

Revista
de
FÍSICA

española

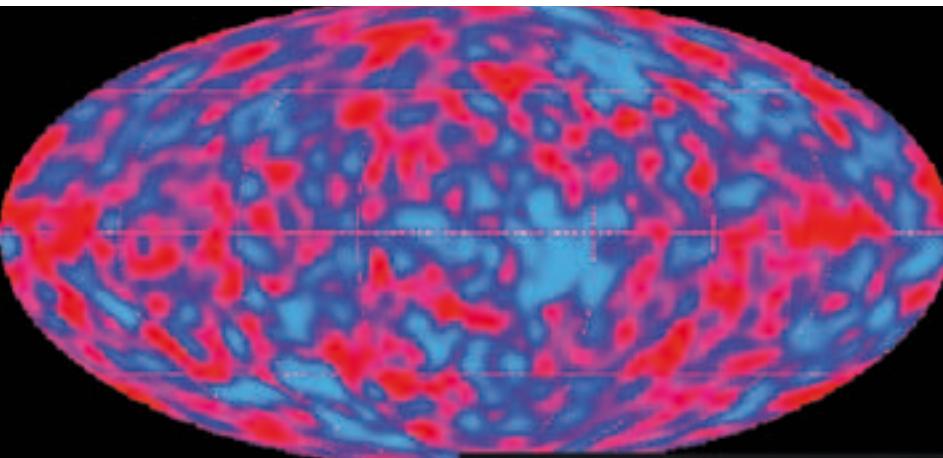
UNA PUBLICACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA
www.rsef.es

Volumen 29 • Número 1 • 2015

AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



Un monográfico dedicado al Año Internacional de la Luz que también incluye:

- Mi clásico favorito: Chandrasekhar por Eduardo Battaner.
- Noticias, Hemos Leído Que, Puntos de Interés

- Comentarios Invitados: Capital humano, formación universitaria y empleo; ¿Gallina en corral ajeno?
- Entrevista con el Director del Área de Ciencia y Medio Ambiente de la Obra Social "La Caixa"



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

Director:
Joaquín Marro (UGR)

Subdirectores:
Saúl Ares (UC3M)
Julio Gutiérrez (UC)
Rocío Ranchal (UCM)

Secretaría de redacción:
Itziar Serrano

Consejo editorial:
Eduardo Battaner (UGR)

Pablo Brañas (*Middlesex University*)
Antonio Fernández Rañada (UCM)
Eloísa López (UCM)
Jorge Mira (USC)
Ricardo Moreno (IES)
Javier Ordoñez Rodríguez (UAM)
José M. Ortíz 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.disgrafsl.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
Universidad Complutense de Madrid
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 Posición de la Real Sociedad Española de Física ante la situación actual de la investigación y la ciencia en España**
- Año Internacional de la Luz**
- 3 Presentación.** María Luisa Calvo
- 5 La radiación de fondo, casi a fondo.** Álvaro de Rújula
- 11 El largo y sinuoso camino de la fibra óptica.** José A. Martín-Pereda
- 18 Maxwell y la luz.** Eloísa López Pérez y Claudio Aroca Hernández-Ros
- 25 En los límites de la difracción: superresolución y apodización en sistemas ópticos. Implementación en moduladores LCD.** María J. Yzuel, Juan Campos, Juan C. Escalera, Andrés Márquez.
- 31 La excepcional contribución de Ibn-al-Haytham (Alhacén) a las ciencias en el primer milenio: un intento de aproximación a la ciencia de la óptica en el Renacimiento Musulmán del siglo xi.** María Luisa Calvo
- Puntos de interés**
- 36 Física de los virus**
- 36 Relaciones entre amigos**
- 37 Explosiones cósmicas que destruyen vida en el universo**
- 37 Los males nunca vienen solos**
- 38 Coreografía de un par de electrones**
- 38 Resuelta una conjetura de Kelvin sobre la mecánica de los fluidos**
- 39 Una fuerte interacción espín-órbita evita colisiones en grafeno**
- 39 Esperanza de nuevos materiales para fabricar láseres más versátiles**
- 40 Causalidad, sinergia y redundancia en redes complejas dinámicas**
- Comentario invitado**
- 41 Capital humano, formación universitaria y empleo. El caso de los egresados de física.** Teodoro Luque
- 45 Hemos leído que...**
- Comentario invitado**
- 51 ¿Gallina en corral ajeno?** Lourdes Vega
- Entrevista**
- 55 Una entrevista informal con Enric Banda, por Rocío Ranchal**
- 59 Mi clásico favorito: Chandrasekhar,** por Eduardo Battaner
- 66 La Física según nuestros autores**
- 67 Reseñas de libros de interés**
- Noticias**
- 71 Bodas de plata de la Olimpiada Española de Física**
- 72 Premios de Física RSEF- Fundación BBVA**
- 74 Obituario: M.ª del Mar Artigao**
- 75 Nuevo co-Editor Jefe de la revista European Physical Journal-Applied Physics**
- 75 XIII Olimpiada Científica de la Unión Europea**

Posición de la Real Sociedad Española de Física ante la situación actual de la investigación y la ciencia en España

Texto aprobado por unanimidad en la Junta de Gobierno de la RSEF del 9 de enero de 2015

La Real Sociedad Española de Física, tras constatar el progresivo deterioro del sector público investigador en los últimos años, alerta sobre la urgente necesidad de adoptar una serie de medidas que eviten que el futuro de la I+D española, y de la ciencia en general, queden seriamente comprometidos.

