Cámara de Comercio. Podemos decir que toda la ciudad se volcó con la Bienal y la repercusión social y mediática fue muy superior a lo que nos imaginábamos. Por supuesto, hemos de señalar también nuestra gratitud a los expositores y patrocinadores que, a pesar de los difíciles momentos económicos que estamos atravesando, han aportado su granito de arena.

Queremos también transmitir un especial agradecimiento a Roberto González (secretaría técnica) y Elías García (Palacio de Congresos) por su tremenda y eficiente labor en multitud de cuestiones organizativas; a Nerea Bordel (Uniovi) por su apoyo en la elaboración del programa final de la Bienal; a Manuel Vilches (IMOMA) por la organización del Simposio de Física Médica; a todos los miembros de los Comités Organizador Local y Científico, y por supuesto a todos los coordinadores de los diferentes simposios de esta Bienal. Por último, a los alumnos del Grado en Física y a los estudiantes de doctorado y máster que nos echaron muchas manos desinteresadamente, demostrando un gran entusiasmo en la que para muchos de ellos era su primera participación en un congreso. Confiamos en que todos hayáis disfrutado de la Bienal de Gijón y esperamos volver a encontrarnos en la próxima.

Pedro Gorria

Dpto. de Física, Universidad de Oviedo

Jorge Pisonero

Dpto. de Física, Universidad de Oviedo



GEFES, 2016

Grupo Especializado de Física de Estado Sólido de la RSEF
Cuenca, del 13 al 15 de enero de 2015.
gefes-rsef.org/gefes2016/



25.º Encuentro Ibérico de la Enseñanza de la Física

Verónica Tricio Gómez y Paloma Varela Nieto

© Freepik

El 25.º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física (E. I.) ha tenido lugar en Gijón, durante los días 13 al 17 de julio de 2015, organizado por el Grupo Especializado de Enseñanza de la Física (GEEF) de la RSEF (<https://rsef.es/junta-de-gobierno-geef>). El Encuentro Ibérico es un simposio en el que los profesores de Física de España y Portugal pertenecientes a todos los niveles educativos presentan los resultados de sus actividades en los distintos ámbitos relacionados con la enseñanza de la Física. Como en las anteriores ediciones, el Encuentro se ha realizado durante la Reunión Bienal de la RSEF, en cuya web se ha dado información detallada sobre el evento (<http://bienalrsef-gijon2015.org/web/25o-encuentro-iberico-de-ensenanza-de-la-fisica/>).

La composición de los comités estuvo formada por miembros de la Junta Directiva del Grupo: Verónica Tricio (Presidenta), Carlos Herrán y Paloma Varela (Vicepresidentes), Fernanda Miguélez (Tesorera) y por los profesores portugueses Carlos Portela (Sociedade Portuguesa de Física, Divisão de Educação), Carlos Fiolhais y José Antonio Paixão (Universidad de Coimbra) y Paulo Simeão (Universidad de Oporto).

En el marco del 2015, Año Internacional de la Luz, en esta edición del E. I. el Grupo de Enseñanza de la Física invitó al Dr. Fiolhais (Comissário em Portugal) para impartir la conferencia plenaria en la Bienal de título: *Fazendo luz sobre a luz: Experiências históricas de interesse didáctico*, que fue compartida con el profesor Pedro Pombo, Director da “Fábrica Ciência Viva”, Unidade de Divulgação da Universidade de Aveiro.

Durante los cuatro días que ha durado el E. I. se han presentado cincuenta y nueve aportaciones entre comunicaciones orales y poster. Se han abordado muy diversas temáticas: *Temas de Física, Trabajos de laboratorio, Investigación e Innovación en la enseñanza de la Física, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Historia de la Física, Enseñanza no formal, Proyectos docentes, Enseñanza on-line, etc.* Como es tradición, se celebró la Asamblea General del Grupo que tuvo lugar el martes día 14.

Este año se ha incluido como novedad el Simposio *Enseñanza, divulgación e historia de la Física* (<http://bienalrsef-gijon2015.org/web/simposio-ensenanza-divulgacion-e-historia-de-la-fisica/>) coordinado conjuntamente por la Dra. Tricio (Presidenta del Grupo Enseñanza), el Dr.



En la imagen, algunos participantes del encuentro durante un descanso.

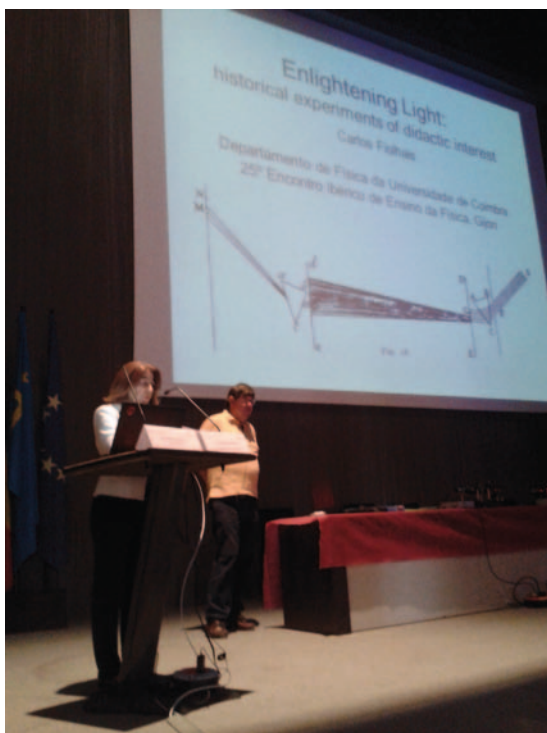
Sanchís (Vicepresidente del Grupo de Comunicación y Divulgación) y el Dr. Pinto (Vicepresidente del Grupo Didáctica e Historia de la Física y la Química). En el marco del simposio se impartieron dos conferencias del interés de los miembros de los tres Grupos: *Instrumentos para la enseñanza de la nueva Física en la España de Carlos III* por el Dr. Esteban-Piñeiro (Universidad Valladolid) y *La luz de la Ciencia, la Ciencia de la luz* por el Dr. Menéndez-Velázquez (Instituto Tecnológico de Materiales, Asturias). La experiencia ha resultado sumamente satisfactoria por lo que se puede incorporar a los próximos Encuentros.

Se desarrollaron cuatro Monográficos, en los que se debatió y reflexionó sobre los contenidos, todos relevantes, tratados en cada uno de ellos. Quedaron estructurados de la siguiente forma:

El primero, *Política universitaria. Los Grados: cinco años después de Bolonia*, coordinado por el Dr. González-García (Vicerrector de Profesorado y Ordenación Académica, Universidad de Oviedo), planteó el estado de la cuestión. La perspectiva desde diferentes grados universitarios la aportaron, sobre el Grado de Física, Rafael García-Molina (Universidad de Murcia) y Chantal Ferrer (Universidad de Valencia) y, sobre el Grado de Maestro en Educación Primaria, Ileana Greca (Universidad de Burgos).

El monográfico del segundo día estuvo centrado en un tema relevante para profesores de todos los niveles educativos: *Profesión docente*. En horario de mañana impartió la

En la imagen, Carlos Fiolais, que fue presentado por la presidenta del grupo GEEF.



conferencia *Fortalecer la profesión docente: Un desafío crucial* el Catedrático de Bachillerato (Física y Química), Francisco López-Rupérez, en la actualidad Presidente del Consejo Escolar del Estado. Se puede destacar la idea que transmitió el conferenciante sobre la necesidad de revisar la carrera profesional de los profesores desde la *Formación inicial* (cuestionamiento del modelo del Máster de Formación del Profesorado de Secundaria) a la *Formación permanente*. El tema continuó abordándose por la tarde en un Panel *Carrera docente y Formación del profesorado* coordinado por la Dra. Miguélez (Universidad de A Coruña), en el que se debatió ampliamente sobre la situación del profesorado con las aportaciones de F. López-Rupérez, C. Fiolhais y Pablo Nacenta (IES Alameda de Osuna, Madrid).

En el tercer día del Encuentro, se desarrolló el monográfico titulado *Experimentos*, coordinado por la Dra. Carreras (UNED), donde se presentó en primer lugar el trabajo *Laboratorios virtuales y remotos de Óptica en UNILabs* por el profesor de la UNED Juan Pedro Sánchez. A continuación la profesora C. Ferrer hizo una presentación con el título *La feria Experimenta de Valencia cumple diez años (2005-2015)*, feria donde se exhiben los trabajos realizados por alumnos de Secundaria que como indica el título de la ponencia tiene ya una larga andadura.

Se cerró el Encuentro Ibérico con el Monográfico *Educación Secundaria*, en el que se presentó y se pudo debatir sobre un tema de actualidad en el campo de la Educación Secundaria, *Ley Orgánica para la mejora de la calidad educativa, 2013*, (LOMCE). Se comenzó con una conferencia de título *La LOMCE: Un marco nuevo para organizar los currículos. Currículo de Física y Química* impartida

por Dña. Sagrario Chinarro (Subdirectora General de Cooperación Territorial del Ministerio de Educación, Ciencia y Deporte). La conferenciante presentó las reformas que introduce esta ley como una oportunidad para mejorar la calidad del sistema educativo centrándose en el diseño de los nuevos currículos. El tema se completó con el Panel *Evaluaciones en Secundaria: LOMCE y PISA*, coordinado por la profesora María Luisa Amieva (IES Valle de Aller, Asturias) y en el que intervinieron: Joaquín Vera (Instituto Nacional de Evaluación Educativa, MECD), Arturo Pérez-Collera (Área de Gestión de Calidad y Evaluación, Consejería de Educación de Asturias) y C. Portela. En el Panel se abordó fundamentalmente el modelo de evaluación de los aprendizajes que se propone en la nueva ley siempre con el referente de la conocida evaluación internacional.

En síntesis, en esta 25ª edición del Encuentro Ibérico se han dado cita más de setenta participantes, entre ponentes invitados y asistentes procedentes de universidades y centros de secundaria, tanto de España como de Portugal. Además hemos contado con participantes inscritos en la Biental y una representación de profesores de Educación Secundaria del Principado de Asturias, invitados a asistir al Encuentro. Una vez más, el programa ha suscitado el interés y la participación activa de miembros del Grupo y de colegas portugueses.

Un conjunto de elementos favorables se han aglutinado en este encuentro sobre la enseñanza de la Física. El elevado nivel de las presentaciones, la atinada selección de los contenidos de los Monográficos, además del acierto de realizar un Simposio conjunto con otros dos grupos de la RSEF, han sido motivo de felicitación por parte de los asistentes. Los miembros del *Comité Científico y Organizador* desean manifestar su agradecimiento a todos los participantes por la colaboración y el ánimo recibido que, sin duda, han redundado en el éxito alcanzado.

Verónica Tricio Gómez
Presidenta del Grupo
Especializado Enseñanza
de la Física



Paloma Varela Nieto
Vicepresidenta del Grupo
Especializado Enseñanza
de la Física



Puntos de interés

Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica y sus actores¹

UN CASTIGO PARA ESCAPAR DE LA TRAGEDIA

En un ejemplo típico de *tragedia de los comunes*, a cada país le conviene económicamente seguir usando o vendiendo combustibles fósiles pero todos admiten que hay que parar ya. Esta **deserción global corresponde en teoría de juegos a un equilibrio de Nash**. Alcanzada la cooperación global, es posible mantenerla si los jugadores (sean países, miembros de una tribu o estudiantes de psicología) pueden

situaciones de poca cooperación. La estrategia más sencilla se ilustra en el panel (a) de la figura. Consiste en posicionar a los jugadores según algún orden (a ser posible, que aproximadamente coincida con su tendencia natural a cooperar) y que **aquellos jugadores que estén dispuestos a castigar declaren que castigarán a cualquier jugador que no coopere si y sólo si el jugador a su izquierda coopera**. Las simulaciones muestran que la cooperación global se consigue con mucho menos nivel de castigo que cuando la estrategia consis-

te en castigar a todo desertor. A veces conviene refinar la estrategia. Por ejemplo, **si los jugadores son algo irracionales, es más robusta una estrategia de grupos**, como en el panel (b) de la figura. En este caso, un jugador que no coopere se considera culpable si cierto porcentaje del grupo a su izquierda está cooperando.

Estos “juegos” llevan a Johnson a proponer una **estrategia que puede servir a la comunidad internacional para combatir el cambio climático y otras “tragedias”,** como la sobrepesca, la deforestación y la contaminación.

La idea consiste en formar **grupos que se comprometen a hacer cambios (emitir menos, dejar reservas sin extraer...)** sólo cuando el grupo anterior esté cumpliendo sus compromisos. Así, países pequeños pero ricos, o muy vulnerables, pueden participar en los primeros grupos, sabiendo que sus contribuciones tendrán un impacto, y los que estén más abajo se benefician de la reducción temporal de responsabilidad. Se podría encontrar una combinación de sanciones, ayudas o boicots que juegue el papel de “castigo dirigido”, pero incluso el notarse **vigilado por los ojos del mundo** ya puede tener un efecto muy importante.

castigar a los que no cooperan. Pero es mucho más **difícil llevar a una sociedad en deserción hacia la armonía**. Existe una transición de fase discontinua, donde la solución depende del estado inicial.

Samuel Johnson, entre las Universidades de Granada y Warwick, ha mostrado (DOI: 10.1098/rsos.150223) que **existen estrategias de castigo dirigido capaces de llevar gradualmente a una comunidad de desertores hacia la cooperación global**. La clave está en encontrar maneras de no diluir la capacidad castigadora de la sociedad en

¹ Animamos al lector a que proponga contribuciones para ser consideradas en esta sección y, en su caso, a debatir temas que aquí se presentan enviando sus comentarios para la sección “Pulsos e impulsos”.

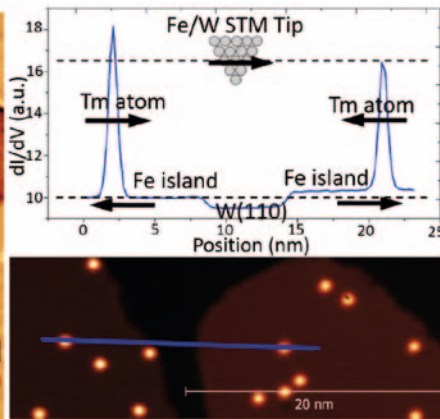
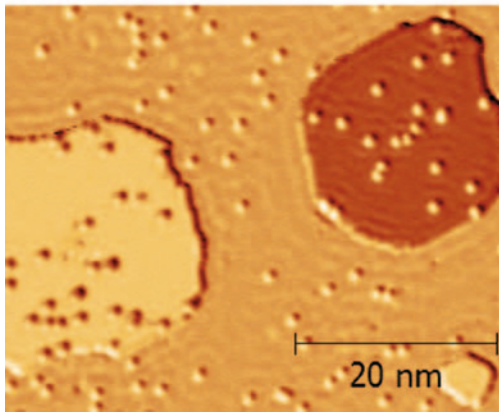


MAGNETISMO DE TIERRAS RARAS

El aumento de densidad de grabación magnética y el perfeccionamiento de dispositivos aptos para espintrónica, que requieren un buen conocimiento y control del acoplamiento entre nanomaneos, son factores importantes en el desarrollo de futuros sistemas de computación cuántica.

Las unidades magnéticas más pequeñas que podemos manipular para la fabricación de nanoestructuras son átomos, y el microscopio de efecto túnel (STM) permite manipular átomos aislados adsorbidos sobre superficies (adátomos) y determinar su estado magnético. Esto ha permitido una mejor comprensión de las interacciones magnéticas de adátomos y nanoestructuras sobre distintas superficies, un tema de interés en las dos últimas décadas, principalmente en relación con adátomos de metales de transición, cuyo momento magnético está asociado a los electrones 3d. Por otro lado, ya que en las aplicaciones indicadas **el momento magnético y la anisotropía magnética han de ser elevados, los átomos de Tierras Raras (TR) aparecen como candidatos que deben considerarse frente a los de metales 3d**, lo que ha incrementado recientemente la investigación en imanes moleculares con un ion de TR.

La accesibilidad de los electrones internos 4f de la TR y su papel en la corriente túnel, aunque abordada en



dichos imanes moleculares, es controvertida para el caso de átomos de TR sobre metales y clave para estimar la anisotropía magnética de los adátomos. David Coffey, José L. Díez-Ferrer, David Serrate, Miguel Ciria, César de la Fuente y José I. Arnaudás, en la Universidad de Zaragoza, han arrojado luz sobre este tema (DOI: 10.1038/srep13709) investigando el tipo de **acoplamiento magnético y el carácter de la corriente túnel para átomos de tulio (Tm) y de lutecio (Lu) sobre islas monocapa atómica de hierro**, en las que están adsorbidos. Las TR Tm y Lu poseen capas electrónicas externas comparables, pero su magnetismo es muy diferente, ya que la capa magnetógena 4f no está llena en Tm, pero sí en Lu, de forma que este último no posee momento magnético 4f. El similar comportamiento observado para ambos adátomos, independiente de que su capa 4f esté completa o no, indica que **en metales de TR los electrones que intervienen en la corriente túnel son los 5d**, lo cual dificulta el uso tecnológico de los electrones 4f en sistemas de átomos individuales. Los experimentos, en combinación con cálculos de primeros principios, muestran además que en ambos tipos de adátomos de TR, **los estados 5d, por su hibridación con los 3d del hierro, tienen un momento magnético de espín neto que se acopla antiparalelamente a la imanación, paralela al plano, de la isla de hierro** (la figura muestra el caso Tm/Fe).

TERMITAS Y CAMBIOS DE FASE

Las termitas, a pesar de sus posibles efectos devastadores en zonas habi-

tadas, **juegan un papel relevante en el ciclo del nitrógeno** y de otros elementos. Esto es así porque habitan en túneles bajo tierra formando colonias, donde **acumulan formas orgánicas de esos elementos que luego transforman en inorgánicas obteniendo energía**. En un estudio (DOI: 10.1126/science.1261487) con participación de Juan Antonio Bonachela en el Departamento de Ecología de la Universidad de Princeton, en colaboración con colegas de la Universidad de Strathclyde (Reino Unido) y del Mpala Research Centre de Nanyuki, se concluye que el papel de las termitas en zonas de clima semiáridas,



do como los altiplanos de Kenia (en la foto adjunta de Robert M. Pringle, tras la temporada de lluvias, donde se aprecian montículos de termitas cubiertos de vegetación) puede ser incluso más relevante.

La densidad de agua de lluvia en zonas semiáridas es el recurso que más limita el crecimiento de vegetación y, por tanto, un factor determinante para

la supervivencia. Puede decirse que **es el parámetro de control en un cambio de fase** entre una zona desértica y otra con vegetación. Los modelos teóricos de interacción agua-vegetación conocidos muestran que este cambio es abrupto (como los de “primer orden” en termodinámica), con el umbral de desertificación (cambio vegetación → desierto) mayor que el umbral de recuperación (cambio desierto → vegetación), por tanto mostrando un ciclo de histeresis.