La ciencia en España ha mejorado notablemente en los últimos decenios, abarcando cada vez más áreas de conocimiento y elevando su nivel de excelencia. Sin embargo ese progreso, que tanto esfuerzo ha costado a la sociedad española y a sus científicos, ha ido debilitándose paulatina y gravemente en los últimos años, con la crisis económica como telón de fondo.

Así, desde el año 2008, ha tenido lugar un apreciable descenso del porcentaje del PIB dedicado a la investigación y desarrollo (I+D). Según el Instituto Nacional de Estadística, se ha pasado del 1'39% del PIB dedicado a la I+D en 2008 (14.701 millones de euros) al 1'24% en 2013 (13.052 millones). Esto implica una disminución en torno al 10% del importe global dedicado a la I+D en claro contraste con la media europea. Ésta se encuentra en torno al 2'4% del PIB, porcentaje que debería seguir creciendo según los acuerdos de Lisboa con el objetivo de llegar al 3% en 2020. Estas cifras muestran que aunque la I+D nunca fue una prioridad nacional (*las prioridades las determinan los porcentajes, no las cifras absolutas*), hoy, con la crisis, lo es mucho menos. Sin embargo, es importante desglosar de estas cifras globales del INE las cantidades que el propio Estado destina directamente a la investigación. Para 2015, la cifra total presupuestada ('Política de Gasto PG46 del Proyecto de los Presupuestos Generales', véase el informe COSCE) es de 6.407 millones (de ellos, 5.680 dedicados a la investigación civil). De esos totales, sólo 2.406 millones (2.243 para investigación civil) son 'a fondo perdido' es decir, destinados al fomento directo de la investigación. Un análisis más detallado de esta parte —la no financiera— muestra, además, que las reducciones que incluye respecto del máximo de 2009 de los distintos sectores es superior al 30% y que, en alguna de ellos, ronda el 40%; por ejemplo, los Organismos Públicos de Investigación (los OPIs: CSIC, CIEMAT, INTA, etc.) han sufrido una disminución global de un 35%. Más aún, lo importante es lo finalmente ejecutado, no lo presupuestado, lo que año tras año y desde siempre se ha traducido en importantes reducciones adicionales. Así pues, y con independencia de la crisis, esas cifras suponen el abandono por parte del Estado del papel estratégico que le corresponde como incentivador de la investigación y del desarrollo tecnológico e industrial español, con la falta de visión de futuro que ello implica. Y cabe incluso argumentar que, precisamente por la crisis, tal política es errónea.

Como consecuencia inmediata de las sucesivas reducciones, los jóvenes científicos se ven gravemente afectados por la falta

de oportunidades, de igual modo que la siguiente generación lo estará por las consecuencias del daño que hoy se causa a la I+D. En tal sentido, la reducida o casi nula tasa de reposición en el empleo público vinculado a la I+D, que afecta a las Universidades y a los OPIs (como el CSIC), está produciendo una emigración de investigadores jóvenes (emigración *definitiva*; no nos referimos aquí a las imprescindibles estancias temporales de perfeccionamiento en el extranjero) que España no se puede permitir. Además, las previsiones de conseguir fondos europeos del programa *Horizonte 2020* no se podrán cumplir sin una sólida planificación de los recursos organizativos, humanos y financieros de nuestro sistema de I+D. Los efectos serán todavía más devastadores a medio y largo plazo, pues quedan comprometidos tanto numerosos proyectos científicos y tecnológicos en marcha como el inicio de otros nuevos. Esa política de errónea austeridad daña, cuando no destruye, el todavía frágil sector investigador e innovador español, que debe competir no sólo con países industrializados de gran tradición científica, sino también con países emergentes que, con más visión, están invirtiendo masivamente en I+D.

A la luz de estas consideraciones, la Junta de Gobierno de la *Real Sociedad Española de Física* considera necesario reiterar, como ya lo hizo en abril de 2012, la necesidad de:

1. Reforzar el Plan Nacional de I+D, esencial para evitar el progresivo deterioro de la investigación española.
2. Reactivar sin demora la oferta pública de empleo en I+D. Los organismos públicos de investigación y las universidades están debilitadas tras varios años de drásticas reducciones de presupuestos y número de plazas. El gran envejecimiento de profesores e investigadores acarrea, además, una importante pérdida de la competitividad y compromete el futuro.
3. Dar la oportunidad para que el sistema español pueda absorber los investigadores competentes ya formados (en particular, los seleccionados por el programa Ramón y Cajal) que superen la correspondiente evaluación, incluyendo los expatriados. De otro modo, numerosas líneas de investigación pioneras, a menudo introducidas por españoles que han regresado a España tras ampliar su formación científica en el extranjero, quedarán abandonadas. Incluso juzgada exclusivamente en términos económicos, la actual *fuga de cerebros* supone un despilfarro.
4. Cuidar el capítulo de formación y contratación de jóvenes investigadores abriendo *regularmente* nuevas convocato-

rias de contratos pre-doctorales y de los programas nacionales Juan de la Cierva, Ramón y Cajal, así como otros posibles en las Comunidades Autónomas y los organismos públicos de investigación.