El nuevo estudio, destacado en la portada de *Science*, **usa la teoría de cambios de fase para mostrar cómo las termitas contribuyen a incrementar la robustez de su ecosistema** ante cambios climáticos. El escenario se hace mucho más complejo cuando hay termitas puesto que sus túneles ayudan a la infiltración de agua y, por tanto, incrementa la humedad, mientras que la acumulación de material orgánico e inorgánico aumenta la densidad de nutrientes. El resultado global es que **las termitas crean de manera efectiva “islas de fertilidad”** en (y alrededor de) los termiteros, resultando condiciones para el creci-

miento de vegetación más favorables. De hecho, añadiendo estos factores a los modelos matemáticos conocidos, el diagrama de fases cambia radicalmente: **para cantidades de lluvia con las que el sistema original sería desierto, el sistema con termitas muestra vegetación sobre los termiteros**. Así, los umbrales de desertificación y recuperación quedan desplazados

a densidades de lluvia menores o, en otras palabras, el ecosistema resiste condiciones más severas y se recupera más fácilmente, todo gracias a la presencia de las termitas.

El modelo teórico ha permitido un estudio muy detallado que, sobre el terreno, hubiera requerido un control exhaustivo del sistema real (densidad de lluvia incluida) durante décadas, algo difícilmente realizable en la práctica. También es notable que se trata de un **estudio multidisciplinar**, fruto de combinar datos sobre el terreno, ecología, y modelos matemáticos, **en el que la física ha sido determinante**.

LÁSERES ORGÁNICOS VERSÁTILES, COMPACTOS Y EFICIENTES

Los láseres basados en películas delgadas orgánicas tienen gran interés por sus potenciales aplicaciones en

preparado en película delgada usando métodos baratos tales como la impresión.

Una colaboración (DOI: 10.1038/natcomms9458) entre el grupo de María A. Díaz-García, de la Universidad de Alicante, Juan Casado, de la Universidad de Málaga y un grupo japonés **ha conseguido fabricar láseres con estas características**, esto es, muy eficientes, extremadamente estables durante su funcionamiento bajo iluminación en condiciones ambientales (permiten más de 24 horas de operación continua) y emiten en todos los colores del espectro visible. Esto ha sido posible **combinando un nuevo tipo de moléculas orgánicas** basadas en oligoparafenilenos vinilenos rigidificados intramolecularmente (denominadas COPVn, con $n = 1-6$, siendo n el número de veces que se repite una unidad básica), que muestran ganancia óptica y fotoestabilidad elevadas, así como gran estabilidad química y térmica, **con resonadores láser fabricados mediante técnicas lito-**

gráficas, que consisten en nanoestructuras grabadas en la propia película o en el sustrato sobre el que ésta se deposita. **El resonador láser es un elemento básico** en estos dispositivos cuya función consiste en que el haz de luz originalmente generado por el material pase muchas veces

a su través para conseguir mayor amplificación y un color mejor definido, es decir, un espectro de emisión muy estrecho. La protección estérica del esqueleto de carbono ópticamente activo y la rigidez/planaridad estructural de los COPVn son claves en el diseño para obtener emisión láser con muy poca energía de excitación, cercana a la que pueden suministrar fuentes compactas, tales como diodos láser o incluso diodos emisores de luz. Además, estos compuestos permiten modular el color de la emisión en prácticamente todo el espectro visible, simplemente cambiando el número n ; y son semiconductores, lo que permite desarrollar láseres orgánicos excitados eléctricamente. **Los COPVn son materiales únicos que aúnan todas estas propiedades en un**

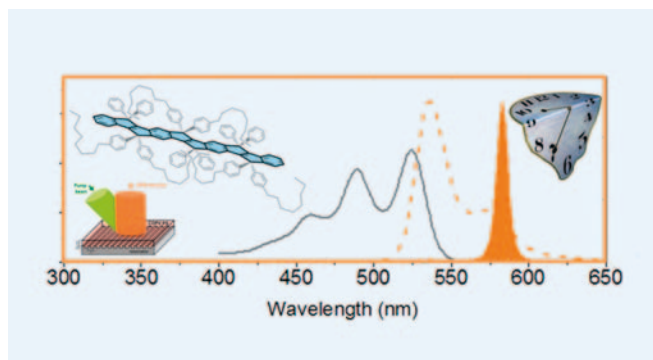
único diseño molecular permitiendo así fabricar láseres con prestaciones excelentes.

COMUNICACIÓN ELÉCTRICA EN BACTERIAS

El sistema nervioso es uno de nuestros principales activos. Los pensamientos y la inteligencia, la manera en que percibimos el mundo a través de nuestros sentidos y cómo actuamos sobre él a través de nuestros músculos, todo ello depende de la comunicación eléctrica entre células especializadas, las neuronas. Iones diversos entran y salen de nuestras neuronas continuamente, dando lugar a pequeñas corrientes eléctricas cuya propagación permite que **distintas partes de nuestro cuerpo se comuniquen entre sí y con nuestro cerebro de forma muy eficiente**. ¿Pero cómo surge esta forma de comunicación celular? Hasta el momento sólo se había observado comunicación eléctrica en células relativamente complejas, empezando por los paramecios. Una colaboración de Jordi García Ojalvo en la Universitat Pompeu Fabra con colegas de las Universidades de California en San Diego y de Warwick en el Reino Unido acaba de mostrar (DOI: 10.1038/nature15709) que **las bacterias ya usan señales eléctricas para comunicarse entre sí**.

Se sabe desde hace años que éstas **tienen canales iónicos**, estructuras **que permiten a los iones entrar y salir** de las células. Comprender el uso que tienen estos canales ha sido crucial para comprender el caso de nuestras neuronas. Aquellos investigadores han descubierto que **las bacterias usan esos canales para comunicarse entre sí cuando se encuentran en dificultades** debido, por ejemplo, a la falta de nutrientes. Esto pasa frecuentemente en biofilms bacterianos, colonias celulares en las que conviven millones de bacterias, cuando se dan condiciones adversas. **Las bacterias pueden entonces sobrevivir mejor, lo que puede llegar a constituir un problema clínico y medioambiental** para los seres humanos, debido a su resistencia a antibióticos y agentes desinfectantes.

En los biofilms bacterianos, **las bacterias del interior se encuentran en una situación de gran estrés debido**



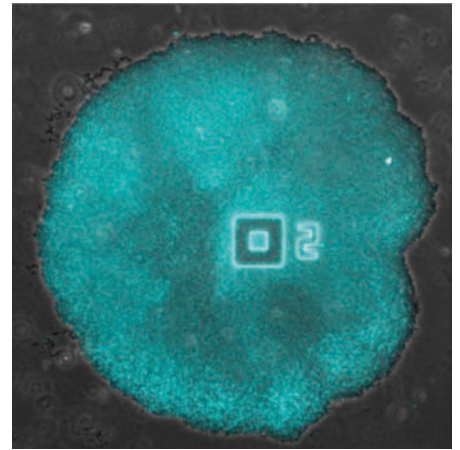
comunicaciones ópticas, espectroscopía y sensores químicos y biológicos. Su atractivo reside en que sus componentes orgánicos los hacen **baratos, mecánicamente flexibles, compactos**, fácilmente integrables con otros dispositivos y emiten luz en todo el espectro visible. El reto actual consiste en dar con el material orgánico adecuado que permita llevarlos al mercado. Esto es, **han de amplificar con altas prestaciones en varios aspectos**. Se les pide que requieran poca energía para funcionar, de modo que puedan alimentarse con una fuente de luz compacta o una batería, que tengan funcionamiento estable en aire que permita larga duración, que emitan luz de distintos colores, y que el material sea soluble para poder ser

a la falta de nutrientes. El estudio de García Ojalvo y colaboradores pone de manifiesto que estas bacterias **envían entonces señales eléctricas a las bacterias de la periferia del biofilm, menos estresadas**, para que les ayuden a sobrevivir (básicamente **dejando pasar más nutrientes**). La principal moneada de cambio de esta interacción es el glutamato, y el ión asociado es el potasio.

Curiosamente, el glutamato y el potasio **juegan también un papel muy importante en desórdenes neurona-**

les como las auras, ondas de actividad eléctrica anómala que se producen en el cerebro de personas con **epilepsia y migrañas**. Es por tanto de esperar que el fenómeno descubierto ahora en neuronas pueda asociarse con esos comportamientos patológicos en el cerebro humano.

La figura, obtenida en el laboratorio de la UCSD, muestra un biofilm formado por bacterias *Bacillus subtilis*. El azul se corresponde con la fluorescencia de Thioflavina-T, un marcador de potencial de membrana.



EL SISTEMA D13. NADA QUE CELEBRAR

by Joan Tretze. 2015

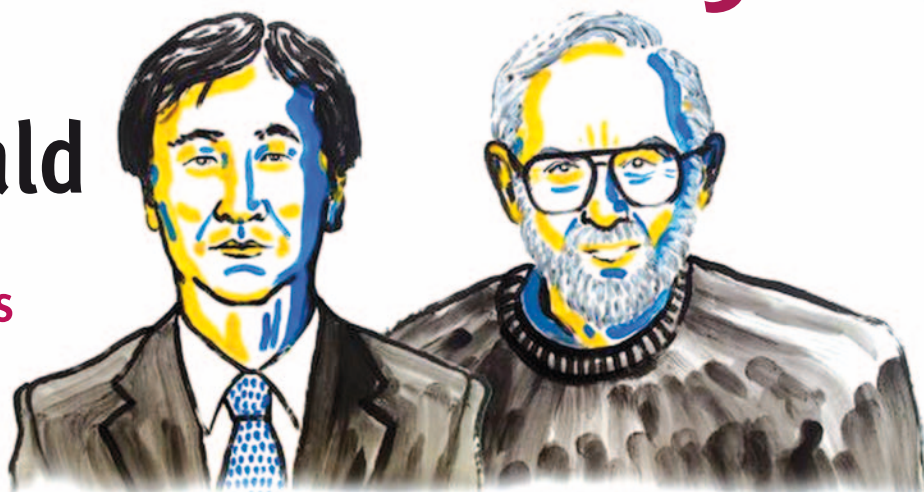


Premio Nobel de Física 2015

T. Kajita y
A. B. McDonald

El descubrimiento de las
oscilaciones de neutrinos

Juan José
Hernández Rey



Illustrations: Niklas Elmehed, Nobel Prize Medal: © © The Nobel Foundation, Photo: Lenn

El premio Nobel de Física 2015 ha sido concedido al físico japonés Takaaki Kajita, que fue líder del experimento SuperKamiokande, y al canadiense Arthur B. McDonald, líder del Sudbury Neutrino Observatory. Ambos experimentos mostraron que los neutrinos producidos en la atmósfera terrestre y en el núcleo del Sol, respectivamente, cambiaban de tipo (o “familia”) durante su trayecto a la superficie terrestre. La explicación más plausible era que se trataba de un fenómeno de oscilación cuántica y, por tanto, que los neutrinos debían de tener masa, contradiciendo lo que se había venido suponiendo hasta entonces.

Faltan neutrinos

A mediados de los años 60, Raymond Davis, un competente radioquímico del laboratorio de Brookhaven en Estados Unidos, estimulado por el físico teórico John Bahcall, llevó a cabo el que terminaría por convertirse en un famoso experimento, seminal, “el de la mina de Homestake”, que le reportaría a Davis el premio Nobel de Física en 2002. Su finalidad era detectar los neutrinos producidos en las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en el Sol. El experimento, localizado para reducir la radiación cósmica a casi 1.500 m de profundidad en la mina de Homestake (Dakota del Sur, EE. UU.), consistía en unos 400.000 litros de percloroetileno, en el que se detectaban los neutrinos gracias a su captura por parte de un isótopo del cloro, el ^{37}Cl (el percloroetileno es un líquido utilizado para la limpieza en seco: un chascarrillo que corrió entre los físicos de la especialidad es que las lavanderías de Dakota del Sur se quejaron al gobierno federal de la escasez del producto debido al experimento de Davis).

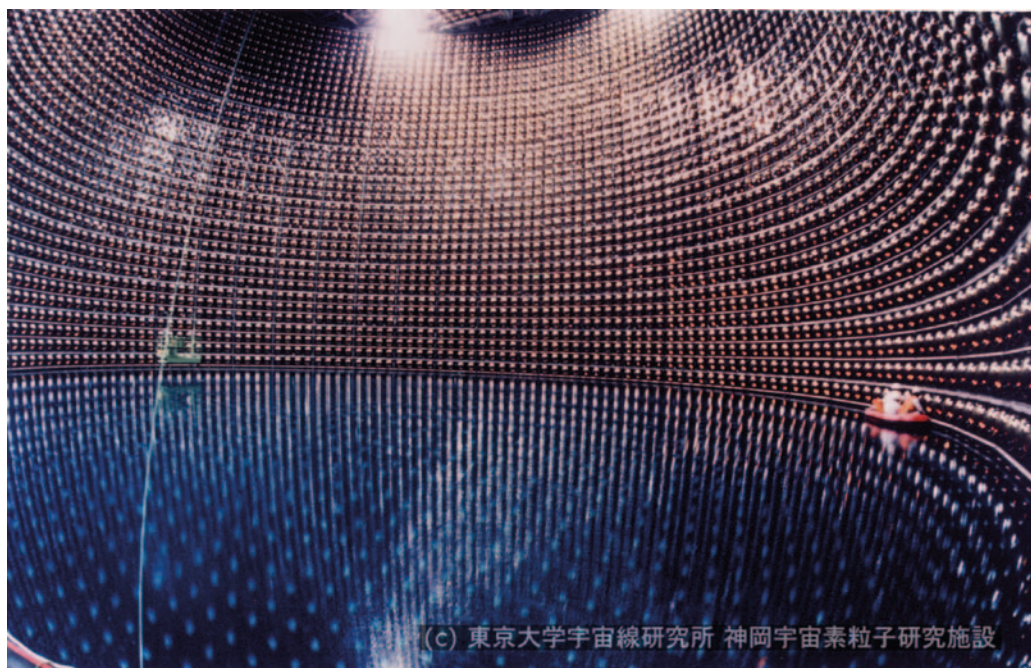
Sus primeros resultados, publicados en 1968, indicaban que el número de neutrinos detectados era aproximadamente un tercio de los esperados según los cálculos del propio John Bahcall. Nadie pareció particularmente sorprendido por esta discrepancia: el método experimental empleado era relativamente complejo y sometido a grandes incertidumbres. A modo de ejemplo, la propuesta de utilizar cloro para detectar neutrinos surgió del físico Bruno Pontecorvo, pero el que R. Davis se decidiera a utilizarlo para los neutrinos solares se

debió a que unos cálculos posteriores de John Bahcall mostraron que la probabilidad de captura de neutrinos por el ^{37}Cl era veinte veces mayor de lo estimado previamente. En el experimento se capturaba en promedio un neutrino cada dos días. Estos neutrinos se registraban contando los átomos de ^{37}Ar que se creaban, lo que da una idea de las dificultades e incertidumbres a las que tenía que hacer frente el experimento.

Por otro lado, el modelo del Sol no había sido comprobado experimentalmente con precisión, así que la discrepancia podía también deberse al conocimiento limitado que se tenía de los mecanismos de fusión termonuclear. Por ejemplo, como el umbral de energía a partir del cual el experimento detectaba los neutrinos era de 0,814 MeV, los neutrinos observados procedían principalmente de la reacción nuclear que da lugar a un isótopo del boro (^{10}B) y a su posterior desintegración. Esta reacción no es el proceso principal de producción de neutrinos en el Sol (representan poco más del uno por mil de todos los neutrinos generados) y además su probabilidad de ocurrencia depende como la potencia 25 (¡veinticinco!) de la temperatura del “horno solar”. Una ligera desviación en la temperatura con respecto a lo calculado por el modelo solar podía explicar fácilmente el déficit de neutrinos. La perseverancia de R. Davis en mostrar que la incertidumbre experimental en sus medidas estaba por debajo de la discrepancia observada y, por otro, la de John Bahcall en disipar cualquier duda sobre las predicciones del modelo solar convencieron a la comunidad científica de que efectivamente había una diferencia significativa, que acabó siendo conocida como “el problema de los neutrinos solares”. Los últimos resultados de Homestake fueron publicados en 1998, después de casi 25 años de tomas de datos y no dejaban lugar a dudas de que llegaban del Sol menos neutrinos de los esperados. Por otro lado, la heliosismología, el estudio de la propagación de las ondas en el Sol, parecía confirmar el modelo del Sol desarrollado y refinado por Bahcall y otros.

Se ahonda el misterio

Para poder detectar los neutrinos emitidos en la reacción principal en el Sol, que es la de fusión protón-protón, se lle-



Montaje de los fotomultiplicadores de SuperKamiokande en junio de 1995.

varon a cabo los experimentos Gallex y GNO en el laboratorio italiano del Gran Sasso y el experimento SAGE en el laboratorio ruso de Baksan. Estos experimentos utilizaban galio como blanco, cuya energía umbral de captura de neutrinos es de 0,233 MeV y, por tanto, es sensible a los neutrinos de la reacción principal, que llegan a tener una energía máxima de alrededor de 0,4 MeV. Ambos experimentos observaron de nuevo un déficit de neutrinos, en este caso en torno al 50 %. Los primeros resultados de SAGE fueron publicados en 1991 y los últimos en 2009. Los primeros de Gallex se publicaron en 1992, y los últimos en 1997, aunque el experimento continuó con su sucesor, GNO, que tomó datos hasta 2003. No es precisamente perseverancia lo que ha faltado en esta historia de los neutrinos desaparecidos.

Una de las características de los experimentos radioquímicos anteriores es que sólo pueden detectar neutrinos electrónicos. Los sucesos que se producen son “de corriente cargada”: el neutrino se convierte en su leptón cargado asociado (el neutrino electrónico en un electrón, el muónico, en un muón, etc.). Como quiera que la energía máxima de los neutrinos solares es menor que 20 MeV, los neutrinos muónicos y tauónicos, de producirse, no tendrían energía suficiente para crear un muón (que tiene una masa de 105 MeV) o un leptón tau (cuya masa es de 1.777 MeV) y, por tanto, no podrían ser detectados.

El experimento japonés Kamiokande fue diseñado originalmente para buscar la desintegración del protón, predicha por algunas teorías de Gran Unificación, y fue remodelado algún tiempo después para detectar neutrinos solares (empezó a hacerlo en 1986). El detector, situado a unos 1.000 metros de profundidad en la mina de Mozumi en Japón, era básicamente una vasija que contenía unas 700

toneladas de agua, monitorizadas por detectores muy sensibles a la luz llamados fotomultiplicadores. La reacción que este tipo de detector observa es la interacción de un neutrino con un electrón. La técnica de detección empleada, a saber la observación de la luz Cherenkov que produce el electrón al atravesar el agua, tiene la ventaja de que puede determinar, aunque con una incertidumbre relativamente alta, la dirección de llegada del neutrino a partir de la del electrón observado. El experimento, que proporcionó los primeros resultados en 1987, mostró efectivamente que

la señal procedía en su mayoría de la dirección del Sol (su líder, Masatoshi Koshiba, recibió el premio Nobel en 2002, junto con R. Davis). Aunque en este caso la interacción neutrino-electrón tiene lugar para los tres tipos de neutrinos, es preponderante para el neutrino electrónico (84 %). Posteriormente, el experimento sucesor, SuperKamiokande, que contiene 50.000 toneladas de agua, continuó la investigación a partir de 1996. En ambos detectores se observó de nuevo un déficit, esta vez de algo más de la mitad de los esperados. Debido a los umbrales relativamente altos de ambos experimentos (7 MeV para Kamiokande y 5 MeV para SuperKamiokande) sólo podían observar los neutrinos procedentes de la cadena de fusión que da lugar al ^8B .

Oscilaciones de neutrinos

Las propuestas para explicar el déficit de neutrinos fueron muy numerosas y variadas, muchas de ellas basadas en un funcionamiento del Sol distinto al que describía el modelo estándar solar (a modo de anécdota: Stephen Hawking propuso en 1971 que en el centro del Sol podría existir un pequeño agujero negro que modificase el número de neutrinos que se emitían). No obstante, ya desde el principio, una de las explicaciones que se manejaron fue la de que las familias de neutrinos se transformaban entre sí, y que esa “oscilación” daba lugar a un déficit aparente al ser detectados sólo los neutrinos de una sola de las familias.

En 1957, el prolífico físico B. Pontecorvo había sugerido que los neutrinos y anti-neutrinos podían oscilar entre sí, como se sabía que lo hacían los kaones neutros. Al poco tiempo de que se descubriese experimentalmente que los neutrinos asociados a las reacciones del electrón y del muón eran distintos (L. Lederman, M. Schwartz y J. Steinberger, 1962; premios Nobel en 1982), los físicos japone-

ses Z. Maki, M. Nakagawa, and S. Sakata desarrollaron el marco teórico de las oscilaciones entre dos familias de neutrinos, marco que fue sometido en 1967 a una ulterior elaboración por parte de B. Pontecorvo. En 1978, L. Wolfenstein señaló que la presencia de materia podía modificar sustancialmente las oscilaciones, efecto que fue desarrollado posteriormente por S. Mikheyev y A. Smirnov. De hecho, dadas las altas densidades de electrones en el Sol, este efecto resultaba particularmente importante para los neutrinos solares de más energía.

Para confirmar la hipótesis de que eran las oscilaciones las que estaban produciendo un déficit de neutrinos electrónicos era necesario poder medir el flujo total de neutrinos, y por tanto, el de las otras dos familias, los neutrinos muónicos y tauónicos.

El Observatorio de neutrinos de Sudbury (SNO)

En 1984, H. Chen, de la Universidad de California en Irvine, propone usar deuterio como blanco para detectar los neutrinos solares. Su ventaja frente al hidrógeno es que las tres familias de neutrinos interaccionan con la misma probabilidad en el deuterio a través de sucesos de “corriente neutra”, aquellos en que el neutrino sale inalterado de la interacción, es decir sin convertirse en su correspondiente leptón cargado. Lo hace disociando el núcleo de deuterio en un protón y un neutrón, lo que requiere una energía de poco más de 2 MeV. Por otro lado, los neutrinos electrónicos (y sólo ellos) pueden interaccionar con el neutrón del deuterio en un suceso de “corriente cargada”, en el que el neutrino se convierte en un electrón y el neutrón en un protón. Esta reacción puede medir el flujo de neutrinos electrónicos por separado. Finalmente, las tres familias pueden tener sucesos de interacción con los electrones de los átomos del agua, pero principalmente los neutrinos electrónicos. En resumen, gracias al deuterio se podía medir, por un lado, el flujo de los tres tipos de neutrinos juntos y por otro, el de los electrónicos por separado.

El Sudbury Neutrino Observatory, situado a 2.100 m de profundidad en la mina Creighton en Sudbury (Ontario, Canadá) empezó a tomar datos en 1999. Consistía en una vasija que contenía unas mil toneladas de agua pesada (es decir, con deuterio, en vez de hidrógeno) que era monitorizada por unos diez mil fotomultiplicadores. Desde el punto de vista experimental, una de las cuestiones más críticas era cómo detectar la interacción de corriente neutra en la que el protón y el neutrón del deuterio se disociaban. Esto fue posible gracias a la observación del neutrón liberado. En una primera etapa se llevó a cabo simplemente a través del proceso de captura del neutrón por parte del propio deuterio, que da lugar a un rayo gamma de algo más de 6 MeV. Sin embargo, este es un proceso poco eficiente y la energía liberada estaba apenas

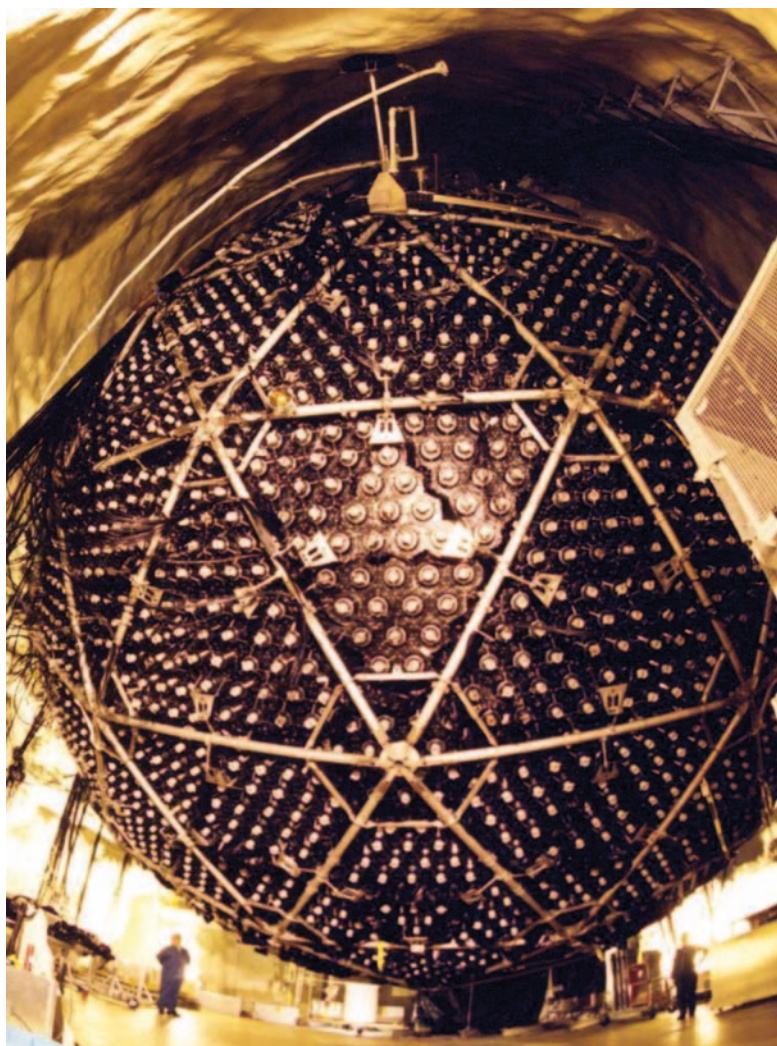
por encima del umbral de funcionamiento del detector, que era de 5 MeV. Así pues, en una segunda fase, se añadieron dos toneladas de sal común (ClNa), ya que la tasa de captura del neutrón en el cloro es mayor y el rango de energías del gamma liberado llega hasta los 8,6 MeV. Finalmente, en una tercera fase se retiró la sal y se instalaron contadores de neutrones que utilizaban helio-3.

Los resultados que la colaboración SNO fue proporcionando desde el año 2002 con los datos de las distintas fases eran coherentes entre sí y conclusivos: el número de sucesos de corriente neutra observados en los que, recordemos, se registran los tres tipos de neutrinos, coincidían con el flujo predicho por el modelo solar. Es decir, los neutrinos no desaparecían, se transformaban unos en otros. Aún más, el número de sucesos de corriente cargada que, como hemos dicho, son sólo producidos por neutrinos electrónicos, mostraban un déficit respecto al flujo total esperado. Los neutrinos electrónicos desaparecían, pero se convertían (oscilaban) en las otras dos familias.

Neutrinos atmosféricos, tu quoque?

La atmósfera está siendo continuamente bombardeada por rayos cósmicos, protones en su mayor parte y, en menor proporción, partículas alfa y nú-

Vista exterior de la estructura de soporte de los fotomultiplicadores de Sudbury Neutrino Observatory.



cleos más pesados. Cuando estas partículas interactúan con los núcleos de la atmósfera producen una cascada de hadrones (partículas sometidas a la interacción fuerte). En las desintegraciones de estos hadrones se producen neutrinos. La mayoría de estos neutrinos proceden de piones cargados, que se desintegran en un neutrino muónico y un muón, que a su vez se desintegra en un electrón, un neutrino electrónico y uno muónico. Por tanto, esta cadena de desintegración produce el doble de neutrinos muónicos que de electrónicos. Aunque esta relación cambia un poco al aumentar la energía de los neutrinos (porque entonces los piones interactúan antes de decaer y además los neutrinos pueden proceder también de la desintegración de kaones), lo cierto es que para un amplio rango de energías, desde el GeV a las decenas de GeV, esta relación es un factor 2 (las simulaciones detalladas muestran que es así con una precisión del 5 %). Varios experimentos habían dado indicaciones de que el valor observado se desviaba de ese valor esperado, pero fue SuperKamiokande quien reportó en 1998 de forma muy clara que ese cociente variaba dependiendo de la dirección de llegada de los neutrinos y de su energía. Este experimento observó que mientras que el número detectado de neutrinos electrónicos coincidía con los esperados, el de neutrinos muónicos se desviaba notablemente. A bajas energías, faltaban aproximadamente la mitad en todo el rango de ángulos de llegada. A altas energías, el número de los que procedían de arriba coincidía con las expectativas, pero de los que procedían de abajo faltaban la mitad. Esto sugería de forma clara que se estaban produciendo oscilaciones, porque eso es en líneas generales lo que uno esperaría de tal fenómeno. Efectivamente, las oscilaciones dependen del cociente entre la distancia recorrida y la energía del neutrino. Los neutrinos que proceden de la parte alta de la atmósfera recorren como máximo unos 15 kilómetros de distancia (el grosor de la atmósfera), mientras que los procedentes del otro lado de la Tierra pueden recorrer distancias de hasta 13.000 kilómetros (el diámetro de la Tierra). Todo parecía indicar, aunque SuperKamiokande no lo podía comprobar, que los neutrinos muónicos se estaban convirtiendo en tauónicos, puesto que por una parte llegaban menos muónicos de los esperados y por otra no había un incremento de los electrónicos. Era de nuevo un fenómeno de oscilación, como en el caso de los neutrinos solares.

Desde entonces, se han sucedido una larga serie de experimentos, usando tanto haces de neutrinos como neutrinos procedentes de reactores, que han medido los parámetros que determinan las oscilaciones de neutrinos, básicamente tres ángulos de mezcla y dos diferencias de las masas al cuadrado de los neutrinos (dejando a un lado las fases asociadas a una posible violación de la simetría CP). Es imposible describir aquí todo el ingente trabajo que se ha venido realizando tanto teórica como

experimentalmente desde entonces. Digamos a modo de resumen que la precisión con la que estos parámetros se han medido, aunque aún lejos de la correspondiente del sector de los quarks, está entre el 5 % y 10 % de error relativo, una verdadera hazaña teniendo en cuenta la dificultad experimental que entraña estudiar estas partículas. Algunos hitos recientes son la observación efectiva de la aparición de anti-neutrinos electrónicos en un haz de anti-neutrinos muónicos llevada a cabo por el experimento japonés T2K (en el que participan investigadores del IFIC de Valencia y del IFAE de Barcelona) y la medida del parámetro de mezcla θ_{13} , por parte, entre otros, del experimento Double-Chooz (en el que participan investigadores del CIEMAT de Madrid), y cuyo valor da esperanzas de poder medir en un futuro la violación de la simetría combinada CP en el sector leptónico.

Relevancia del descubrimiento

La oscilación entre tipos (familias o “sabores”) de neutrinos es un fenómeno cuántico que se debe a que los autoestados de masa no son los mismos que los que produce la interacción débil. Para que ocurra es necesario que al menos dos de los neutrinos sean masivos. A día de hoy desconocemos la masa de los neutrinos, aunque tenemos algunas cotas proporcionadas principalmente por medidas cosmológicas (muy dependientes de modelo) y por la desintegración beta del tritio. Ni siquiera sabemos el orden (o “jerarquía”) en la que se encuentran los autoestados (un asunto que, por cierto, tratará de dilucidar el experimento KM3NeT-ORCA en el que participan físicos del IFIC de Valencia).

El fenómeno de oscilación ya es conocido en otras partículas (los kaones neutros, los mesones con belleza), pero en el caso de los neutrinos toma una especial relevancia y sus implicaciones nos llevan a intuir que existe física más allá del Modelo Estándar. Efectivamente, el Modelo Estándar asume que los neutrinos no tienen masa. A la hora de extenderlo para incorporarla, se presenta la cuestión esencial de qué tipo de fermión es el neutrino. La “quiralidad” de los fermiones es una especie de “sentido de giro”. Para un fermión sin masa es equivalente al signo de la proyección de su espín sobre su dirección de movimiento y para uno masivo, está relacionada con su comportamiento bajo las transformaciones entre sistemas de referencia inerciales, según determina la relatividad especial. Por llamar de una forma simple a las dos posibles quiralidades, diremos que los fermiones pueden ser “zurdos” o “diestros”. La interacción débil sólo actúa sobre las componentes zurdas de los fermiones (y sobre las diestras de los antifermiones). Los leptones cargados (electrón, muón, tauón) son fermiones de Dirac: su quiralidad y su carga son dos variables independientes. Pero puede darse el caso de que ambas, quiralidad y carga, estén ligadas. En el Modelo Estándar, por ejemplo,

la relación entre la quiralidad y la “carga leptónica” de los neutrinos está fijada: los neutrinos son zurdos y los anti-neutrinos diestros, y no al revés. Como los neutrinos no tienen carga eléctrica, si son completamente neutros (no tienen siquiera carga leptónica o esta no se conserva), entonces pueden ser su propia antipartícula: decimos que se trata de un fermión de Majorana (si lo son o no, es lo que trata de dilucidar el experimento NEXT, liderado por físicos del IFIC de Valencia).

La masa de los fermiones es una especie de acoplo entre sus componentes quirales, como si surgiese de la interacción entre la parte zurda y la diestra de las partículas. Para los fermiones de Majorana una de las componentes quirales puede obtenerse a partir de la otra sin aumentar el número de grados de libertad. Pues bien, en ciertas condiciones, al mezclar masas de Dirac y de Majorana aparece una posible explicación natural de por qué los neutrinos son tan ligeros comparados con el resto de los fermiones conocidos: existirían neutrinos “diestros” muy masivos, cerca de la escala de energías de la Gran Unificación ($\sim 10^{15}$ GeV), que por un mecanismo llamado del balancín o del columpio (*seesaw*) han hecho descender las masas de los neutrinos conocidos muy por debajo de la escala a la que están el resto de fermiones. Además, este mecanismo podría explicar también el origen de la asimetría entre materia y anti-materia que observamos en el Universo: esos neutrinos diestros muy masivos se habrían desintegrado durante la evolución del universo violando la conservación del número leptónico, en un proceso que se ha dado en llamar leptogénesis. La violación del número leptónico acabaría transformándose posteriormente en una violación del número bariónico al enfriarse el Universo y producirse la transición de la fase electrodébil. Aunque todas estas hipótesis están por confirmar, lo cierto es que aparecen de una forma lo suficientemente natural como para prestarles seria atención.

En cuanto a los parámetros de la matriz de mezcla, hay que admitir que —al igual que en el sector de los quarks— el avance en la comprensión de los valores medidos experimentalmente ha sido más bien modesto. Ni siquiera entendemos hoy día el porqué de la existencia de tres familias (aunque debemos mencionar que en la teoría de cuerdas el número de familias o réplicas puede estar ligado a ciertas propiedades topológicas de los espacios que se obtienen al compactificar espacios de mayor dimensión).

Epílogo

El descubrimiento de las oscilaciones de neutrinos y, por tanto, el hecho de que tengan masa parece estar requiriendo “nueva física”, abriendo posibilidades reales de poder extender el Modelo Estándar, así que el entusiasmo generado a raíz de su descubrimiento parece justificado. La pertinencia de otorgarle el premio Nobel a estos descubrimientos concita el acuerdo de los físicos de partículas, que lo consideran relevante y merecido. Que el liderazgo y la determinación de T. Kajita y A. B. McDonald fueron esenciales para su realización está fuera de toda duda.

Los descubrimientos relacionados con los neutrinos han acumulado ya un número nada despreciable de premios Nobel. Dada la importancia de las cuestiones que aún quedan por resolver en torno a los neutrinos y los esfuerzos teóricos y experimentales dedicados a ellos, esperamos que el premio otorgado en 2015 no sea el último relacionado con estas sorprendentes partículas.

Juan José Hernández Rey

Director del Instituto de Física
Corpuscular de Valencia (CSIC-
Universidad de Valencia), centro
de Excelencia Severo Ochoa



12th International Meeting on Thermodiffusion (IMT12)

Madrid, Spain

May 30th – June 3rd, 2016

<http://eventos.ucm.es/go/IMT12>

Una entrevista informal con **NAZARIO MARTÍN**



Aunque planteada en un principio como entrevista, la cordialidad del Prof. Nazario Martín convierte este encuentro en una conversación, a lo largo de la cual van surgiendo diferentes temas de actualidad que, como Presidente de la Confederación de Sociedades Científicas de España (COSCE), le preocupan, y por las que demuestra un gran interés y conocimiento. Entre los temas tratados se encuentra el estado actual de la investigación, la Agencia Estatal de Investigación, la relación sociedad-ciencia, y los proyectos más relevantes de la COSCE, ENCIENDE y DECIDES. La COSCE surgió en 2003 para servir de paraguas a sociedades científicas españolas, estando formada hoy en día por 80, representando a unos 40.000 investigadores. Nazario Martín es catedrático de Química Orgánica de la Universidad Complutense de Madrid y director adjunto del IMDEA Nanociencia. Entre sus temas de investigación actuales destacan la química de nanoestructuras de carbono (fullerenos, nanotubos y grafeno), sistemas π -conjugados, y moléculas electroactivas para procesos de transferencia electrónica con aplicaciones en fotovoltaica y nanociencia. Conoce bien la RSEF ya que es socio, y fue presidente de la Real Sociedad Española de Química (RSEQ), sociedad hermana, entre los años 2006 y 2012. Ha recibido diversos premios como el Premio Dupont de la Ciencia correspondiente al año 2007, el Premio Jaime I 2012 en Investigación Básica y, el Premio Miguel Catalán 2014 de la Comunidad de Madrid a su carrera investigadora. Además de premios en el extranjero como el Alexander von Humboldt (Alemania), el Catalán-Sabatier (Francia) o el Richard E. Smalley de la Electrochemical Society (EE. UU.). Es autor de más de 500 artículos científicos y más de 50 libros y capítulos de libros. Toma la presidencia de la COSCE en marzo de 2015, puesto ocupado anteriormente por el matemático Carlos Andradás.

R. R.: En primer lugar nos gustaría que nos comentaras brevemente la estructura y los objetivos fundamentales de la COSCE.