5. Considerar la posibilidad de fortalecer y flexibilizar las estructuras actuales, por ejemplo, añadiendo alternativas a la vía funcional en la investigación y mejorando la selección de profesores e investigadores.
6. Crear la esperada *Agencia Nacional de Investigación*, independiente de los vaivenes políticos.
7. Instar a la Administración a que reanude los pagos de las cuotas de las Uniones Científicas Internacionales, como la IUPAP (*International Union of Pure and Applied Physics*) o el ECT* (*European Center for Theoretical Studies in Nuclear Physics and related areas*) que conciernen a la física, y otras análogas, pagos sobre los que ya ha manifestado su intención de interrumpirlos indefinidamente.
8. Concienciar a la sociedad española de lo imprescindible de la investigación para competir eficazmente, e incentivar más proyectos de I+D+i en empresas públicas y privadas.

Si no se toman medidas urgentes, el progresivo deterioro del sistema público español de I+D tendrá consecuencias funestas. La actual pérdida de jóvenes investigadores requerirá otra generación para compensarla, y ello sólo si se actúa sin demora. Es preciso cambiar progresivamente el actual modelo productivo (con tecnología importada que hay que pagar) a uno que disminuya la dependencia de España de la I+D+i exterior, para lo que es esencial potenciar la investigación nacional y, en particular, no perder el extraordinario capital que

representan los investigadores más jóvenes. Resultaría especialmente grave que se continúe reduciendo el capítulo del personal científico joven, indispensable para poder garantizar el relevo y el futuro de la I+D española.

Por las razones expresadas, esta Real Sociedad Española de Física desea manifestar que es imprescindible incrementar urgentemente la inversión estatal en el sistema de I+D español. De este modo, además, se contribuirá a superar la presente crisis no sólo coyunturalmente, sino sentando las bases de una estructura científica y tecnológica duradera, que permita desarrollar en España una economía mucho más sólida y más competitiva.

Deseamos concluir recordando unas palabras de José de Echegaray y Eizaguirre, quien fue Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, muy ilustre matemático, Premio Nobel de Literatura (1904) y, no menos importante, el primer Presidente (1903) de nuestra Sociedad. Pues bien, cuando Echegaray era Ministro de Hacienda en 1884, en los albores del regeneracionismo español hoy de nuevo tan necesario, afirmó: “*¿Cómo he de negarme a las reformas? ¿Cómo he de negar que la instrucción pública las necesita muy grandes? Si lo poco que yo soy se lo debo a mi amor a la ciencia, ¿cómo he de negarme a que el Ministerio de Instrucción Pública invierta grandes sumas, si con la ciencia lo son todo las naciones modernas, y la nación que no cultiva la ciencia, que no da sabios al mundo, es una nación que vive vida miserable y muere muerte vergonzosa?*” Hoy, más de siglo y cuarto después, nos identificamos con la visión de nuestro primer Presidente: España necesita más ciencia, financiación y reformas. Que hagan sus palabras, también, quienes actualmente tienen la capacidad —y creemos la obligación— de cambiar el presente estado de cosas.

Presentación

Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz 2015

El 3 de diciembre de 2013 la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó de forma unánime declarar el año 2015 como Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz [1]. La propuesta había sido iniciada en 2012 por la Sociedad Europea de Física (EPS), con el apoyo de la UNESCO. En este año (2015) se desarrolla un proyecto de gran alcance tanto para el mundo de la educación como para los de la tecnología y de la ciencia, con un importante reto para la organización y divulgación de actividades. El año 2015 es un candidato natural para celebrar el Año Internacional de la Luz donde se conmemoran un número importante de hitos en la historia de la ciencia de la luz con fechas que van desde hace 50, a 100, 200 e incluso 1000 años. Todos estos hitos han marcado inicios y puntos de referencia en el desarrollo de la ciencia de la luz y de las tecnologías que de forma progresiva han revolucionado nuestro mundo y nuestra forma de vida. En la figura 1 se muestra el logo oficial propuesto por la UNESCO.

Comenzamos este número especial con un fascinante artículo de Álvaro de Rújula sobre el descubrimiento, en 1965, por Arno Penzias y Robert Wilson, entonces en los Laboratorios Bell, de la radiación cósmica de fondo de microondas. Hemos querido así iniciar el paseo por todas las efemérides siguiendo la flecha del tiempo, pero ubicándonos en la fecha más próxima al año 2015. En ese mismo año de 1965 Charles Kao publicaba sus artículos más determinantes que demostraban la posibilidad de transmisión rápida de señales luminosas vía guías de onda ópticas, dando lugar a la revolucionaria tecnología de la óptica de las comunicaciones y las fibras ópticas. Para desarrollar este hito, hemos contado con la contribución inestimable de José Antonio Martín Pereda. También las Naciones Unidas han considerado la contribución de Albert Einstein en 1915 introduciendo la teoría de la relatividad general. No tenemos artículo sobre este tema en este número especial, ya que habrá otro número de la REF dedicado exclusivamente a esa efeméride. Desde estas grandes contribuciones de la ciencia y la tecnología en el siglo XX, saltamos al siglo XIX para conmemorar uno de los descubrimientos cruciales para el posterior desarrollo de la física y el conocimiento de la naturaleza electromagnética de la luz. Nos referimos a la publicación de James Clerk Maxwell, en 1865, de su trabajo ‘A Dynamical Theory of the Electrodynam-



Fig. 1. Logo oficial del Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz. En el diseño el centro es el sol ilustrado con banderas que denotan la internacionalidad de esta iniciativa de Naciones Unidas.