N. M.: La sede de la COSCE se encuentra en Barcelona, y cuenta con una infraestructura en recursos humanos relativamente pequeña. Para una información más detallada se puede consultar nuestra página web, www.cosce.org. La COSCE tiene una voz que suele ser la del presidente, pero el trabajo interno se organiza mediante comisiones formadas por científicos de prestigio de diferentes sociedades, que se reúnen durante varios meses o años para realizar un proyecto. Ahora mismo, tenemos cinco comisiones encargadas de: ética científica, recursos públicos, recursos privados, gestión de la ciencia y ciencia y sociedad. Buscamos mejorar la conexión entre la sociedad y los científicos, marcando unas pautas. Necesitamos que los científicos se encuentren organizados para transmitir a la sociedad, incluyendo a las autoridades, el estado actual en el que se encuentra la ciencia. La ciencia es cultura y una persona culta en nuestros días ha de tener unos ciertos conocimientos científicos. En los dos últimos siglos, los avances sociales más importantes han estado marcados por la ciencia empezando por la Revolución Industrial en el siglo XIX. Estos avances se producen mediante ondas de innovación que duran unos 50 años aproximadamente, que cambian la forma de vivir y de pensar de la sociedad. Por ejemplo, en los últimos años este

La COSCE trata de mejorar la conexión entre sociedad y científicos, marcando unas líneas generales de actuación

cambio se ha producido por el desarrollo asociado a los ordenadores. Es una responsabilidad de los científicos el transmitir a la sociedad los aspectos más relevantes de estas innovaciones, incluyendo la ética de la ciencia. Tenemos que conectar también con los políticos porque, en su mayoría, no presentan una formación en ciencia que les permita entender estos avances. Ya lo decimos desde la COSCE, en los países que se ha optado por la ciencia como factor de desarrollo y de progreso social, aparece la gestión de la actividad científica, el análisis de su repercusión en el progreso económico y la transformación de la sociedad, entre las prioridades de la agenda de los políticos. En nuestro país no existe una percepción en el ámbito político de que los avances científicos vayan a tener un impacto económico o social a nivel nacional o internacional, por lo que el interés que se presta a la ciencia es insuficiente. Falta hacer por nuestra parte una gran labor de información. Hay que transmitir cultura científica ya que, en muchos casos, la ciencia se considera un gasto en vez de una inversión por parte de los políticos. Sin embargo, la ciencia es un motor social, que puede crear empleo y en nuestras manos está el hacer llegar esta idea a nuestros responsables políticos.

R. R.: ¿Cómo se ve desde la COSCE la situación en la que se encuentra la ciencia en España y cuál es la opinión que se tiene sobre los Presupuestos Generales de 2016?

N. M.: Todos los años la COSCE emite un informe sobre los Presupuestos Generales del Estado, que es realizado por una empresa independiente. Este informe explica las cifras que hay detrás de los presupuestos en relación a investigación y se suele tomar como documento base por los medios de comunicación. Los presupuestos para el 2016 se conocieron el 5 de agosto y al día siguiente publicamos un artículo en *El País (Materia)* sobre los mismos. En los presupuestos de 2016 se incrementa en un 0,36 % el fondo para ciencia con respecto al año anterior, se aumenta en unos 21 M€, que es una cifra muy baja. Los fondos para ciencia son escasos y nos alejan del cambio de “ladrillo por neuronas”. El presupuesto para ciencia se divide en operaciones financieras que son préstamos, y subvenciones que son los fondos para los proyectos para realizar una determinada investigación. Los préstamos de las operaciones financieras hay que devolverlos y son utilizados principalmente por empresas y algunos institutos de investigación. Cuando se da la cifra del presupuesto para ciencia se suele mencionar la cifra total, sin tener en cuenta que las operaciones financieras suelen rondar el 50 % del total, y que es dinero a devolver y que en muchas ocasiones se queda incluso sin ejecutar. El aspecto que se valora de manera positiva por COSCE de los presupuestos de 2016 es que, aunque se ha mantenido prácticamente el presupuesto para ciencia, se ha producido una

disminución en los fondos para operaciones financieras, aumentando los fondos para subvenciones. Este aspecto tendrá un efecto muy positivo para el año próximo.

R. R.: ¿Cuáles serían las acciones que se piensa realizar desde la COSCE para mostrar su descontento por la situación actual de la ciencia en España?

N. M.: Hay que tener cuidado en este aspecto porque no se trata de protestar por el hecho de protestar. Valoro las acciones en positivo, es decir, llamaremos la atención cuando se detecte un problema pero, además, trataremos de dar una solución mediante una acción o un proyecto que trate de resolverlo.

R. R.: ¿Cómo se valora desde la COSCE la tan esperada, pero que no termina de llegar, Agencia Estatal de Investigación?

N. M.: Una de las primeras reuniones que tuvimos nada más acceder a la presidencia de la COSCE fue con la actual Secretaria de Estado, Carmen Vela, para tratar, entre otros asuntos, la Agencia Estatal de Investigación. Según nos comentó en verano, la Agencia se iba a crear y ya estaba en el Ministerio de Hacienda para su aprobación. Según sus palabras se crearía en principio a coste cero. Por tanto, desde COSCE se valora positivamente la creación de la Agencia Estatal de Investigación, pero hay que esperar a ver cómo se desarrolla. La creación de esta Agencia ha sido un tema tratado por COSCE en su comisión de gestión de la ciencia y se ha llegado a la conclusión de que hay que cambiar el modelo que tenemos de ciencia. Debe ser una Agencia para controlar la ciencia por personas del ámbito de la ciencia, y, por supuesto, sujeta a todos los controles del gasto público. No por ser científicos hacemos todo bien, y hay ejemplos de mal uso de recursos como en algún parque tecnológico sin acabar, o que no se encuentre funcionando debidamente, lo que es ciertamente criticable. La Agencia debería estar desvinculada de la política y de los cambios políticos, que no dependa de la arbitrariedad del ministro que haya en cada momento. Debe crearse una Agencia estable en el tiempo que a su vez dé estabilidad al ámbito científico. Hay que conseguir tener una herramienta útil no sólo para los científicos, sino también para la sociedad. Es decir, apoyamos la idea de una Agencia subvencionada de manera estable, dirigida por gente de ciencia de manera parecida a como sucede en los países de nuestro entorno. Por ejemplo, en la actualidad las convocatorias de proyectos, becas, contratos, etc., dependen en cierto modo de la voluntad de los políticos y, especialmente,

La Agencia Estatal de Investigación debe estar desvinculada de los gobiernos, ser estable en el tiempo y que permita controlar la ciencia por científicos, estando sujeta a controles del gasto público

del Ministerio de Hacienda. Con la Agencia, conseguiríamos que existieran unos fondos ya determinados, y cuya liberación no dependiera de la voluntad de los gobiernos, sino que los plazos estuvieran marcados de manera estable en el tiempo. De esta forma eliminaríamos la arbitrariedad e incertidumbre que existe en este momento.

R. R.: ¿Qué opinión te merece como Presidente de la COSCE la relación entre el sector privado y el público en España?

N. M.: Hay científicos que consideran que no hay que “contaminarse” con fondos privados y que toda la investigación ha de hacerse con fondos públicos. Creo que eso no se ajusta a la vida real y si miramos a los países de nuestro entorno, vemos que ellos tampoco siguen esta línea. En países con más cultura científica que el nuestro, la investigación se hace también a partir de fondos privados, con presupuestos incluso mayores a veces que los obtenidos desde el sector público. La situación está cambiando en España y se va equiparando a la de estos países. Defiendo lo público, pero necesitamos que haya

un trasvase desde el sector de la ciencia al empresarial, al sector productivo. La COSCE tiene un gran interés en facilitar este proceso, de orientar en cómo debe ser esta relación. Uno de nuestros proyectos estrella es el proyecto DECIDES (DEbate sobre Ciencia y Desarrollo Económico y Social) que sustituye al proyecto CRECE, y que sienta las bases de cómo se debe gestionar la ciencia, en conjunto con el desarrollo social y económico. El proyecto CRECE se utilizó como documento base inspirador para todos aquellos temas relacionados con el ámbito de la ciencia. Buscamos conseguir ese mismo impacto con el proyecto DECIDES, y con el que COSCE quiere marcar unas líneas generales de actuación.

R. R.: El proyecto ENCIENDE es uno de los proyectos más conocidos de la COSCE, ¿va a seguir funcionando para tratar de aumentar el número de estudiantes en STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics)?

N. M.: ENCIENDE junto con DECIDES son nuestros proyectos estrella dentro de COSCE. Como comentas, tenemos el proyecto ENCIENDE (ENseñanza de las CIENCIAS en la Didáctica

Escolar) como herramienta para aumentar la vocación de los jóvenes en STEM en edades tempranas. Este proyecto se viene realizando desde hace varios años y va a seguir funcionando. Tiene como objetivo el fomentar las vocaciones científicas en la educación primaria y secundaria, porque es en esa época cuando se crean. En junio asistí a la ceremonia de entrega de los premios ENCIENDE. En ellos, se premia cualquier acción y actividad cuyo fin sea fomentar la ciencia entre los jóvenes. En ENCIENDE se trabaja con los tres pilares fundamentales para crear vocaciones que son: la familia, los colegios y los científicos. A un estudiante de primaria no hay que enseñarle que existe la ley de la gravedad sino que la tiene que descubrir por sí mismo, y hay que realizar acciones con ese objetivo.

R. R.: Podemos decir, por tanto, que existe un espíritu de continuar con la labor realizada por tus antecesores.

N. M.: Los proyectos de COSCE no son voluntad de un presidente sino que involucran a muchas sociedades y, en general, se están realizando durante bastante tiempo. Las fortalezas de la Confederación hay que mantenerlas. Mis objetivos son conseguir que la COSCE crezca, que implique a más sociedades científicas, y que tengamos más presencia social. Todo esto será señal de que hemos cumplido nuestros objetivos de llenar ese hueco que existe entre sociedad y ciencia, entre los científicos y los que nos representan en nuestras instituciones. Para realizar todas estas actuaciones, tenemos que buscar financiación. Los presidentes anteriores, Joan Guinovart y Carlos Andradás, han puesto el nivel muy alto ya que han hecho de la COSCE una organización necesaria para la ciencia de nuestro país. Yo haré lo posible para estar a su altura.

R. R.: Has sido presidente de la RSEQ y eres socio de la RSEF, ¿cómo ves el papel de la RSEF dentro de la COSCE?

N. M.: La RSEF y la RSEQ, junto con la Sociedad Española de Bioquímica y Biología Molecular son las sociedades más importantes en términos de número de socios dentro de COSCE. Por tanto, la RSEF está llamada a jugar un papel muy importante en la Confederación. La opinión de la RSEF es de las que tradicionalmente han tenido más peso y tiene dentro de la COSCE y se tienen en consideración las palabras de su actual Presidente, mi amigo Adolfo Azcárraga como gran conocedor de la política científica.

La ciencia es un motor social que ha marcado los avances sociales en los últimos dos siglos

Fe de erratas

Debido a un error de maquetación en el número 3 del volumen 29 de 2015, en el artículo “William Thomson (Lord Kelvin)” de la sección “Mi Clásico Favorito” no aparecen los pies de página 2 y 3. La versión corregida se puede encontrar en la revista on-line: www.revistadefisica.es

Hemos leído que...

Registro rápido e informal de noticias que, llegadas a nuestro consejo de redacción, hacen pensar o actuar a un físico¹

Sección coordinada por Saúl Ares

La endogamia en la universidad vuelve a aparecer en los medios, esta vez en el diario *El País*. Un artículo desentierra los correos electrónicos que un catedrático del departamento que ofertaba una plaza de ayudante doctor envió a uno de los candidatos. “Hoy me han pasado la lista definitiva de firmantes para la plaza de ayudante a doctor. Estáis tú y Enrique H. [...] En definitiva: **La plaza la hemos sacado para él**, pensando que cumple ampliamente todos los requisitos. Por eso, con el estado de ánimo que te puedes imaginar, **te rogaria que no te presentases** y dejaras el paso libre a Enrique”. El interpelado se presentó igualmente, pero la plaza finalmente se adjudicó al candidato de la casa. Historias similares han sido sufridas, o son conocidas, por muchos miembros del mundo académico, y la **escasez de plazas debido a los recortes y la tasa de reposición** no ha hecho más que acentuar el proteccionismo de algunas universidades y departamentos hacia sus candidatos. La **inexistencia de una carrera científica clara y de mecanismos de promoción interna** de quien legítimamente lo merezca son el trasfondo de estas prácticas. (*El País*, <http://bit.ly/1Lv82K0>)

Hace seis meses que el astronauta estadounidense Scott Kelly dejó literalmente este mundo para viajar a la Estación Espacial Internacional. Su objetivo: disfrutar de una estancia

de un año en este curioso “hotel” espacial. Es por ello que, para celebrar el ecuator de su epopeya, la Agencia Espacial Estadounidense ha elaborado una infografía en la que muestra una serie de datos curiosos sobre su vida en órbita. El que más ha llamado la atención es



lo que sucederá con los 81 kilos de heces que producirá su cuerpo en el espacio. Y es que, tras ser soltados al exterior de la estación espacial para deshacerse de ellos (qué mejor que guardarlos en el infinito), algunos de ellos **chocarán contra la atmósfera** y, al quemarse, **parecerán estrellas fugaces** para aquellos que los vean desde la Tierra. Con todo, la Agencia Espacial Estadounidense señala también que no debemos llevarnos a engaños, pues **“no son realmente estrellas fugaces”**. La NASA también ha explicado que la radiación que sufrirá Kelly en su año en el espacio es el equivalente a la que se recibe al viajar en avión entre Los Ángeles y Nueva York 5.250 veces, lo que ha dado lugar a un curioso error de interpretación en la fuente de este HLQ, que ha dicho que con esa radiación “se podría viajar de Los Ángeles a Nueva York 5.250 veces”. De ser así, Superman sería un piltrafilla en comparación con el astronauta Kelly... (ABC.es <http://bit.ly/1iOJKzj>), imagen: <http://bit.ly/1XdbVC>)



Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

Una mayor producción investigadora está asociada a una mayor calidad docente. Es la principal conclusión de un estudio elaborado por la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Jaume I (Castellón), en el que han participado 604 profesores universitarios entre 2002 y 2006. De hecho, según el estudio, **los que**

no investigan son cinco veces más propensos a ser los peores docentes. Los participantes procedían de 25 departamentos de las áreas de humanidades, ciencias sociales, económicas, gestión, ciencias naturales e ingenierías de la Universidad Jaume I. El estudio, publicado en *Applied Economics*, incluyó 69 variables de fuentes oficiales para medir los índices de enseñanza, tareas administrativas e investigación de los docentes. La investigación se cuantificó dando un valor a cada publicación en función de la calidad de la revista científica en la que aparece. El estudio revela que, de media, **los profesores que investigan imparten un 21,5 % más de clases que los que no lo hacen**. Además, dos tercios de los docentes podrían mejorar su enseñanza si realizaran más investigación. El trabajo también revela cómo **la investigación se puede volver en contra de la enseñanza cuando es excesiva, al consumir la mayor parte del tiempo y energía del docente**. El estudio refleja que **el Real Decreto 14/2012** —de medidas

¹ Animamos a que los lectores nos hagan llegar noticias documentadas que la redacción pueda considerar y editar para esta sección. En el twitter de la RSEF, @RSEF_ESP, se puede seguir a diario una extensión virtual de la sección, por medio de tuits con el hashtag #RSEF_HLQ. ¡Animamos a los lectores usar el hashtag y tuitear sus propios “Hemos leído que”!

urgentes de racionalización del gasto público en el ámbito educativo— **redujo la calidad educativa 0,75 puntos sobre 10, al disminuir la carga docente de los investigadores consolidados pero aumentarla en la mayoría de los profesores.** (SINC, <http://bit.ly/1LjAG0k>)

Hoy en día se presta mucha más atención en alentar a niñas y mujeres jóvenes a seguir carreras en ciencia y tecnología, y con buena razón. De acuerdo con estimaciones recientes, **menos del 25 % de los puestos de trabajo en ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas están ocupados por mujeres.** Conseguir que más mujeres se interesen por la ciencias es un objetivo que vale la pena, pero, ¿qué sucede una vez que comienzan realmente sus carreras? Un artículo reciente en la revista de la American Medical Association tiene una respuesta desalentadora. Jóvenes científicos varones empiezan su carrera con ventaja sobre las mujeres, **recibiendo en promedio más del doble de dinero de su institución para la puesta en marcha de su primer proyecto.** El estudio se centró en institutos de investigación biomédica del área de Boston. Se utilizaron datos de más de 200 investigadores procedentes de 55 centros de investigación. (*New York Magazine*, <http://sciof.us/1KbuoKZ>)

Aquí no estamos mucho mejor. **El 63 % de los españoles cree que las mujeres no sirven para ser científicas de alto nivel,** según una encuesta europea encargada por la Fundación L'Oréal que ha consultado a 1.000 ciudadanos en España. El sondeo muestra que ese porcentaje es todavía más alto si se tiene en cuenta el resto de países analizados (Francia, Alemania, Italia y Reino Unido), alcanzando el 67%. **Muchos de los encuestados opinan que a las mujeres les falta interés por la ciencia, perseverancia, espíritu racional, sentido práctico y espíritu analítico,** entre otros factores. La encuesta, con una muestra total de 5.000 europeos, constata los estereotipos. **Solo un 41 % de los ciudadanos consultados imaginan una mujer cuando se les pide que hagan el retrato robot de un científico.** Y el problema no son sólo los estereotipos,

sino las realidades: **en España, menos del 20 % de las posiciones estratégicas en laboratorios, universidades y centros de investigación están ocupadas por mujeres,** según el Informe Mujeres Investigadoras 2015 del CSIC. (*El País*, <http://bit.ly/1MIOXG6>)

En los años 60, el astrónomo Nikolai Kardashev propuso clasificar posibles **civilizaciones extraterrestres en función de su capacidad de utilizar recur-**



sos: de un planeta entero (tipo I), de una estrella (tipo II), o de una galaxia entera (tipo III). Si el método utilizado para captar energía fuese rodear las estrellas de *esferas de Dyson* (ver figura), sería de esperar que **hubiese pérdidas de energía en el rango infrarrojo, lo que permitiría identificar civilizaciones de tipo III en la escala Kardashev** buscando objetos galácticos especialmente brillantes en el infrarrojo. Esto es lo que ha hecho un estudio reciente, tomando un catálogo de este tipo de objetos y **estudiado con especial cuidado la radiación procedente de 93 objetos.** Comparada con la emisión en ondas de radio, estos objetos cumplían una regla conocida como la correlación infrarrojo-radio, que se observa en casi todas las galaxias conocidas. **La conclusión es que el alto brillo en el infrarrojo probablemente se deba a causas naturales, como nubes de polvo calentadas por regiones de formación estelar intensa.** Si existen civilizaciones de tipo III en la escala Kardashev, o son muy raras, o saben esconderse muy bien... (*Science*, <http://bit.ly/1LY8q5U>)

...y aquí es donde conviene mencionar **una entrevista reciente que Neil deGrasse Tyson,** el astrofísico y divulgador que presenta la remozada serie

Cosmos, le ha hecho en su refugio de Moscú a **Edward Snowden,** el antiguo empleado de la Agencia Nacional de Seguridad que en 2013 hizo públicos los planes de vigilancia masiva del gobierno de EE. UU. Snowden planteó que, cuando una sociedad va avanzando, poco a poco empieza a ser consciente de la “necesidad” de proteger sus comunicaciones. Esto quiere decir, según Snowden, que **“solo hay un pequeño periodo en el desarrollo de una civilización en el que se sus comunicaciones estarán desprotegidas”.**

Una vez terminado ese periodo, que por comparación con lo que ha sucedido con la humanidad duraría apenas unas décadas, cualquier comunicación extraterrestre estará tan cifrada que teóricamente sería irreconocible. “No seríamos capaces de

distinguir un mensaje alienígena de la radiación del fondo cósmico de microondas, afirmó Snowden. Si esto fuera cierto, la humanidad podría estar recibiendo comunicaciones extraterrestres sin siquiera saberlo. Claro que esto se refiere a comunicaciones, la hipótesis de Snowden no dice nada de cómo podrían civilizaciones extraterrestres camuflar otro tipo de emisiones provenientes de sus actividades. (*eldiario.es* <http://bit.ly/1LXr3ka>)

¿Necesitas publicar un artículo de investigación ya? ¿No quieres que los editores o los revisores te toquen las narices? Estás de suerte: **si pagas, hay miles de “revistas científicas” que te publicarán lo que quieras. Aunque sea una porquería.** Un nuevo estudio muestra que el negocio de estas revistas de pega está floreciendo, y lo cuantifica con números puros y duros. Sólo el año pasado, estos editores rapaces **ingresaron 75 millones de dólares y publicaron casi medio millón de artículos.** ¿De dónde han salido los datos para este trabajo? De Jeffrey Beall, bibliotecario de la Universidad de Colorado, que fue el primero en usar la expresión *editores rapaces*, y que lleva años manteniendo una base de datos online con una lista negra de estos piratas de la ciencia. **Revistas que**

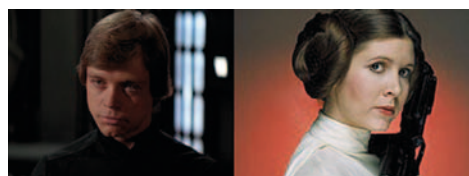
se inventan sus factores de impacto, que prometen revisiones de artículos en una semana, que publican artículos cargados de plagios hasta las cejas, y que nos cabrean a todos llenándonos el correo de spam. (*Science*, <http://bit.ly/1LQysI3>)

La NASA ha encontrado agua en Marte... otra vez. A las evidencias recién presentadas, que muestran diferencias estacionales en el paisaje que se podrían explicar por la fusión de hielos invernales que darían lugar a manchas húmedas en verano, hay que sumar multitud de anuncios a lo largo de los últimos años. En 2002, la NASA afirmaba que su sonda *Mars Odyssey* había encontrado hielo en el subsuelo marciano como para llenar dos veces el lago Michigan, y que, probablemente, se trataba solo de la punta del iceberg. En 2004, la agencia espacial de EE. UU. anunció que su rover *Opportunity* había obtenido pruebas sobre el terreno de que el agua líquida había sido abundante en el pasado de Marte, y poco después comenzaron a aparecer indicios de que también podía existir en el presente. En 2006, después de comparar imágenes tomadas durante 10 años por la sonda *Mars Global Surveyor*, encontraron barrancos nuevos que podían haber sido fruto de torrentes de agua. En 2008, el brazo robótico de la sonda *Phoenix* depositó una muestra del suelo marciano en un instrumento que identificó vapores de agua. En 2011, en imágenes procedentes de la sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* se encontraron miles de rastros oscuros que sólo aparecían durante el verano Marciano, una observación similar a la que ha salido hace poco en los medios. En 2012 el *Curiosity* captó vapor de agua al calentar a cientos de grados muestras de arena del planeta rojo. A partir de estos datos, nos permitimos hacer la predicción de que, en los años venideros, la NASA seguirá encontrando agua en Marte. (*El País*, <http://bit.ly/1P4gCAV>)

Recientemente Stephen Hawking visitó Tenerife para presentar el festival Starmus. Los periodistas de *Materia* le hicieron una entrevista, de la que reproducimos la respuesta bastante contundente (y triste) que dio a una pregunta. P. España, al igual que otros

muchos países, ha visto cómo se recorta el presupuesto para la ciencia, y muchos científicos jóvenes han tenido que emigrar para encontrar trabajo. ¿Qué le diría a un joven español que esté planteándose ser científico? R. Que se vaya a Estados Unidos. Allí valoran la ciencia porque se amortiza con tecnología. (*El País*, <http://bit.ly/1QCotUv>)

Estudiantes de la Universidad de Leicester, en el Reino Unido, acaban de publicar un estudio en el que le dan una vuelta de tuerca a la famosa paradoja de los gemelos de la teoría de la relatividad aplicándola a la pareja de mellizos más famosa de una galaxia muy, muy lejana: Luke Skywalker y la princesa Leia de *La Guerra de las Galaxias*. Aunque nacidos casi a la vez, sus viajes espaciales a velocidades cercanas a la de la luz han hecho que sus edades hayan divergido. Para calcular su diferencia de edad, se tomó como referencia el encuentro de los mellizos en la Ciudad en las Nubes que se produce durante la película *El Imperio Contraataca*. Leia llegó allí desde un sistema vecino, Anoat, mientras que Luke viaja



desde Dagobah, unas 25 veces más distante. Si además se tiene en cuenta que el *Halcón Milenario* en el que viaja Leia es más potente y rápido que el X-Wing que pilota Luke, el resultado es que Leia experimenta una dilatación temporal durante su viaje de 62,6 días, mientras que la de Luke es de 700,8 días. La conclusión es que, aunque nacidos casi a la vez, Luke es 1,75 años más joven que Leia. (University of Leicester, <http://bit.ly/1Rivdr0>)

Los de Leicester no han sido los únicos físicos que se han sentido inspirados últimamente por *El Imperio Contraataca*. Utilizando también esta película como fuente, el físico Rhett Allain ha

calculado la masa del maestro Yoda en la secuencia en la que Luke Skywalker hace el pino a una mano con Yoda encaramado a una de sus piernas (imagen). Calculando el centro de masas del sistema Luke-Yoda bajo ciertas hipótesis, se puede estimar la masa de Yoda. Las hipótesis son: que el planeta Dagobah, en el que sucede la escena, tiene una fuerza gravitatoria similar a la de la Tierra; que Luke mide 1,75 metros, pesa 68 kilos, y tiene la distribución de masa de un humano normal; que sólo hay dos



fuerzas (con minúscula) actuando: la gravedad, y el empuje del suelo sobre la mano apoyada de Luke. ¿Resultado? En esa escena la masa de Yoda es de -43,7 kilos. ¿Ein? ¿Una masa negativa?! ¡En algo nos habremos equivocado! Pero no, porque aquí es donde entran los poderes Jedi: el maestro Yoda, ¡está usando la Fuerza! En realidad, en lugar de dificultar el ejercicio de Luke, le está ayudando. ¿Estamos presenciando un método Jedi para ayudar a mejorar la confianza en uno mismo? Otra posibilidad, por supuesto, es que las hipótesis del estudio sean erróneas. En ese caso, lo más probable es que Luke esté usando la Fuerza, que es al fin y al cabo de lo que se trataba. (*Wired*, <http://wrd.cm/1LNNjIW>)

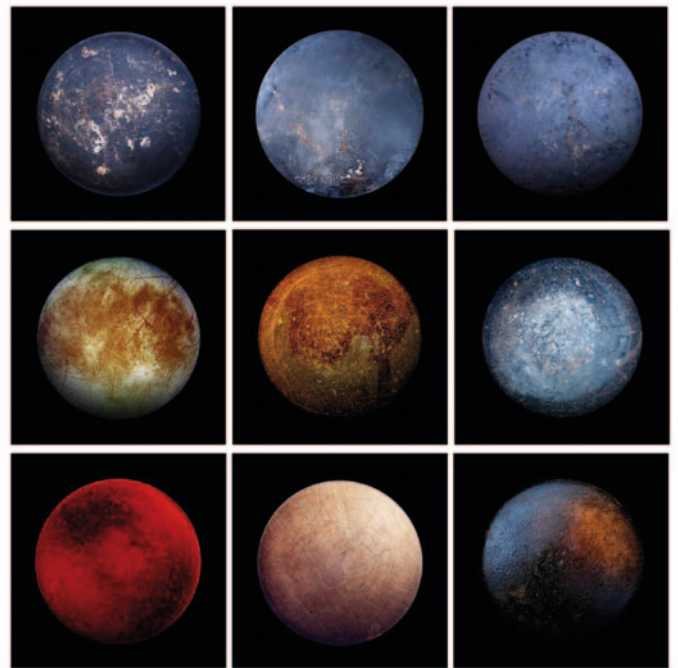
¿Estás haciendo un doctorado o te planteas hacerlo? ¿Eres director de tesis y necesitas pistas para ayudar mejor a tus estudiantes? The Times Higher Education nos ofrece una lista de 10 pasos que aseguran un doctorado catastrófico. Nosotros añadimos que es casi imposible no caer en alguno de los 10, pero mejor minimizar el número de puntos de la lista en tu propio doctorado. Los 10 puntos son: 1. Quédate a hacer la tesis en la misma universidad en la que estudiaste el grado. 2. Haz la tesis sin cobrar por ello ("nunca hagas gratis

el trabajo por el que a otro le paguen, joven Padawan”, fue el consejo de uno de mis propios maestros Jedi). 3. Utiliza como criterio para elegir a **tu director de tesis el que parezca guay y molón**. (Por supuesto, esta regla no se aplica a los editores de esta revista). 4. **Espera que te lleven de la manita**. 5. **Concéntrate únicamente en tu tesis**. Tener una vida está sobrevalorado. 6. **Cuenta con que tu familia y amigos vayan a entender** todas las dificultades que irán surgiendo. 7. **Haz tu investigación cubriendo todos los ángulos** y usando todas las metodologías posibles. A la vez. 8. **Dale caña a tu audiencia**: escribe artículos y da charlas llenos de la jerga de tu subcampo particular. Utiliza frases largas y complejas que demuestren lo inteligente que eres. 9. **Ten la piel fina**: a la mínima que te pinchen, salta, llora o patalea. 10. **Ten una relación sentimental con alguno de tus jefes o profesores**. (The Times Higher Education, <http://bit.ly/1jwH3TY>)

La revista *Science* ha publicado recientemente el mayor trabajo conjunto para **replicar estudios científicos en psicología**. Un grupo de 270 investigadores de todo el mundo intentó repetir los resultados de 100 artículos relevantes en la materia. **Pese a contar con la colaboración de los propios autores** para conocer su metodología y las condiciones en las que obtuvieron sus resultados, **sólo fue posible obtenerlos de nuevo en un 39 % de los casos**. En algunos casos, los resultados obtenidos fueron los contrarios a los de la investigación de referencia. Según comentan los autores del trabajo, que no fuese posible replicar los resultados de un estudio no significa necesariamente que sean erróneos, pero es una señal de que se han de realizar cambios para facilitar que se pueda hacer. En un artículo que también aparece en *Science*, el biólogo y periodista John Bohannon, especializado en cuestionar los controles de calidad a los que se so-

meten los artículos científicos, afirma que **“estos resultados apoyan la idea de que los científicos y los editores de las revistas científicas están sesgados —conscientemente o no— en lo que publican”**. Además, señala que, incluso en los artículos que pudieron ser replicados, los efectos observados eran mucho menos claros que en los experimentos originales. Aunque la psicología es un campo especialmente polémico, problemas similares se han detectado también en otros campos. ¿Qué ocurriría si se hiciese un estudio similar en física? ¿Dónde ponemos algunos experimentos de grandes colaboraciones, que, directamente, no se puede intentar replicar? (*El País*, <http://bit.ly/1UgQLoo>)

El pasado 1 de noviembre tuvo lugar el estreno en Madrid del nuevo espectáculo de The Big Van Theory, en el que un grupo de científicos realiza monólogos que combinan humor y ciencia. Los monólogos a menudo divulgan la investigación en la que el propio monologuista está involucrado. Otros tratan temas de interés general del campo en el que trabaja el artista-científico. Hay para todos los gustos: biólogos, matemáticos, químicos... y por supuesto físicos. En sus actuaciones, junto a la divulgación y el entretenimiento, late a menudo una vena crítica con la situación de la ciencia, sobre todo al nivel de los investigadores en las primeras etapas de su carrera. La iniciativa surgió de los finalistas españoles en la edición



2013 del concurso internacional FameLab, donde los participantes tienen 3 minutos para dar una charla científica que inspire, enseñe, y entretenga. Desde entonces The Big Van Theory ha sido identificada entre las 100 iniciativas más innovadoras a nivel global en el campo de las ciencias y tecnologías. Tras la asistencia al evento, aprovechamos esta ocasión para recomendar a nuestros lectores asistir a alguno de sus espectáculos cuando actúen cerca de su localidad. Toda la información sobre sus actuaciones está en su web: <http://www.thebigvantheory.com>

En el número anterior os desafiamos a descubrir, entre las siguientes fotos de **sartenes usadas, cuál era una foto de Europa, la luna de Júpiter**. Ahora os damos la respuesta: **es la primera por la izquierda de la fila central**. Enhorabuena a todas las que habéis acertado, y gracias a todos los que habéis participado enviándonos vuestras respuestas por twitter a @RSEF_ESP. (@NASAEuropa, <http://bit.ly/1NJ9ide>)

La Física según nuestros autores



El mundo después de la revolución La física de la segunda mitad del siglo xx

José M. Sánchez Ron

Pasado & Presente, Barcelona, 2014

524 páginas

(Premio Nacional de Ensayo 2015)

El autor de este libro apenas necesita ser presentado a los lectores de la REF. La obra de José Manuel Sánchez Ron, catedrático de Historia de la Ciencia de la UAM, miembro de la Real Academia Española, miembro correspondiente de la *Académie Internationale d'Histoire des Sciences* de París y de algunas otras instituciones científicas, es bastante bien conocida por la mayoría de los físicos españoles. No en vano es físico de origen y autor en su juventud de unos cuantos trabajos de *hard physics*, en particular en el campo de la mecánica relativista. Su primer libro, *Origen y desarrollo de la teoría de la relatividad*, Alianza Editorial, Madrid (1983), es, en mi opinión, uno de los mejores libros que se hayan escrito (y yo conozca) sobre este tema, no ya en español, sino en cualquier idioma. Desde entonces y hasta la fecha, ya dedicado de lleno a la historia de la física, ha publicado un buen número de libros y artículos en este campo. Su análisis histórico-crítico de la física contemporánea se completó en parte con el libro *Historia de la Física Cuántica. El periodo fundacional (1860-1926)*, vol. I, Crítica, Barcelona (2001). Me consta que muchos lectores de este libro están (estamos) esperando la segunda parte, es decir, de 1926 hasta ahora, que completaría finalmente dicho análisis, aunque es comprensible la demora dada la gran cantidad de estudios y proyectos en que se ha embarcado Sánchez Ron en los últimos años.

El libro objeto de esta reseña llena de alguna manera el hueco que acaba de mencionarse. En *El mundo después de la revolución* se presenta un profundo y bastante detallado análisis histórico de la evolución de la física desde el final de la segunda guerra mundial hasta el presente. Y al decir “la física” me refiero no sólo a la llamada “física fundamental” sino que se tratan con cierta extensión las aplicaciones de la física que han contribuido apreciablemente a configurar el mundo en que vivimos. En la introducción se explica lo de “revolución”, aclarando que se trata de la revolución (o revoluciones) que afectaron a la física “clásica” a principios del siglo xx, principalmente la teoría de la relatividad (especial y general) y la mecánica cuántica.

Fiel a su entendimiento de la historia de la física, el autor analiza el desarrollo de esta en la segunda mitad del siglo pasado no sólo desde un punto de vista puramente “internalista”, sino que también completa este análisis exponiendo las implicaciones socio-económicas, culturales e incluso filosóficas de dicho desarrollo. El libro consta de la introducción, en donde se expone su motivación y objetivo, y cuatro amplios capítulos: “Revoluciones en la física (primera mitad del siglo xx)”, “Gravitación y universo”, “El mundo cuántico”, “Y la física cambió el mundo”.

El primer capítulo muestra los aspectos esenciales del desarrollo de la física en la primera mitad del pasado siglo, época en la que se produjo la revolución científica del título. Es como una especie de introducción ampliada que da paso al tema principal de la obra: el análisis del desarrollo tanto teórico como experimental de la física en la segunda mitad del siglo pasado y las implicaciones tecnológicas y socio-económicas del mismo. Se pasa en este primer capítulo revista a los aspectos fundamentales de la teoría de la relatividad, especial y general, haciendo énfasis en sus consecuencias para la cosmología, disciplina que se hizo científica gracias en parte a la aplicación de estas teorías, en particular de la relatividad general, y también en gran parte al gran progreso en los métodos observacionales, en particular la construcción de potentes telescopios (algo muy bien expuesto en el libro), lo que permitió a Hubble llegar a su famosa ley de la expansión del universo en torno a 1930. Es de una especie de conjunción de estas observaciones

astronómicas y de la relatividad general (ecuaciones de Einstein) como surgen los primeros modelos cosmológicos serios, en particular “el átomo primordial” del sacerdote y físico teórico belga Georges Lemaître, verdadero precursor del modelo del Big Bang. Todo esto y más se detalla claramente en este primer capítulo, que se completa con la exposición del origen y primeras etapas de la “revolución cuántica”, desde Planck (1900) a la creación de la Electrodinámica Cuántica en la década de 1940, pasando por la asombrosa predicción de las antipartículas a partir de la ecuación “cuántico-relativista” de Dirac en 1928 y su primera confirmación por Anderson *et al.* al descubrir el positrón (o antielectrón) en 1932. Aunque parte de lo expuesto ahí es quizá bien conocido, se muestran además aspectos muy interesantes de las dos “revoluciones” probablemente menos conocidos para los físicos en general. Por ejemplo, lo expuesto en el apartado “Relatividad y Filosofía” o en “La revolución cuántica se extiende a la química”, así como en algunos otros que el lector seguramente descubrirá.

El segundo capítulo entra ya de lleno en la física posterior a la segunda guerra mundial. En él se pasa revista al desarrollo en este periodo de los temas relacionados con la primera de las revoluciones, la relativista, en particular de la teoría de la gravitación y de la cosmología (el título de este capítulo es “Gravitación y Universo”). Es en mi opinión una exposición muy completa de los avances teóricos fundamentales y de su íntima relación con el progreso tecnológico. Debe destacarse en este sentido la descripción bastante detallada del nacimiento y desarrollo de la radioastronomía, así como el incisivo análisis de la estrecha relación entre este desarrollo y las necesidades militares, sobre todo en los EE. UU., pero también en la Europa occidental y en la antigua URSS.