Field’ [2]. Las ecuaciones generales para el campo electromagnético establecidas por él han pasado a denominarse de forma general: ‘las ecuaciones de Maxwell’. Esta aportación extraordinaria a la ciencia es comentada y ampliamente discutida, de forma rigurosa y muy amena, por Eloisa López y Claudio Aroca. Siguiendo en el siglo XIX tomamos un tema de gran transcendencia como es la discusión a principio de dicho siglo sobre la naturaleza de luz.

Podemos recordar aquí unas irónicas frases de Richard Feynman recogidas en su libro *The Strange Theory of Light and Matter* [3] donde refleja su visión personal acerca de una dilema que duró muchos siglos de historia de la ciencia: «Siguió un periodo donde la inteligencia de los físicos fue puesta a dura prueba: la luz, decían, debe de ser considerada bien como una onda o bien como una partícula...dependiendo de las condiciones experimentales. Es lo que se ha llamado la «dualidad onda-corpúsculo». Se puede decir, de una forma amable, que en aquellas épocas la luz era una onda los lunes, miércoles y viernes, y un conjunto de partículas los martes, jueves y sábados. Quedaba el domingo para reflexionar sobre esa cuestión.»

Enlazamos entonces aquí con las contribuciones fundamentales del científico francés Agustín Fresnel. María J. Yzuel, Juan Campos, Juan C. Escalera y Andrés Márquez contribuyen con un atrayente artículo de puesta a punto y actualización de la teoría de la difracción de la luz, donde celebran el 200 aniversario de la propuesta de Augustin Jean Fresnel, publicada en 1815 (con tan sólo veintisiete años de edad), del carácter

ondulatorio de la luz haciendo mención especial a su validez para interpretar la formación de la imagen en sistemas ópticos, mostrando la vigencia de la Teoría de la Difracción en cuestiones actuales de la óptica y la fotónica y sus tecnologías afines.

Terminamos este número especial con un artículo, escrito por quién redacta esta introducción, que tiene un carácter fundamentalmente histórico-divulgativo y así un sello especial. Se trata de celebrar los mil años de los trabajos (tanto teóricos como experimentales) del científico árabe Ibn-al-Hytham, conocido en occidente como Alhacén. Sin duda este año 2015 es una gran oportunidad para que en occidente se conozca y se valore la extraordinaria contribución de la ciencia árabe al conocimiento y a las ciencias, en general.

Al terminar esta presentación, deseo expresar mi agradecimiento a todos los autores que han contribuido a este número por su gran generosidad y dedicación. Igualmente, al Editor de la REF, Joaquín Marro y a la Subdirectora Rocío Ranchal

por su apoyo y soporte. Esperamos y deseamos que todos los lectores disfruten de este número especial.

Referencias

- [1] Página web del Comité Español para el Año Internacional de la Luz 2015: www.luz2015.org
- [2] JAMES CLERK MAXWELL, «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459–512 (1865). (Este artículo está comprendido en la presentación que hizo Maxwell, el 8 de diciembre de 1864, en la Royal Society, Londres)
- [3] RICHARD FEYNMAN, *QED: The strange theory of light and matter* (Princeton University Press, Princeton, USA, 2006).

María Luisa Calvo Padilla

Universidad Complutense de Madrid, Vice-presidenta RSEF

Real Sociedad
Española de
Física

XXXV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física
25º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física
www.rsef2015.org

Envío de resúmenes Simposios Ponentes Inscripción Comités Información práctica

Gijón, escenario de la Bienal y del Encuentro Ibérico 2015

Presentación

Ponentes

Licenciados

Estimados colegas:

Como recordarás, en la última Reunión Bienal de Valencia, de tan grande recuento para todos, la RSEF nos confió la organización de la XXXV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física y del 25º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física que se celebrará en Gijón, del 13 al 17 de julio de 2015.

Es nuestro principal deseo no defraudar a quienes depositaron su confianza en nosotros y por ello, desde el Comité Organizador y la sección local de Asturias de la RSEF estamos trabajando con mucha ilusión para poder ofrecer a todos los asistentes un programa científico y académico lo más atractivo posible. Para ello contamos con la inestimable ayuda de los Grupos Especializados de la RSEF que han propuesto diversos simposios y ponentes de reconocido prestigio internacional para las sesiones plenarias. Asimismo, nos hemos propuesto incentivar la participación de estudiantes y jóvenes investigadores en formación a través de una rueda de intercambio reducida para todos ellos...

<http://bienalrsef-gijon2015.org/web/>

Organizadores

Real Sociedad
Española de
Física

CAMPUS DE EXCELENCIA
INTERNACIONAL
AL FUTURO

Universidad de
Oviedo

La radiación de fondo, casi a fondo

Álvaro de Rújula

Puedo escoger entre discutir el tema a la ligera: “Cuando descubrieron los primeros indicios de la radiación cósmica de microondas, Penzias y Wilson creyeron que se debían a una substancia dieléctrica blanca depositada sobre su antena, ya que New Jersey estaba plagado de palomas...”. O en plan más erudito. Cubrir el asunto del segundo modo me es imposible. Así que me limitaré a exponer los conceptos cosmológicos más fáciles e intentar explicar algunos de los más difíciles, dejándome mucho bagaje por el camino. Inútil para quién “ya lo sepa todo”, asaz denso y arduo para el que no.