Es prácticamente imposible en el espacio —razonable— de una reseña comentar todos los temas tratados en el libro relacionados con la gravitación, la astrofísica y la cosmología, en realidad prácticamente todos los de relevancia en estos campos, así que me limitaré a comentar uno de ellos, tal vez no demasiado conocido (salvo por los expertos, claro) y muy bien descrito en el libro: me refiero a la disputa cosmológica en los años cincuenta y sesenta entre el modelo del Big Bang y el del estado estaciona-

rio. Este último fue desarrollado a partir del final de los años cuarenta por Fred Hoyle, Hermann Bondi y Thomas Gold y en esencia se basa en aceptar completamente el llamado “principio cosmológico perfecto”, que postula la homogeneidad espacio-temporal del universo (a gran escala), y por lo tanto negar la existencia de un instante singular en que se produciría la creación del universo. Esto se halla en evidente contraposición a la teoría o modelo del Big Bang. Pero como la expansión del universo era un hecho observacional innegable, el “trío estacionario” hubo de postular la existencia de un proceso de creación continua de materia, eso sí, a un ritmo absolutamente inobservable en la práctica, en media unos $10^{-43} \text{ g.cm}^{-3}.\text{s}^{-1}$. Este hecho, la creación continua de materia, era lo que para muchos hacía el modelo estacionario poco atractivo. Sin embargo, Hoyle respondía a las críticas diciendo que por qué tendría que ser más creíble la creación de golpe (Big Bang) que la creación continua, en lo que no le faltaba razón. No obstante, la polémica finalizó prácticamente con el descubrimiento, en 1964, por Penzias y Wilson de la radiación de fondo cósmico, algo difícil, si no imposible, de explicar en el modelo de estado estacionario. Pero lo que deseo comentar va más bien en el sentido de lo puntualizado en el libro: antes de 1964 no había ninguna razón poderosa para descartar por las buenas el estado estacionario. En este sentido me parece muy a propósito lo expresado en la página 127:

Más de sesenta años después de que Bondi, Gold y Hoyle pensasen en semejantes términos [...] y ya con la cosmología del Big Bang firmemente establecida, puede resultar difícil entender las afirmaciones de Bondi [sobre la motivación de su modelo], pero no darse cuenta de que efectivamente era razonable pensar así no es sino una manifestación más de uno de los grandes pecados que se pueden cometer al intentar reconstruir el pasado: llevar a tiempos pretéritos las ideas y conocimientos que ahora poseemos. La idea de la cosmología del estado estacionario no era absurda —no más que aceptar la idea de que existió un momento en que se “creó” el Universo— resolvía algunos problemas [...] y fue aceptada por muchos.

Totalmente de acuerdo. Algo análogo sucede con las teorías y modelos del éter electromagnético de finales del XIX (Maxwell, Lorentz...), que en su momento no eran ideas descabelladas, como suelen presentarse a veces en los cursos universitarios por el mismo motivo (o “pecado”) que el expuesto en las líneas de arriba, sino la única manera, entonces razonable, de salvar la concepción mecanicista de la física. Luego vinieron Michelson y —sobre todo— Einstein y el éter, lógicamente, pasó a mejor vida, como también pasó hace cincuenta años la cosmología del estado estacionario, por cierto defendida con algunas modificaciones por Hoyle hasta el final de su vida (pero es que Hoyle era tan gran físico como gran testarudo).

El capítulo tercero lleva por título “El mundo cuántico”. Una parte considerable de él se dedica a la física de las altas energías o de las partículas elementales, que es quizá la rama más representativa del progreso de la física fundamental en la segunda mitad del siglo XX. Pero también se presentan cuidadosos análisis históricos de otras ramas de la física que tuvieron un destacado progreso en este periodo: la física de la materia condensada, la física de fluidos, la óptica cuántica..., acabando con una sección titulada “Hijos de la física cuántica: ciencia y tecnología en el mundo cuántico”, en el que se detalla la génesis y evolución de algunas de las espectaculares aplicaciones de la física cuántica, desde el transistor hasta los avances más recientes en nanotecnología, sin olvidar el láser, la superconductividad e incluso la microscopía electrónica y el microscopio de efecto túnel.

Análogamente al caso de la gravitación y cosmología, resulta una tarea prácticamente imposible comentar con un mínimo detalle todos los temas tratados en este capítulo. En el aspecto experimental citaré únicamente la excelente exposición histórica de la creación y desarrollo de los grandes laboratorios y centros de investigación de altas energías, SLAC, Fermilab y sobre todo el CERN, y su íntima relación, especialmente en el caso norteamericano, con el complejo militar-industrial (sin que por supuesto esto quiera decir que las investigaciones de estos centros tuvieran —y tengan— en sí mismas fines militares). En el aspecto teórico, me limitaré a comentar dos de los temas tratados en el libro. El primero es el descubrimiento

de las simetrías “abstractas”, en particular la llamada invariancia gauge, y su gran importancia, no sólo por su conservación sino a veces aún más por su ruptura, en el descubrimiento de las leyes que rigen el mundo de las partículas elementales. En el caso de la violación de la simetría bajo inversión espacial (“paridad”) en la interacción débil, tratada con cierto detalle en el libro, deseo resaltar un fragmento de una carta —que yo no conocía— de Wolfgang Pauli a Victor Weisskopf, de enero de 1957, reproducido en la página 304 del libro:

Lo que me sorprende no es el hecho de que “Dios es zurdo”, sino el hecho de que a pesar de esto Él se muestra a Sí Mismo como simétrico derecha-izquierda cuando Él se manifiesta fuertemente. En resumen, el verdadero problema es por qué la interacción fuerte es simétrica derecha/izquierda. ¿Cómo puede la fuerza de una interacción producir o crear grupos de simetría, invariancias o leyes de simetría? Esta pregunta me condujo a una respuesta prematura y equivocada.

La respuesta a la que se refiere Pauli era su afirmación de la conservación estricta de la paridad, hecha antes del experimento de madame Wu *et al.* en el que se demostraba la violación de esta simetría. Parece ser que llegó incluso a apostar contra Lee y Yang sobre esto (apuesta que perdería, claro). En cualquier caso, la pregunta de Pauli era a la vez incisiva y perturbadora, y de hecho aún no tiene una respuesta en puridad totalmente satisfactoria (no es lo mismo el cómo que el porqué), pero discutir esto nos llevaría más allá del alcance de una reseña.

En este capítulo se dedican también unas cuantas páginas a la cuestión de algunos aspectos fundamentales de la mecánica cuántica, en particular al entrelazamiento cuántico y sus novedosas aplicaciones: criptografía, teleportación y (posibles) ordenadores cuánticos. Debo decir que lo único que me parece algo menos logrado en el libro es la discusión de la llamada “paradoja EPR” (de Einstein, Podolsky y Rosen), seguramente bien conocida por gran parte de los lectores de esta revista. No es que se diga nada incorrecto, pero creo que la exposición de la paradoja (realmente teorema) EPR resulta un poco

confusa, debido quizás a las limitaciones de espacio en un libro ya bastante extenso. No obstante, las aplicaciones del entrelazamiento (así como el tratamiento de la interpretación de los muchos universos que se hace después) se exponen con claridad, aportándose interesante y bien documentada información.

El último capítulo del libro lleva el expresivo título de “Y la física cambió el mundo”. En efecto, de eso va este capítulo, oportunamente encabezado por una cita de un párrafo del libro de Ortega y Gasset *El tema de nuestro tiempo* (1923):

Nuestra generación, si no quiere quedar a espaldas de su propio destino, tiene que orientarse en los caracteres generales de la ciencia que hoy se hace, en vez de fijarse en la política del presente, que es toda ella anacrónica y mera resonancia de una sensibilidad fenecida. De lo que hoy se empieza a pensar depende lo que mañana se vivirá en las plazuelas

En este capítulo se muestra una amplia gama de aplicaciones de la física contemporánea que han tenido un fuerte impacto en la sociedad actual cambiando de alguna manera el mundo. Siguiendo la línea directriz de la obra, se analizan desde un punto de vista histórico, y a veces también crítico, el origen y desarrollo de estas aplicaciones: Informática y todas sus secuelas, energía y medicina nucleares, la física en las ciencias de la vida y su influencia en la biología y bioquímica actuales, y algunas otras, finalizando, un poco como curiosidad, con el apartado “La física y la extinción de los dinosaurios”, protagonizado por el gran físico experi-

mental nuclear y de altas energías Luis W. Álvarez, premio Nobel de Física en 1968 (de origen español, lo era su padre, dicho sea de paso), quien fue el principal proponente de la idea, a la que se llegó empleando sobre todo métodos de la física nuclear y la geoquímica, de que dicha extinción fue debida a la colisión de un asteroide de unos 10 km de diámetro con la tierra hace unos 65 millones de años, idea hoy ampliamente aceptada por la comunidad científica.

Es también digno de resaltarse el buen número de notas a pie contenidas en el libro. Como ocurre en todas las obras de Sánchez Ron, o al menos en las que yo conozco, estas notas no se incluyen para apabullar al lector con la erudición del autor (al contrario de lo que ocurre en otras muchas obras de temas históricos o relacionados), sino que son complementarias o aclarativas de lo expuesto en el texto principal. Lo mismo ocurre con la excelente y útil bibliografía, detallada pero en absoluto superflua.

A riesgo de ser algo repetitivo, deseo remarcar el espíritu humanista que impregna este libro; en él se enfoca la ciencia, en particular la física, haciendo énfasis en sus repercusiones sociales, económicas e incluso políticas. Y en relación con el aspecto humano de la física, querría resaltar algo seguramente secundario en el libro, pero que a mí me ha impresionado. El final del primer capítulo está dedicado a Richard Feynman, sin duda uno de los físicos más brillantes del siglo pasado y a quien en el libro se considera “puente de unión entre las dos mitades del siglo xx”. Como colofón de este capítulo, se reproduce una carta de Feynman a uno de sus antiguos estudiantes de docto-

rado en respuesta a la que este le escribió felicitándole por el premio Nobel de Física de 1965. Parece ser que en su carta el antiguo estudiante manifestaba cierta tristeza y desilusión por no haber conseguido logros importantes en la investigación (habiendo tenido el maestro que tuvo). Feynman le consolaba diciendo que quizá no le había dirigido bien y le hubiera hecho abordar temas demasiado difíciles y complicados. No puedo reproducir en su totalidad esta carta por ser demasiado extensa para esta reseña, así que me limitaré a entresacar algunas líneas de ella:

Ningún problema es demasiado pequeño o demasiado trivial si realmente podemos hacer algo con él. [...] Dice usted que es un hombre anónimo. No lo es ni para su mujer ni para su hijo. Tampoco lo será para sus colegas inmediatos si puede responder a sus sencillas preguntas cuando entren en su despacho. [...] Conozca su lugar en el mundo y valórese, no en términos de los ingenuos ideales de su juventud, no en términos de lo que usted imaginó erróneamente que son los ideales de su profesor.

El capítulo acaba así: La cita de esta entrañable carta, que nos muestra que la ciencia, que los científicos, no están, no deben estar al margen de todo aquello que llamamos “humano”, es una buena forma de terminar este capítulo.

Y esta reseña.

José L. Sánchez Gómez
Catedrático emérito de Física Teórica,
UAM



Mecánica cuántica

Salvador Miret Artés

CSIC/Los libros de la Catarata, 2015

Colección ¿Qué sabemos de?

126 páginas

ISBN (CSIC) 978-84-00-09920-6

ISBN (Catarata): 978-84-9097-018-8

Quien haya visto la película (o leído el libro) *El León, La Bruja y el Armario* seguramente recuerda la escena donde Lucy accede al fantástico mundo de Narnia tras meterse en un armario. La cubierta de *Mecánica Cuántica* recuerda mucho al portal de Narnia: al igual que en esa

entrega de la saga de C. S. Lewis, desde el pórtico vemos un bosque nevado y una misteriosa farola encendida... Sin embargo, esta vez no nos espera un fauno, sino un gato. Además, si observamos con detenimiento, el gato acaba de *atravesar* la farola, ya que en su desplazamiento sus patas han dejado huellas a ambos lados del obstáculo. Ciertamente, las leyes del mundo cuántico parecen ser bien distintas a las de nuestra vida cotidiana. Así nos invita Salvador Miret —investigador del CSIC en el Instituto de Física Fundamental— a conocer esta nueva obra de la colección de divulga-

ción ¿Qué sabemos de?, editada por el CSIC y Los Libros de la Catarata.

Escribir “para todos los públicos” sobre la mecánica cuántica es un gran reto, en primer lugar, por la extensión de la materia. Parece una tarea imposible condensar en un pequeño libro (126 páginas) más de un siglo en la historia de una teoría tan fundamental en la física actual. Pero la razón principal estriba en que los electrones, átomos y otros entes microscópicos se comportan de manera muy extraña, tan extraña que es difícil hacerse una “imagen mental” de sus movimientos, y por tanto, nos cuesta *poner nombre* a esos movimientos. En este sentido, muchos estarán de acuerdo en que el mayor escollo de la mecánica cuántica no radica en sus matemáticas (por muy costosos que sean los cálculos en la práctica), sino en la interpretación de sus ecuaciones, sobre la que aún no se ha alcanzado un consenso completo. Nuestro autor también menciona en su “Carta abierta al lector” que ya existen muchos libros de este tipo y, por tanto, es complicado justificar la escritura de uno nuevo. Sin embargo, Salvador Miret ha conseguido elaborar su particular “Narnia Cuántica” al aportar su personalidad y su propia experiencia investigadora a esta empresa.

El autor nos propone un veloz viaje por el mundo cuántico, siguiendo aproximadamente su desarrollo histórico y deteniéndose únicamente en los conceptos básicos y en los grandes debates sobre su interpretación. Para empezar, nuestro especial guía turísti-

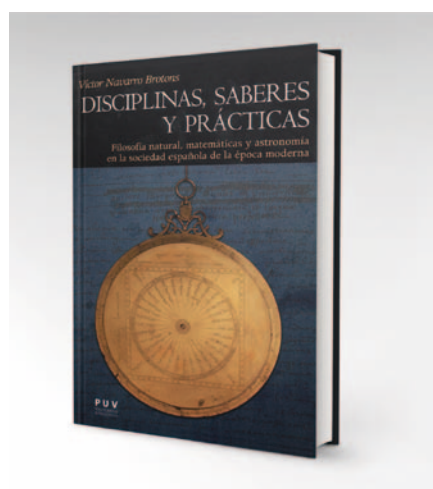
co nos ayuda a preparar bien el equipaje (Capítulo 1) recordando los conceptos de *partícula* y de *onda*, sus *propiedades* y *leyes de movimiento*. Claramente, los objetos de nuestra realidad común son, o bien partículas (una piedra, un corcho), o bien ondas (las olas del mar, el sonido). Lo que hicieron los creadores de la nueva mecánica fue proponer que los objetos microscópicos son ondas y partículas *a la vez*. En el Capítulo 2 conoceremos los fundamentos de esta doctrina, con la que se han conseguido acuerdos extremadamente precisos con diferentes experimentos y, a su vez, ha sido la base de las nuevas tecnologías de los últimos cincuenta años. No obstante, la paradoja está servida: quien alegue entender bien la dualidad onda-corpúsculo que tire la primera piedra (¡o la primera onda-piedra!).

Lo más sorprendente del viaje sucede cuando los de “este mundo” interactuamos con esos habitantes microscópicos, es decir, cuando con nuestros aparatos *medimos* sus propiedades (Capítulo 3). Según nos explica el autor, el gato cuántico está medio vivo y medio muerto a la vez (superposición lineal de estados), pero simplemente acariciarlo (medirlo) supone estrangularlo... o resucitarlo. Esta y otras paradojas ilustrarán el problema de la medida en mecánica cuántica. Lo más interesante y esperanzador en este ámbito es que se están llevando a cabo experimentos que incluyen “medidas débiles” donde no se produce el colapso de la función de onda. Siguiendo

con la metáfora anterior, estamos aprendiendo a acariciar al gato cuántico, sin que nuestra intervención destruya su estado de superposición de vida y muerte. Con estos recientes avances, la pregunta “¿Es *real* la función de onda cuántica?” está adquiriendo una validez renovada (Capítulo 4). En este punto, Salvador cita muy oportunamente a Michael Ende, el autor de *La Historia Interminable*: “Para encontrar la realidad hay que [...] darle la espalda y pasar por lo fantástico”.

Mecánica Cuántica está escrita de forma tremendamente amena, poniendo mucho mimo en la explicación de los conceptos y, por cierto, con gran sentido del humor. Se aconseja a cualquier persona interesada (incluyendo jóvenes estudiantes), con el aviso de que el lector no debería pretender “entenderlo todo” ni abrumarse con la terminología: se trata de un primer viaje del que seguro quedará un poso de conocimiento, que podrá ampliar con algunas de las recomendaciones de la bibliografía. También se puede recomendar a los más “profesionales” (incluyendo los propios *usuarios* de la mecánica cuántica) para volver a experimentar la perplejidad ante esta teoría. Si se me permite, quizás la condición óptima para emprender este viaje sea poseer una dualidad “adulto-niño”: mantener la capacidad crítica sin perder la capacidad de sorpresa.

Marta I. Hernández
Instituto de Física Fundamental
(CSIC)



Disciplinas, Saberes y Prácticas

Víctor Navarro Brotóns

Publicaciones de la Universidad de Valencia, 2014
496 páginas

El Servicio de Publicaciones de la Universidad de Valencia ha tenido la excelente idea de reunir en un volumen único diversos trabajos del Prof. Navarro Brotóns que hasta ahora eran difícilmente accesibles, o bien porque estaban en actas de congresos u obras colectivas de pequeña tirada, o bien porque estaban en idiomas distintos del castellano. El profesor Navarro Brotóns es, sin duda, uno de los investigadores actuales más conocidos y reputados en Historia de la Ciencia en España, en particular de las ciencias físico-matemáticas en los siglos XVI y XVII. Doctor en Ciencias Físicas y catedrático de Historia de la Ciencia de la Universidad de Valencia. Ha publicado 26 libros (como autor, coautor o editor) y varios cientos de trabajos, incluyendo artículos en revistas científicas o de divulgación y en prensa, capítulos de

libros, reseñas o entradas en diccionarios y enciclopedias, etc.

En el libro que comentamos, cada una de las contribuciones recopiladas se recoge en forma de un capítulo. Los textos han sido actualizados, revisados y/o traducidos por el propio autor. A pesar de la procedencia diversa, el resultado es bastante homogéneo. Los distintos capítulos se han ordenado de forma más o menos cronológica y leyéndolo desde el principio hasta el final se obtiene, con muy pocas repeticiones, una visión relativamente completa (con matices), erudita y bien documentada de la filosofía natural, las matemáticas y la astronomía en los Reinos Hispánicos de la Edad Moderna.

Tras un capítulo introductorio centrado en aspectos historiográficos, hay una primera parte que se refiere al siglo

xvi y principios del xvii. Es la parte más importante del libro y comprende hasta doce capítulos y casi 300 páginas. Se tratan, por ejemplo: Las primeras obras, desde 1480, de contenido científico impresas en España (Capítulo II). La enseñanza de la ciencia en las universidades españolas (Salamanca, Complutense y Valencia) con semblanzas de todos los catedráticos conocidos y comentarios sobre las obras que de ellos se conservan (Capítulos III y IV). Aquí, como en el resto del libro, ciencia significa, en terminología de la época, filosofía natural, matemáticas y astronomía. El Capítulo V se centra en la recepción de Copérnico en España, con especial mención del caso Diego Zúñiga que algunos consideran precedente del caso Galileo, salvando todas las distancias. Los Capítulos VI y VII consideran aspectos relacionados con lo que hoy sería mecánica: construcción de *ingenios*, movimiento de proyectiles, cálculos arquitectónicos, etc. También, por supuesto, un espacio muy importante se dedica a la astronomía, la cosmografía y el arte de navegar, con especial mención a las actividades desarrolladas alrededor de la Casa de Contratación Sevillana (Capítulos VIII-XI). Termina esta primera parte con dos capítulos más específicos, uno relativo a las relaciones con los Países Bajos (que por entonces eran territorios gobernados por la monarquía hispánica) y otro a las observaciones de novas, supernovas y cometas (y las predicciones astrológicas asociadas).

A lo largo de los diversos capítulos que conforman esta primera parte se encuentran referencias a los científicos

españoles más destacados de la época. Principalmente Jerónimo Muñoz, sobre quien el Prof. Navarro Brotóns es el experto más reputado. Pero también Pedro Nunes (durante gran parte de este periodo Portugal también estuvo gobernado por la monarquía hispánica) Pedro Medina, Rodrigo Zamorano, García de Céspedes, Juan Cedillo, etc.

La segunda parte del libro que comentamos comprende cinco capítulos y unas 100 páginas y se centra en el siglo xvii. En ella se trata de los profesores de ciencias asociados al Colegio Imperial de Madrid (Capítulo XIV) La recepción de Galileo en España, con sus novedades en mecánica y astronomía (Capítulos XV y XVI). Se completa esta segunda parte con dos capítulos más específicos. Uno dedicado a la polémica surgida en México en torno al cometa de 1680 y sus conexiones con la crisis de la astrología. Otro a los llamados “novatores”, que renovaron las enseñanzas y prácticas científicas en la Valencia de la segunda mitad del xvii.

Aún hay una tercera parte en el libro, que se refiere al siglo xviii, pero contiene un único capítulo sobre la actividad científica de algunos clérigos jesuitas. El libro se completa con: Un catálogo de fuentes impresas, que incluye los libros antiguos que se han citado a lo largo de la obra. Una bibliografía, que contiene todas las referencias eruditas citadas. Y un índice onomástico, que resulta muy útil para localizar en el texto los sitios en los que se menciona a un personaje concreto, ya sea histórico o reciente.

Es obvio que el texto que comentamos no está concebido como una monografía exhaustiva. La extensión y el detalle con el que se tratan diversas épocas históricas o distintos personajes son muy variados. Ello es debido principalmente al propio origen de la obra, a partir de una colección de artículos, lo que hace que se reflejen con más intensidad los gustos e intereses del autor. A pesar de ello, y en particular en lo referente al periodo 1550-1650, el nuevo libro del Prof. Navarro-Brotóns resulta un excelente resumen de la actividad que hoy calificaríamos de científica, y que se desarrolló por entonces en los diversos Reinos de la monarquía hispánica. Para los lectores simplemente interesados o curiosos, este libro resulta una lectura amena de la que se puede obtener una estupenda visión de conjunto, más allá de tópicos y lugares comunes. Para un lector más profesional, este libro puede representar una introducción fantástica a algunos temas más particulares, y una auténtica mina de información, ya que todos los datos históricos que se exponen están convenientemente referenciados. También puede servir como ejemplo de la forma de hacer y de escribir profesionalmente sobre la Historia de la Ciencia en España. El libro está muy bien escrito y se lee con gusto. En mi opinión, es de lectura obligada para cualquier persona con un interés serio en la ciencia española a lo largo de la historia.

José M. Ortiz de Zárate
Universidad Complutense

SCTE 2016

20th International Conference on Solid Compounds of Transition Elements

April 11th - 15th, 2016 - Zaragoza (SPAIN)



CSIC
Consejo Superior de Investigaciones Científicas



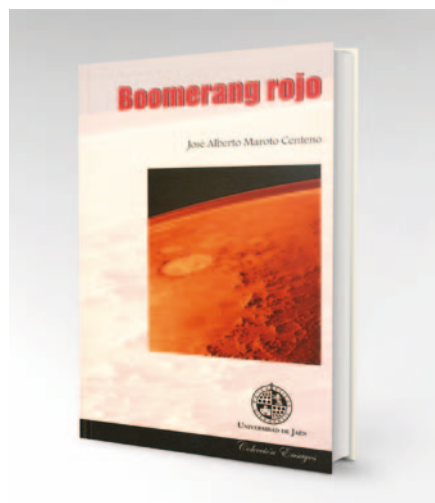
icma
Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón



Universidad Zaragoza



Reseñas de libros de interés



Boomerang Rojo

José Alberto Maroto Centeno

Universidad de Jaén, 2014

150 páginas

ISBN: 978-84-8439-828-8

La existencia de agua en Marte y su posible colonización en el futuro son temas que acaparan la actualidad de los medios de comunicación. Sin ir más lejos, la NASA consiguió que en el verano de 2012, el robot *Curiosity* se posara con éxi-

to sobre la superficie de Marte. La exploración robotizada del *planeta rojo* forma parte de la misión *Mars Science Laboratory* que tiene como principales objetivos la toma de muestras de la superficie del planeta y una labor de documentación gráfica a través de fotografías y vídeos de aquellas zonas por donde el robot se pasea. Desde entonces, es habitual ver cómo en las noticias de televisión y de diarios de prensa se hace alusión a dicha misión bajo atractivos titulares del tipo: “El *Curiosity* demuestra que pudo haber vida en Marte”, “La baja radiación abre las puertas de Marte a la humanidad”, por poner algunos ejemplos. En este contexto, el autor realiza una excelente obra de *ciencia y ficción* centrada en una hipotética misión a Marte que nos sitúa en el planeta rojo en el año 2032. Y digo que se trata de una obra de ciencia y ficción porque, además de tratarse de una entretenida novela de ciencia ficción, la formación física y divulgadora del autor le permite complementar la trama con cuestiones y problemas de física relacionadas con las condiciones que los protagonistas experimentan a lo largo de sus

aventuras. De esta forma, el autor propone que el libro pueda usarse como una herramienta didáctica dirigida al profesorado de asignaturas de Física en los primeros cursos de grados de Ciencia e Ingeniería. El reto es enorme pues, como el propio autor reconoce, la Física es una de las disciplinas más temidas y menos valoradas por los estudiantes de titulaciones científico-técnicas. De esta forma, el autor opina con acierto que una novela breve en un tema de tan rabiosa actualidad, en donde las cuestiones de física se plantean de manera complementaria a la lectura y comprensión de la obra, es una manera eficaz de hacer de la Física una materia más atractiva para los estudiantes. Así, además de aprender física, los lectores pueden adquirir un espíritu crítico que les haga comprender mejor las noticias de divulgación relacionadas con el tema y que en muchos casos están descritos con una importante falta de rigor científico.

Alberto Martín Molina

Departamento de Física Aplicada,
Universidad de Granada



Premio Nacional de Ensayo 2015

Semblanza de José Manuel Sánchez Ron. La pasión tranquila

Escribamos mientras tengamos tiempo, evitemos así que nos devore el invierno del olvido, podría ser su lema.

La escritura convertida en pasión. No optó por gastar su tiempo, dedicándose a navegar en las ensoñaciones del escapismo, o intentando abrirse paso en la política del Estado. Prefirió escribir de lo suyo, de lo que conoce bien. Físico de formación, historiador de vocación, escritor por pasión. La escritura concebida como una carrera de vida, que se pregunta una y otra vez por el significado de la ciencia para su sociedad, la nuestra, la de todos. Celebra hoy un reconocimiento público al recibir el Premio Nacional de Ensayo del año 2015 por la publicación de la obra *El mundo después de la revolución. La física en la segunda mitad del siglo xx*. Su concesión dignifica el premio al reconocer el trabajo de un corredor de fondo, al premiar una obra que sólo representa la última parte de su investigación.

No es casualidad que su obra publicada más reciente —no la más reciente escrita, desde luego— tenga como referente la física de la segunda mitad del siglo xx. Cabría la tentación de caracterizar el conjunto de la obra del autor como una monumental contribución a la historia de la física. Habría muchas razones para hacerlo. Su primer libro, aparecido en 1981, ya estuvo dedicado a la Teoría de la Relatividad; el *Poder de la ciencia*, publicado en 1992, alentó esa imagen de historiador de la física, al convertirse pronto en un libro de referencia. Buceando en los cuarenta y cinco libros publicados por el autor, se comprueba que los libros dedicados a la física son mojones intelectuales de su producción. Para entender que se trata de un juicio apresurado, basta comparar las dos ediciones del *Poder de la ciencia*. La primera estuvo dedicada a la física, en la segunda, aparecida en el 2007, trató las ciencias de la naturaleza de una forma global, como indica el subtítulo *Historia social, política y económica de la ciencia (siglos xix y xx)*. Amplía el marco tem-



poral y la referencia disciplinar. Quince años en los cuales José Manuel Sánchez Ron creció en su percepción de la historia y del significado cultural de la ciencia. Se convirtió en un autor con intereses en la ciencia, en las ciencias, que indagaba en las disciplinas, y en los científicos clásicos por la proyección de sus obras. Observando el cromatismo de intereses que despliega en los últimos veinte años, asombra la gama de problemas que trata, las diferentes perspectivas desde las que los aborda. Su obra así forma un mosaico que pone al alcance de los lectores del español aspectos fundamentales de la ciencia de nuestra época, y de su historia más reciente.

Todo ese trabajo como trasfondo de una vida intelectual muy activa en frentes institucionales y editoriales. Primero, Profesor Titular de Física Teórica; desde 1994 Catedrático de Historia de la Ciencia según el programa PROPIO, que le reconocía su capacidad investigadora. Académico de la Real Academia Española de la Lengua desde el año 2003. Director de colecciones, editor de clásicos de la historia de la ciencia, y activo conferenciante con una indudable proyección internacional.

Ante toda esta actividad, cabe preguntarse cual es la intención subyacen-

te de la obra de José Manuel Sánchez Ron, porque su coherencia permite sospechar que ha estado animado de un propósito que no es oculto, sino manifiesto si se sabe leer adecuadamente la urdimbre de sus escritos.

Para entenderlo, conviene distinguir en el mundo de la cultura entre los que luchan por conseguir poder frente a los que se esfuerzan por tener influencia. Nuestro autor pertenece al segundo grupo. No desea mandar, siempre ha preferido influir. Para comprenderlo hemos de afinar el oído, y el ojo lector. En el discurso de ingreso a la Real Academia Española, manifestó sus deseos de conmover, de emocionar con la ciencia. En aquella ocasión, adecuada para unir lo protocolario con lo personal, una persona tan reservada como José Manuel Sánchez Ron dio la clave para entender la intención que le ha animado toda su vida. Primero, hacer que la ciencia sea parte de la cultura de la sociedad a la que pertenece, escribiendo sobre la ciencia universal, y a la vez dando voz a los científicos de la cultura española. Segundo, mostrando que la ciencia propicia pasiones por el conocimiento que se esconden en cada uno de las esquinas de nuestra cultura. Solo así puede entenderse que al lado de su obra enciclopédica, precisa, fundamentada y destinada a ser referencia de estudios posteriores, figuren libros como el *Diccionario de la ciencia*, donde se adivinan las conversaciones que tuvo que mantener para llegar a decidir cuales serían las voces que mejor representan la dimensión emocional de la ciencia; los dos libros dedicados a la memoria de Newton, en forma de narración de ficción y epistolar, para dar cuenta de su admiración por un autor que fue tan respetado y temido.

José Manuel Sánchez Ron vive y escribe sin estridencias, pero con la pasión tranquila de quien sabe que el conocimiento científico puede tatuar el perfil de una cultura, para bien y para mal.

Javier Ordóñez
Universidad Autónoma de Madrid

Noticias

XLVI Olimpiada Internacional de Física

La Olimpiada Internacional de Física (IPhO) ha sido organizada este año por el Homi Bhabha Centre for Science Education del Tata Institute of Fundamental Research en la vibrante ciudad India de Bombay. Los organizadores y los anfitriones del evento han hecho un magnífico trabajo de coordinación y de alojamiento, con unas pruebas muy interesantes y un programa de actos para los estudiantes muy bueno. La competición se desarrolló entre el 4 y el 12 de julio con la participación de cerca de 400 estudiantes de 86 países. La delegación española estaba formada por cinco estudiantes: Gabriel Sánchez Pérez, del Colegio San Agustín (Salamanca), Ramón Martínez Tatay, del Colegio San Pedro (Valencia), José Polo Gómez, del IES Martínez Montañés (Sevilla), Jesús Arjona Martínez, del Centro de Estudios Castroverde (Santander), y Adam Teixidó Bonfill, del IES Jaume Vicens Vives (Girona). Los profesores delegados fueron Antonio Guirao, de la universidad de Murcia, y José Francisco Romero, del colegio Retamar de Madrid.

La delegación de España llegó a Bombay a las 2 pm hora local del sábado 3 de julio. Ese día estuvo dedicado al registro en los alojamientos y al intercambio de impresiones y experiencias con los miembros de otras delegaciones. Las conversaciones suelen girar en torno a la manera de preparar mejor las olimpiadas, de conseguir más apoyos. Los estudiantes tienen otros temas de conversación pero también la Física está entre ellos, pues unos chicos que resuelven problemas en el avión a 15 000 metros de altura aprovechan cualquier oportunidad para hablar de lo que les mueve. Muestra de ello es el gran número de antiguos olímpicos que están estudiando su grado o su doctorado fuera de España en las mejores universidades del mundo.

El domingo fue la ceremonia de apertura que junto a los discursos habituales incluyó el clásico desfile olímpico, además de bailes hindúes clásicos. Ese día finalizó con la separación total de estudiantes y delegados, ya que el lunes comenzó con la discusión de las pruebas en el International Board.



El martes se dedicó a la prueba experimental, que se realizó en cinco horas, basada en dos aplicaciones de la difracción de la luz. La primera aplicación se inspiró en la obra de la científica Rosalind Franklin, quien obtuvo —mediante difracción de rayos X— las imágenes que permitieron identificar las propiedades estructurales del ADN. Sus resultados, entre ellos la famosa imagen “Foto 51”, fueron la base que llevó a Crick y Watson para descubrir su característica forma de doble hélice. En la prueba experimental los participantes tuvieron que determinar parámetros geométricos de dos estructuras helicoidales, un pequeño muelle y una sección transversal de doble hélice usando la difracción de luz visible a partir de generada por una fuente láser de 635 nm.

En la segunda parte de la prueba experimental se utilizó una cubeta de ondas manejada con una tablet para estudiar la difracción producida por las ondas de tensión superficial en el agua y así determinar la tensión superficial y la viscosidad del agua. En el experimento se difractó luz generada por la misma fuente láser. Las dos partes fueron muy interesantes, muy bien preparadas y con buenos resultados de nuestros participantes.

De acuerdo a los estatutos, el examen teórico de la IPhO se compone de tres

tareas independientes que los participantes deben resolver en cinco horas.

La primera tarea “*Partículas del Sol*” se articulaba en tres etapas. En la primera, partiendo de la masa, radio y luminosidad del Sol, se calculaba su temperatura, así como el flujo de fotones de diversas frecuencias que llegaban a la Tierra y su efecto sobre una célula solar de silicio. En la segunda se revisaba la hipótesis de lord Kelvin sobre el brillo del Sol y la edad de éste según dicha hipótesis (1.8×10^7 años), lo que conducía a la última parte. Aquí se empleaba ya la fusión del hidrógeno como fuente de energía solar, pidiéndose la temperatura en el núcleo del Sol, y diversos parámetros del flujo de neutrinos solares en la Tierra, las oscilaciones de neutrinos y la radiación de Cherenkov tras colisionar con los electrones dentro de los grandes detectores de neutrinos solares.

La segunda tarea “*Principio de extremos*”, revisaba diversos principios de mínimo de la Física. Como preparación hubo que estudiar una barrera de potencial bidimensional (conservación de energía y de momento transversal). A continuación se pedía analizar si el principio de mínima acción aplicado a este sistema producía los mismos resultados que los principios de conservación anteriores. Ya en el campo de la Óptica, se aplicaba

el principio de Fermat a la refracción de la luz entre dos medios y a la trayectoria de sus rayos en un medio inhomogéneo. Para completar estos principios de mínimo, se pedía la relación entre los cambios infinitesimales en la fase de las ondas de materia durante su propagación y los correspondientes cambios en su acción, para llegar así a las interferencias constructivas del camino clásico. Como embolismo final se estudiaron diversos aspectos del artículo de R. Bach, D. Pope, Sy-H Liou and H. Batelaan, "Controlled double-slit electron diffraction", *New J. of Physics*, vol. 15, 033018 (2013).

La última tarea "Diseño de un reactor nuclear" se inspiró en el programa de energía nuclear de la India, específicamente en los reactores nucleares Tarapur 3 y 4, situados en Thane, cerca de Bombay. Había que considerar el proceso de fisión nuclear y el diseño simplificado de un reactor nuclear. La tarea abordaba secuencialmente las barras de combustible, el moderador de neutrones y, final-

mente, el funcionamiento del reactor. Se pidió a los estudiantes que calcularan la energía de fisión, el calor producido en las barras, el gradiente de temperatura en ellas y el límite superior de su radio de acuerdo con el refrigerante empleado. Se analizaron a continuación las colisiones neutrón-átomo del moderador en los sistemas de CM y laboratorio y las pérdidas de energía de los neutrones en las colisiones. Finalmente las dimensiones del reactor para mantener un régimen estacionario y el número de vainas de combustible en el reactor que permiten dicho régimen. Con esta tarea se tenía en cuenta al Departamento de Energía Atómica, que ha sido fundamental en la organización de IPhO de este año en Bombay. Los problemas y sus soluciones se pueden descargar en <http://www.ipho2015.in/questions-and-solutions>

Después de una semana de duro trabajo, los estudiantes fueron al parque de atracciones Adlabs Imagica, promovido por Adlabs Films, una empre-

sa ligada a Bollywood. Los delegados continuaron su trabajo revisando las evaluaciones del equipo y con diversas reuniones para la moderación de las pruebas y fijar los límites de las medallas y menciones de honor.

Por último, hubo una reunión del International Board de la IPhO para ratificar los resultados de la XLVI Olimpiada y para estudiar todas las diversas mociones presentadas (como las enmiendas al programa IPhO o protocolo y procedimientos).

El 2015 IPhO culminó con la ceremonia de clausura oficial, que tuvo lugar en el Instituto Indio de Tecnología (IIT) en Bombay. Los estudiantes de España consiguieron unos buenos resultados con dos medallas de bronce (José Polo Gómez y Adam Teixidó Bonfill), y dos menciones de honor para Jesús Arjona Martínez y Gabriel Sánchez Pérez.

Antonio Guirao
y José Francisco Romero

XX Olimpiada Iberoamericana de Física

Del 6 al 12 de septiembre de 2015 se ha celebrado en Cochabamba (Bolivia) la XX Olimpiada Iberoamericana de Física (OIbF). Han participado sesenta y nueve estudiantes de diecinueve países iberoamericanos: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, México, Panamá, Paraguay, Perú, Portugal, Puerto Rico, República Dominicana y Uruguay.

La representación española estuvo constituida por los siguientes estudiantes:

- Álvaro Cía Mina, del Colegio Padres Reparadores (Puente la Reina, Navarra).
- Joaquín Domínguez de Tena, del I. E. S. Gran Capitán (Madrid).
- María Fernández Fernández, del I. E. S. Tomás Mingot (Logroño).
- Gabriel Martínez de Cestafe Pumares, del Centro Educativo Galen (Lugo).

Como profesores Delegados del equipo español asistieron José Tornos y M.^a del Carmen Carrión, de los Departamentos de Física Aplicada de las Universidades de Zaragoza y Granada, respectivamente.



Equipo español en la XX OIbF. De izquierda a derecha: J. Tornos, J. Domínguez, A. Cía, M. Fernández, G. Martínez y M. C. Carrión.

Los resultados obtenidos por nuestros estudiantes han sido excelentes, concretamente: Joaquín Domínguez recibió la segunda medalla de oro y el premio a la mejor prueba experimental, Álvaro Cía recibió también medalla de oro, María Fernández medalla de plata y Gabriel Martínez de Cestafe

menção de honor. En esta ocasión el ganador absoluto y primera medalla de oro resultó ser un estudiante salvadoreño, pero el equipo mejor clasificado globalmente fue el español. Por ello queremos aprovechar esta reseña para manifestarles nuestra más sincera felicitación.