La Radiación de Fondo (RF)

El universo se expande y enfriá. Pulsando \blacktriangleleft en el “video” de su evolución llegamos a una temperatura tal que la materia ordinaria era un plasma de electrones y núcleos, en equilibrio térmico con fotones. Parando y pulsando \blacktriangleright vemos cómo se ligan los primeros átomos, el universo se vuelve casi transparente y se liberan los fotones [1]. Tras unos 13.4×10^9 años de viaje, nos llegan hoy estos últimos como “Radiación de Fondo” (RF), a una temperatura $T_0 \approx 2.7$ °K. Las mediciones de su espectro (térmico, de Planck) son tan precisas que sólo en pantalla gigante sobresalen los errores de la línea teórica.

La figura 1a muestra la principal anisotropía de la RF, obtenida restando un fondo de temperatura media T_0 . Su máximo contraste es $\Delta T_0/T_0 \approx 10^{-3}$. Su forma dipolar y modulación anual prueban que se debe al movimiento de la tierra, dominado por el de la Galaxia, a $v/c \approx 10^{-3}$ [2] en el “sistema local absoluto” (¡sí!, lo hay) en el que la RF es máximamente isótropa. Substrayendo también el dipolo se observan las anisotropías intrínsecas de la RF (figura 1b), cuyos contrastes son $\Delta T_0/T_0 = O(10^{-5})$.

Las anisotropías se analizan en armónicos esféricos, $T(\theta, \phi) = \sum a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$ y se presentan como un “espectro de potencias” $P_l \equiv (2l+1)C_l/(2\pi)$; $C_l = \langle |a_{lm}|^2 \rangle$ (no habiendo una dirección privilegiada, todos los m son equivalentes). Las anisotropías más “potentes” subtienden ángulos $\theta_a \sim 1^\circ$, con picos “armónicos”, de apertura $\sim \theta_a/n$, con $n > 1$ entero, (figura 2). De estas y otras medidas se extraen los parámetros de la Tabla 1, que iré definiendo.

Polvo newtoniano

Consideremos el espacio tri-dimensional de la figura 3a, *homogéneamente* sembrado de “polvo” (o de galaxias). *Como si* resultaran de una explosión, la distancia entre ellas crece inicialmente con el tiempo. Tracemos una esfera que contenga un número fijo de galaxias, de radio $R(t)$, densidad $\rho(t)$ y masa total $M = (4\pi/3)\rho R^3$, claro, fija. Si la única fuerza entre las galaxias es la de la gravedad newtoniana (inversamente proporcional al cuadrado de la distancia), G la constante de Newton y \dot{R} la segunda derivada de R respecto a t , el movimiento de una galaxia “de prueba”, sita sobre la superficie de la esfera, está regido por la ecuación 1a ($F = ma$):

$$\ddot{R} \equiv \frac{d^2R}{dt^2} = -\frac{GM}{R^2} \quad (\text{a}), \quad \frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} = \frac{k}{2} \quad (\text{b}). \quad (1)$$

Multiplicando (1a) por \dot{R} e integrando en t se obtiene (1b), en donde vemos que la suma de las energías cinética y potencial es una constante, $k/2$. Para $k \geq 0$ y $R, t \rightarrow \infty$, la “velocidad” \dot{R} tiende a \sqrt{k} . Para $k < 0$, $R(t)$ recolapsa y, si sobrevive a la singularidad a $R = 0$, oscila.

Subsituendo M en (1b) y definiendo la constante (espacial) “de Hubble” $H(t)$ (con dimensiones $1/t$) tenemos:

$$H^2 \equiv (\dot{R}/R)^2 = (8\pi/3) G\rho + k/R^2. \quad (2)$$

El caso “crítico” ($k = 0, \dot{R} \rightarrow 0$) corresponde a una densidad precisamente sintonizada, tal que $\rho(t) = \rho_c(t) \equiv 3 H(t)^2/(8\pi G)$. Para engendrar un universo newtoniano crítico y finito nada gastaría un demiurgo: la energía total es $\propto k$ y, por ende, nula.

Adoptando la notación de los cosmólogos, definamos en (3a) una fracción Ω de ρ_c y reescribamos (2) como (3b):

$$\rho \equiv \Omega \rho_c \quad (\text{a}), \quad H^2(1 - \Omega) = 2 K/R^2 \quad (\text{b}). \quad (3)$$

Estaríamos sólo mareando la perdiz si ahorita nuestro universo no fuese, con mínimos errores, crítico: $\Omega \approx 1$.

En el “universo” de la figura 3a podemos situar al observador ahora y en el origen y no preguntar aún cómo medir la distancia $d = R$ a la galaxia de prueba ni su “velocidad de recesión” $v = \dot{R}$, obteniendo $v = Hd$ (la ley de Hubble) y motivando históricamente la notación.

Quién haya aprendido este capítulo presumirá de entender y ser capaz de deducir, con sus factores numéricos correctos, las ecuaciones básicas del Big-Bang “clásico”.

La constante cosmológica, Λ

El universo pre-Hubble parecía estático. La ecuación (1a) implica que no puede serlo: la gravedad lo colapsaría. Para intentar estabilizarlo —mala razón, genial intuición— Einstein añadió a sus ecuaciones de la *relatividad general* (RG) la constante **cosmológica**, Λ , la *única* modificación compatible con su principio de equivalencia local entre aceleración y gravedad. En lenguaje newtoniano las ecuaciones (1a) y (2) adquirirían un sumando proporcional a Λ :

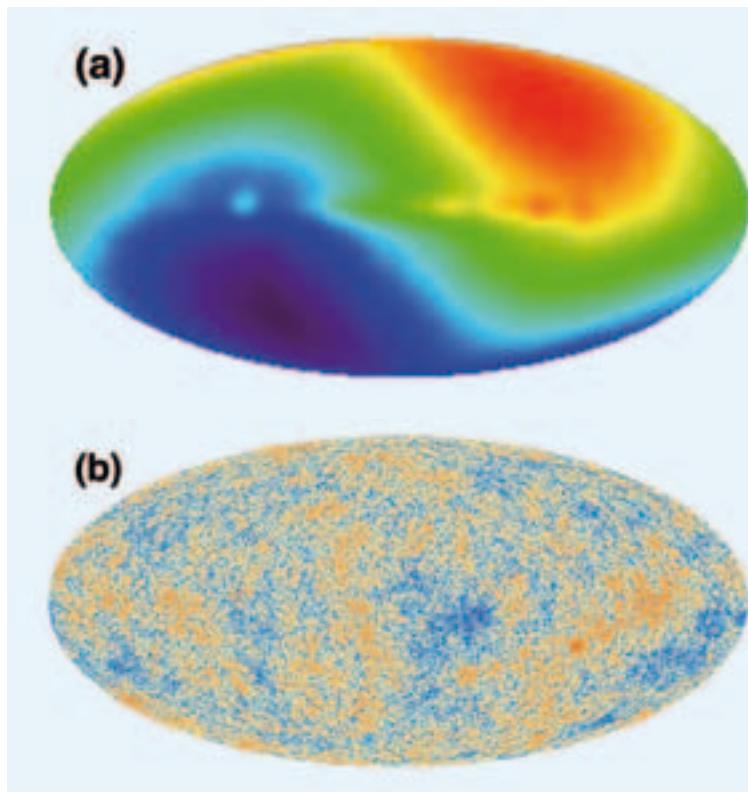


Fig. 1. Mapas de la “bóveda celestrial” en coordenadas esféricicas (θ, ϕ) . $\theta = \phi = 0$ apunta al centro de la Galaxia. El dipolo (a) y las irregularidades de la RF (b) con el dipolo y la radiación de la Galaxia substraidos (satélite Planck).

$$\ddot{R} = -G M/R^2 + \Lambda R/3 \quad (4)$$

$$H^2 \equiv (\dot{R}/R)^2 = (8\pi/3) G\rho + \Lambda/3 + k/R^2. \quad (5)$$

La primera reza que, si $\Lambda > 0$, hay una fuerza “antigravitatoria” proporcional a la distancia. La segunda traduce la interpretación actual de Λ : proporcional a la *densidad de energía del vacío*, $\rho_\Lambda \equiv \Lambda/(8\pi G)$, algo que, en contraste con ρ , ¡no cambia aunque el universo se estire! Si $\Lambda > 0$ dos “cachos” de vacío se repelen, más cuanto más distancia los separa. Habremos de verlo para creerlo.

Comprarse un libro de RG

Supongamos que uno se compra un libro carísimo de cosmología y RG. Después de empollárselo, ¿qué más aprende ese “uno”, con relación a lo anterior? Veamos:

Un universo homogéneo, “dominado por la materia” se rige por la ecuación (3), “de Friedman”, con $R(t)$ substituido por un factor de escala $a(t)$, que podemos escoger tal que k en (3b) sea $k=1, 0, -1$, correspondiendo a un espacio (tridimensional, 3D) cerrado, plano o abierto. Fácil de visualizar en 2D, como las de la *superficie* de la esfera de la figura 3b, sumergida en una tercera dimensión ficticia con la que dar un ejemplo de factor de escala. En este ejemplo, como en la tierra, la curvatura es observable sin salir de la superficie: los ángulos de un triángulo Madrid-Barcelona-Bilbao suman más de 180° . Y estas capitales también se alejan: *es el espacio entre ellas el que hoy se estira ($\dot{a} > 0$)*. Por idéntica razón las galaxias, aun si están localmente (casi) en reposo, se alejan entre sí. Ninguna capital

o galaxia está en el centro de nada: la superficie 2D no lo tiene.

El espacio —y el tiempo— nacen con el universo, cuya densidad de energía determina su evolución y geometría, cerrada y finita en el ejemplo 2D recién discutido. No se trata de una explosión en un lugar de un espacio preexistente. “Al Norte del Big Bang” es una cuchufleta.