Los delegados estuvieron alojados en el Hotel Anteus, ubicado en la zona de la Recoleta, a unos 10 minutos del centro de la ciudad. Los estudiantes se alojaron en el hotel Casa Campestre en las afueras de la ciudad de Cochabamba, con amplias zonas verdes y espacios deportivos.

La ceremonia de inauguración tuvo lugar en el Auditorio de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Mayor de San Simón (FCyT). Fue presidida por D. Roberto Sánchez, Director Nacional de Ciencia y Tecnología del Ministerio de Educación, D. Boris Calancha, Decano de la Facultad, D. Iván Ruiz, Director del departamento de Física, D. Carlito Lariucci, Presidente del Secretariado Permanente de la OIBF, D. Roi Bustos, en representación de la Sociedad Boliviana de Física y finalmente D. Marko Andrade, Presidente del Comité Organizador. La conferencia inaugural versó sobre el Laboratorio de Chacaltaya y fue impartida por el profesor D. Martín Subieta, de la universidad Nacional de San Andrés (la Paz).

Las reuniones del Jurado Internacional, compuesto por los 35 delegados de los países participantes, y de la Asamblea General se llevaron a cabo en la Sala de Reuniones del Hotel Anteus. Las pruebas se realizaron en las aulas y laboratorios de la FCyT. La organización local contó con personal suficiente para la vigilancia de las pruebas y garantizó la corrección anónima de las mismas mediante la asignación de un código numérico a cada una de las pruebas de los estudiantes participantes.

La prueba experimental consistió en la determinación del coeficiente de transmisión de unos filtros de color para radiación ultravioleta, y del coeficiente de absorción del agua (turbia) para este mismo tipo de radiación. El enunciado fue modificado por el Jurado resultando una prueba abierta y discriminatoria. Dos de los problemas teóricos propuestos por el comité académico local fueron rechazados por el Jurado por presentar una solución discutible o demasiado matemática. En su lugar se aceptaron dos de los problemas de reserva. Finalmente los tres problemas propuestos versaron sobre un método de determinación dinámica de G, el descubrimiento del pión en el laboratorio de Chacaltaya en 1947 y una colisión entre dos partículas con



interacción elástica. Estos problemas, una vez adaptados por el Jurado, permitieron establecer una correcta gradación entre los participantes. Las pruebas, junto con otros datos de la Olimpiada, pueden encontrarse en la dirección www.oibf2015.fcyt.umss.edu.bo/.

De acuerdo con el Reglamento de la OIBF, cada uno de los ejercicios fue corregido de forma anónima por dos equipos independientes, constituidos cada uno por delegados de países diferentes, siguiendo los criterios generales de puntuación previamente establecidos por el Jurado Internacional. Este procedimiento asegura la homogeneidad en la calificación.

El 11 de septiembre por la noche se celebró la Asamblea General de Delegados en la que se discutieron y aprobaron algunas modificaciones del reglamento de la OIBF planteadas por las delegaciones de Puerto Rico y España. Finalmente se revisó la lista de futuras sedes de la OIBF, que quedó establecida de la siguiente forma: Uruguay (2016) y Colombia (2017). La profesora Andrea Cabot comentó brevemente los preparativos de la próxima OIBF, que se celebrará en Carmelo (Uruguay). Seguidamente el profesor Eduardo Zalamea, de Colombia, presentó las gestiones que ya se están realizando para la celebración de la siguiente Olimpiada.

Los nombres de los premiados se hicieron públicos en la ceremonia de Clausura celebrada el 12 de septiembre en el hotel Casa Campestre, presidida por el Ministro de Educación de Bolivia D. Roberto Aguilar Gómez. En dicho acto la organización decidió que estuviera en la mesa un representante de los

estudiantes, donde resultó elegida María Fernández, de la delegación española, como puede verse en la foto adjunta.

De las actividades culturales organizadas durante la XX OIBF cabe destacar la visita a la ciudad de Tarata. El recibimiento que se dio a todas las delegaciones participantes en la OIBF fue inolvidable: las autoridades locales y todos los estudiantes de la ciudad (varios centenares), algunos ataviados con sus trajes típicos, nos recibieron con bandas de música, agitando pañuelos, mostrando carteles de bienvenida y demostrando un cariño y reconocimiento hacia los participantes en la OIBF que emocionó a todos. Además el Ayuntamiento entregó a cada delegación un certificado que la acreditaba como "Amigos de Tarata".

Desde estas líneas, queremos expresar un año más nuestro agradecimiento a la Dirección General de Evaluación y Cooperación Territorial del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte español. Como en años anteriores, el Convenio entre este Ministerio y la RSEF ha hecho posible el desplazamiento de la delegación española a Bolivia.

Por último queremos reiterar nuestra felicitación a todos los estudiantes que han participado en esta XX OIBF y en particular a los estudiantes españoles, cuyo comportamiento ha sido de nuevo ejemplar. Asimismo hemos de manifestar nuestro agradecimiento a los organizadores de la XX OIBF, dirigidos por el Profesor Marko Andrade, por su esfuerzo, interés y eficacia en llevar a buen término esta Olimpiada.

José Tornos y M.^a Carmen Carrión
Delegados de España en la XX OIBF

Josep Fontcuberta, “Distinguished Lecturer” de la IEEE Magnetics Society

La IEEE Magnetics Society (<http://ieeemagnetics.org/>) es una asociación profesional de expertos en magnetismo. Tiene en la actualidad 38 Capítulos asociados: USA, Sudamérica, Europa, Asia etc. IEEE Magnetics pretende promover el progreso de la ciencia, la tecnología, las aplicaciones y la formación en magnetismo. Promueve la difusión e intercambio de información entre sus miembros y con la comunidad científica global, incluyendo la educación de **jóvenes ingenieros y científicos**. IEEE Magnetics edita *IEEE Transactions on Magnetics*, revista de referencia en el campo de las aplicaciones del magnetismo y los materiales magnéticos, *IEEE Magnetics Letters* y la *IEEE Magnetics Newsletter*, que es un foro de noticias relacionadas con las actividades de la sociedad y el magnetismo. Organiza anualmente la *International Magnetism Conference* (INTERMAG) y numerosas *Summer Magnetism Schools*, entre otras actividades.

El programa “**IEEE Magnetics: Distinguished Lecturer**” tiene como objetivos divulgar el progreso y avances en el campo del magnetismo, y hacer partícipe de ellos a la **comunidad científica internacional, en su sentido más amplio**. El programa da soporte a los distintos capítulos asociados poniendo a su disposición conferenciantes que puedan inspirar y estimular nuevos investigadores, particularmente los más jóvenes, a iniciar una actividad, una carrera profesional, en magnetismo. Cada año, la IEEE Magnetics elige hasta cuatro “Dis-



tinguished Lecturers (DL)” a los que da el soporte necesario para pronunciar conferencias en todos los continentes. Fueron nominados DLs: Russell Cowburn, Ivan K. Schuller, Ludwig Schultz y Bethanie Stadler en 2015, y en años anteriores encontramos: Rudolf Schaefer, Koki Takanashi, Shinji Yuasa, Gerrit E. W. Bauer, Oliver Gutfleisch, Axel Hoffmann, Peter Fischer, E. Dan Dahlberg, Stuart Parkin, Dieter Weller y Hideo Ohno, entre otros.

Para 2016, la IEEE Magnetics, ha nominado DLs: Greg P. Carman (“Magnetics + Mechanics + Nanoscale = Electromagnetics Future”, University of California, Los Angeles), Kazuhiro Hono (“Materials Challenges for Next-Generation, High-Density Magnetic Recording: Media and Read Heads”, National Institute for Materials Science, Japan), Teruo Ono (“Spin Dynamics in Inhomogeneously Magnetized Systems”, Kyoto University, Japan) y Josep Fontcuberta (“The Magnetism of

Oxides”, Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Spain).

Josep Fontcuberta recibió el Doctorado en Física por la Universitat de Barcelona (1982). Fue investigador post-doctoral en el grupo del Prof. J. B. Goodenough en el Inorganic Chemistry Lab. (Oxford University) y posteriormente fue profesor en la Facultad de Física de la Universidad de Barcelona. En 1991, dejó esta posición y se incorporó al Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB-CSIC), donde actualmente es Profesor de Investigación. Su actividad científica se ha centrado en óxidos funcionales. Estos materiales, en los que las correlaciones electrónicas en algunos casos juegan un papel muy importante, pueden presentar órdenes ferroicos (magnético, polar, etc.) y propiedades magneto-eléctricas y ópticas muy remarcables, han constituido el eje de su trabajo de investigación y la del **Laboratorio Multifunctional Thin Films and Complex Structures** (<http://www.icmab.es/mulfox/>) que lidera. En la actualidad las investigaciones del grupo se centran en materiales y dispositivos que pueden contribuir, en el ámbito de las tecnologías de la comunicación y fotónica, a un mundo más sostenible. Pep Fontcuberta es co-autor de más de 400 artículos científicos y ha dirigido más de 20 Tesis Doctorales. En la actualidad, Pep es Editor de *Solid State Communications* y miembro del Scientific Advisory Board de *Advanced Electronic Materials* y de *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*.

Maxi San Miguel recibe la Senior Scientific Award 2015 de la Complex Systems Society

La Sociedad de Sistemas Complejos (Complex Systems Society, CSS) ha galardonado a Maxi San Miguel con la Senior Scientific Award 2015 en reconocimiento a su carrera profesional y a sus estudios interdisciplinarios en el campo de los sistemas complejos. Actualmente, Maxi San Miguel es el director del Instituto

de Física Interdisciplinar de Sistemas Complejos (IFISC), centro mixto de la Universitat de les Illes Balears y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas. El premio fue entregado durante el congreso anual de la CSS, celebrado en septiembre 2015 en Phoenix (Arizona, EE. UU.). El galardonado en la primera edición de este premio (Lucca,

Italia, 2014) fue el Prof. H. E. Stanley de la Universidad de Boston.

La CSS es una organización internacional e interdisciplinar formada por científicos de referencia en la investigación de los sistemas complejos. El premio reconoce contribuciones de la máxima relevancia en el avance de las ciencias de la complejidad. La jus-

tificación del premio indica que “Maxi San Miguel ha sido un actor clave en la investigación interdisciplinar de los sistemas complejos (...) y una fuente de inspiración en la transferencia de conocimientos y en la definición de nuevas líneas y campos de investigación.

Maxi San Miguel es Doctor en Física Teórica por la Universidad de Barcelona (1978), catedrático de Física en la Universitat de les Illes Balears (UIB) desde 1986 y Director del Instituto de Física Interdisciplinar y Sistemas Complejos (IFISC, centro mixto UIB-CSIC) desde 2007. Recibió la medalla de la Sociedad Española de Física-BBVA en 2010. Ha publicado más de 300 artículos científicos que han recibido casi 12.000 citas (su número h es 52).

La carrera científica de Maxi San Miguel ha tenido diversas etapas con contribuciones muy reconocidas en la física estadística (cinética de transiciones de fase), procesos estocásticos, física no lineal, caos espacio-temporal, física del láser, fotónica y optoelectrónica. En su última etapa se ha centrado en el estudio de las redes complejas y en las ciencias sociales computacionales, a las que ha incorporado, desde el punto de vista de las ciencias de la com-



plejidad, su experiencia en los campos anteriores.

En esta etapa también ha publicado en revistas de alto impacto del ámbito de las Ciencias Sociales, en temas como la globalización cultural, teoría de juegos y roles sociales, bilingüismo y competición de lenguas, o la modelización de regularidades estadísticas en procesos electorales. Más recientemente está activamente involucrado en estudios de movilidad y urbanismo desde el punto de vista de análisis de datos TIC. En otro orden de cosas

y en relación a la RSEF, Maxi San Miguel promovió en 1986 las reuniones de Física Estadística españolas (FISES), germen del actual Grupo Especializado de Física Estadística y No Lineal de la RSEF.

La Complex Systems Society otorga desde el año pasado este premio en reconocimiento a la trayectoria investigadora de uno de sus miembros, y también reconoce la tarea de los más jóvenes, con el Junior Scientific Award. En la presente edición, lo han recibido Bruno Gonsalves y Chiara Poletto.

Real Sociedad Española de Física. Junta de Gobierno

PRESIDENTE

José Adolfo de Azcárraga Feliu

VICEPRESIDENTES

María Luisa Calvo Padilla

Miguel Ángel Sanchis Lozano

SECRETARIO GENERAL

José María Pastor Benavides

TESORERA

Carmen Carreras Béjar

EDITOR GENERAL

Joaquín Marro Borau

VOCALES

M.^a L. Amieva Rodríguez, J. Fernández Rossier, M. A. Fernández Sanjuán, A. Gil Gil, M.^a R. Heras Celemín, M. I. Hernández Hernández, J. A. Manzanares Andreu, L. Morellón Alquézar, E. Moya Valgañón, R. Pérez Pérez, R. Ranchal Sánchez, L.F. Rull Fernández, S. Serrano Calle, F. Sols Lucia, C. Untiedt Lecuona, P. Varela Nieto, L. Viña Liste

PRESIDENTES DE SECCIONES LOCALES

S. Gallego Rico (Alicante)
A. Carrión Sanjuán (Aragón)
J. Pisonero Castro (Asturias)
A. Ruiz Jimeno (Cantabria)
M. A. López de la Torre (Castilla-La Mancha)
J. Jesús Ruiz Lorenzo (Extremadura)
J. Luis Legido Soto (Galicia)
M.^a Carmen Carrión Pérez (Granada)
T. Albaizar Buisán (La Rioja)
V. Madurga Pérez (Navarra)
C. Santamaría Salazar (País Vasco)
J. Martín Martín (Salamanca)
R. Márquez Delgado (Sevilla)
A. Cross Stotter (Valencia)
M. Santander Navarro (Valladolid)

PRESIDENTES DE GRUPOS ESPECIALIZADOS

J. R. García Menéndez (Adsorción, GEADS)
M.^a V. Fonseca González (Altas Energías, GEFAE)
J. M.^a Rodríguez Espinosa (Astrofísica, GEAS)
L. Gimeno Presa (Física de la Atmósfera y de Océano, GEFAO)
A. García Vela (Física Atómica y Molecular, GEFAM)
J. José Suñol (Calorimetría y Análisis Térmico, GECAT)
J. Forcada García (Coloides e Interfases, GECl)

L. Joaquín Boya (Comunicación y Divulgación de la Física, GECD)
F. J. Lahoz (Cristalografía y Crecimiento Cristalino, GE3C)
M. Martín Sánchez (Didáctica e Historia de la Física y la Química, GEDH)
V. Tricio Gómez (Enseñanza de la Física, GEEF)
J. M. Martínez-Duart (Energía, GEE)
C. Ocal García (Física del Estado Sólido, GEFES)
R. Toral Garces (Física Estadística y No Lineal, GEFENOL)
J. José García Ripoll (Información Cuántica, GEIC)
L. Bañares Morcillo (Láseres Ultrarrápidos, GELUR)
G. J. de Valcárcel (Óptica Cuántica y Óptica No Lineal, GEOCONL)
A. Sastre Santos (Nanociencia y Materiales Moleculares, GENAM)
P. López Sancho (Mujeres en Física, GEMF)
D. Cortina Gil (Física Nuclear, GEFN)
J. San Román del Barrio (Polímeros, GEPO)
M.^a D. Calzada Canalejo (Física de Plasmas, GEFP)
P. A. Santamaría Ibarburu (Reología, GEREO)
J. R. Solana Quirós (Termodinámica, GET)
F. Cornet Sánchez del Águila (Física Teórica, GEFT)
J. Luis Muñiz Gutiérrez (Física Médica, GEFM)

3B Scientific®

a la Vanguardia en la

Divulgación de la Física



...going one step further

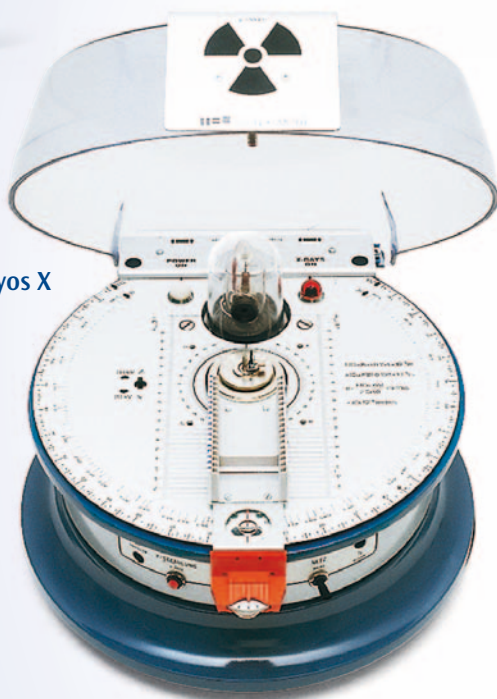


1000540
NETlog para adquisición de datos



1012782
Microscopio efecto tunel

1000657
Aparato de Rayos X



1008699
H-Racer con pila de H₂

1000617
Tubo de Thomson S



Catálogos y más información en:

ESPAÑA 3B SCIENTIFIC, S.L. • Ronda Narciso Monturiol, 3 • Edif. ABM • Torre A • Despacho 8 • Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) • ESPAÑA • Tel. +34 96 131 84 38 • www.3bscientific.es • E3b@3bscientific.com

Premio Nobel de Física 2014 para Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura

por la invención de los diodos emisores de luz azul eficientes
que han permitido las fuentes de luz brillantes y de ahorro
energético

UNITRAIN I

Iluminación por LED y reconocimiento de colores



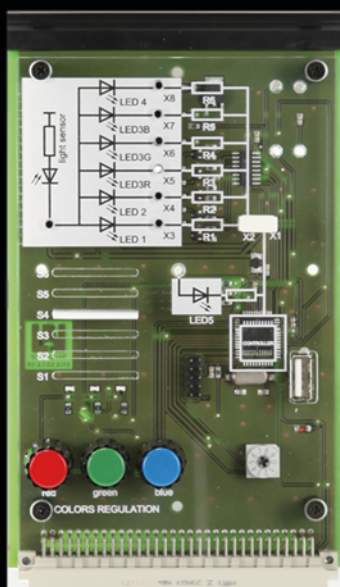
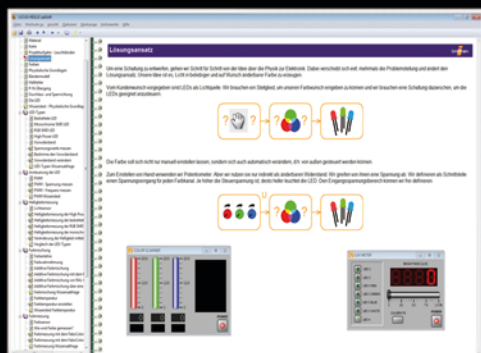
Conocimiento de distintos tipos de LED

Regulación de luminosidad de diferentes LED por medio de modulación PWM

Registro de características y medición de luminosidad

Mezcla aditiva de colores y ajuste de temperatura de cromática

Reconocimiento y reproducción de color

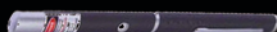


Tlf. 902103425 - 916659203

Fax. 916169027

www.sidilab.com

sidilab@sidilab.com



Regalo de puntero de láser verde de 5 mW con cada pedido