El corrimiento hacia el rojo (redshift, z) no es un efecto Doppler ($z \approx v/c$), sino que la longitud de onda, λ , de un fotón (o el inverso del impulso de cualquier ente) se estira con $a(t)$ [3]:

$$\lambda_0/\lambda_e \equiv 1+z = y \equiv [a(t)/a_0]^{-1} \quad (6)$$

con λ_0 medida ahora y λ_e emitida a redshift z y tiempo t (para confundir, los cosmólogos ponen un subíndice 0 en cantidades referidas a “hoy”, como la edad del universo, t_0 , pese a que suene a inicio). Definiendo el observable $y(t)$ como un cociente, desaparece la arbitraria “escala del factor de escala”. Todas las frecuencias varían al unísono: un espectro caracterizado por un solo parámetro (e.g., la temperatura de la RF) mantiene su forma, con $T_0 = T_e/y$.

En cosmología “materia” es todo objeto “lento”, cuya energía es aproximadamente su masa. Sea ρ_m la densidad media de materia y ρ_m^0 su valor actual, correspondiente a una fracción Ω_m^0 de la densidad crítica medida hoy. Como la masa en un volumen V “comovil”—que se expande con el universo—es fija y, localmente, $V \propto a(t)^3$, la ecuación (6) implica que $\rho_m = \rho_m^0 y^3$. Dividiendo por ρ_c^0 , concluimos que $\Omega_m(y) = \Omega_m^0 y^3$.

El universo contiene también radiación (fotones). Su número en un volumen comovil V es fijo, así que, con el mismo razonamiento que en el párrafo anterior, concluimos que la *densidad numérica*, n_r , de los fotones satisface $n_r = n_r^0 y^3$. Pero la energía de cada fotón, $E \propto 1/\lambda \propto y$, se degrada, ya que su longitud de onda se estira, véase la ecuación (6). Así pues, la contribución de la radiación a la densidad de energía, ρ en la ecuación (2), varía como y^4 , no y^3 . Veremos que la contribución de la constante cosmológica es... constante: no depende de y .

Generalizando (3a), distingamos las contribuciones, hoy, a la fracción crítica de las densidades de materia, radiación y Λ : $\Omega^0 = \Omega_m^0 + \Omega_r^0 + \Omega_\Lambda^0$. Combinando la expresión (2) (con $R \Rightarrow a$) y (6) podemos escribir en la RG la evolución, dy/dt , y edad, t_0 , de un universo uniforme:

$$H(t)^2 \equiv -\frac{\dot{y}}{y} = H_0 \sqrt{\Omega_m^0 y^3 + \Omega_r^0 y^4 + \Omega_\Lambda^0 + (1-\Omega^0)y^2}, \\ t_0 = - \int_1^\infty \frac{dy}{\dot{y}(y, \Omega^0, \Omega_{m,r,\Lambda}^0)}, \quad (7)$$

con todo símbolo medido hoy, menos t e y , ver la Tabla 1. Las expresiones (6,7) son también la historia, $T(t) = T_0/y(t)$, de la temperatura de la RF o

de cuando, $t(y)$, se emitió una línea observada hoy con un redshift $z = y - 1$.

Es saludable resolver las ecuaciones (7) en casos simples. En un universo crítico [4] dominado por la materia [UCDM] (una buena aproximación del nuestro, que lo estuvo casi toda su vida) $\Omega_m^0 y^3$ rige la evolución (7)y

$$\text{UCDM: } \frac{1}{(1+z)} \equiv \frac{a(t)}{a_0} = \left(\frac{t}{t_0}\right)^{2/3}, H(t) = \frac{2}{3t}. \quad (8)$$

En el futuro, $a/a_0 \approx \exp[H_0\sqrt{\Omega_\Lambda^0}(t - t_0)]$, ya que ahora domina Ω_Λ^0 . La cosmología observational se irá exponencialmente al garete: sólo el supercúmulo local en el que estamos —ya “separado” de la expansión— será visible.

El rompecabezas cósmico

De las observaciones se obtiene la Tabla 1 (en unidades más razonables $1/H_0 \approx 14.6 \times 10^9$ años). Bien. Pero $\Omega_m^0 \approx 0.3 < 1$ y además la *materia ordinaria*, Ω_{mo}^0 , contribuye sólo $\sim 1/5$ de Ω_m^0 , el resto es una ignota *materia oscura*. Para colmo $\Omega_\Lambda^0 \approx 0.7$, la densidad de energía del vacío (que, por ende, no lo está) domina hoy el universo. Tampoco el que el universo sea crítico $|\Omega^0 - 1| < 0.007$ es una píldora fácil de tragarse, aunque usando la ecuación (3b) para inferir que es plano parezca más digestible.

Entendemos el universo a $t_{\text{NS}} \sim 1$ minuto, cuando se “núcleo-sintetizaron” a partir de protones y neutrones los núcleos de los elementos primigenios ${}^2\text{H}$, ${}^{3,4}\text{He}$ y ${}^7\text{Li}$ (llamados “primordiales” en la consuetudinaria anglotraducción al Spanglish). Sus abundancias observadas son las predichas. Créanme.

El enigma de la criticidad empeora con la evolución de $\Omega_k \equiv 1 - \Omega = 2/(aH)^2$ en la ecuación (3b). En un UCDM, se sigue de las ecuaciones (8) que

$$|\Omega_k(t_{\text{NS}})| = (t_{\text{NS}}/t_0)^{2/3} |\Omega_k(t_0)| \sim 10^{-10} |1 - \Omega^0| \quad (9)$$

Para que el universo sea hoy cuasi-crítico es necesario que en su niñez lo fuese con absurda precisión, como la de una bola que rodase sobre la cumbre de un tejado a dos aguas sin caerse a un lado. La inflación lo resolverá.

La materia ordinaria dejó de ser un plasma dominado por electrones y protones para “recombinarse” en un gas de átomos y liberar la RF, a $T_R \sim 0.3$ eV [5]. Ya que $T_0 \approx 2.7$ K $\approx 2.35 \times 10^{-4}$ eV, $y_R = T_R/T_0 \approx 1100$. En un UCDM, $t_R = t_0 y_R^{-3/2} \approx 3.8 \times 10^5$ años [6]. El que se observe $\Delta T_0/T_0 \lesssim 10^{-5}$ implica un problema causal —o “de horizonte”— como procedo a discutir.

En la figura 3b defino el “ángulo comóvil”, χ_{12} , entre dos puntos fijos: $a(t)$ varía, χ_{12} no. La luz viaja trazando en el intervalo $t_1 \rightarrow t_2$ una trayectoria en χ . Instantáneamente $c dt = a(t)d\chi$, luego $\chi(t_1, t_2) = c \int_{t_1}^{t_2} dt/a(t)$, como intento visualizar en la figura 3c. En función de observables (“distancias angulares” ahora), d_A :

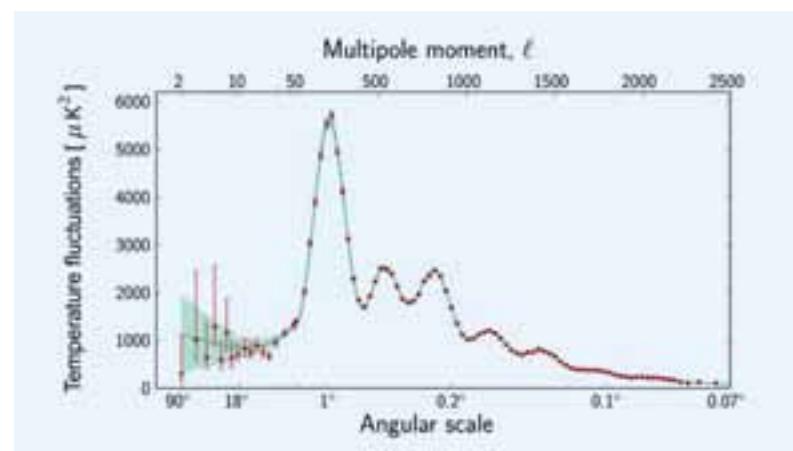


Fig. 2. Espectro de potencias medido por el satélite Planck.

A $t = t_R$ y desde el principio de los tiempos, el *horizonte de luz* (allí desde donde dio tiempo para que lleguen noticias a $v \leq c$) subtiende $\chi(0, t_R)$. Hoy, véase la figura 3c, tiene el mismo χ . La RF que hoy nos llega ha viajado $\chi(t_R \ll t_0, t_0)$. En un UCDM $a(t) \propto t^{2/3}$ y se obtiene:

$$d_A(0, t_R) = 3 ct_0^{2/3} t_R^{1/3}, d_A(t_R, t_0) \approx 3 ct_0 [> ct_0], \\ \theta \equiv \chi_R/\chi_0 = (t_R/t_0)^{1/3} = y_R^{-1/2} \sim 0.03. \quad (11)$$

Un observador (O en la figura 3d) mirando en dos direcciones opuestas ve RF casi a la misma temperatura. Y sin embargo, a $t \leq t_R$ y $v \leq c$ sólo las “pecas” rojas podían haberse “puesto de acuerdo”. Hoy el “horizonte” desde el que se emitió la radiación es el círculo azul. Parte de la que se originó en la peca 1 pasó por aquí hace tiempo. La de la peca 2 aún no nos llegó.

Siguiendo un gran círculo en la bóveda celeste, deberíamos ver $\theta^{-1} \sim 33$ pecas de temperatura distinta. Y no es así. Rehaciendo el anterior párrafo veríamos que el problema se agrava (!) en el caso estático, $a(t) = a_0$. Y se resuelve en el “superlumínico” $a(t) \propto t^\alpha$, $\alpha > 1$. Esta es la segunda pista inflacionaria que doy.

En el plasma anterior a t_R , dominado (numéricamente) por fotones, las ondas de presión se propagan a la velocidad del sonido relativista $c_s \lesssim c/\sqrt{3}$ (la desigualdad se debe a la inercia de los núcleos). El “horizonte acústico” a $t = t_R$ subtiende una distancia angular $\sim \chi_R c_s/c$. Si el plasma ha vibrado a $t < t_R$, el máximo de las consecuentes variaciones de densidad (y de la temperatu-

Tabla 1. Valores aproximados de algunos parámetros y resultados, en el modelo estándar de la cosmología (CDM)

H_0	67 km/s/Mpc	$\Omega_\Lambda^0 - 1$	< 0:007
ρ_c	$\Rightarrow 5$ protones / m^3	Ω_Λ^0	0.7
t_0	13.8×10^9 años	Ω_m^0	0.3
T_0	2.7255 K	Ω_{mo}^0	$\sim \Omega_m^0/5$
y_R	1100	Ω_r^0	5.510^{-5}

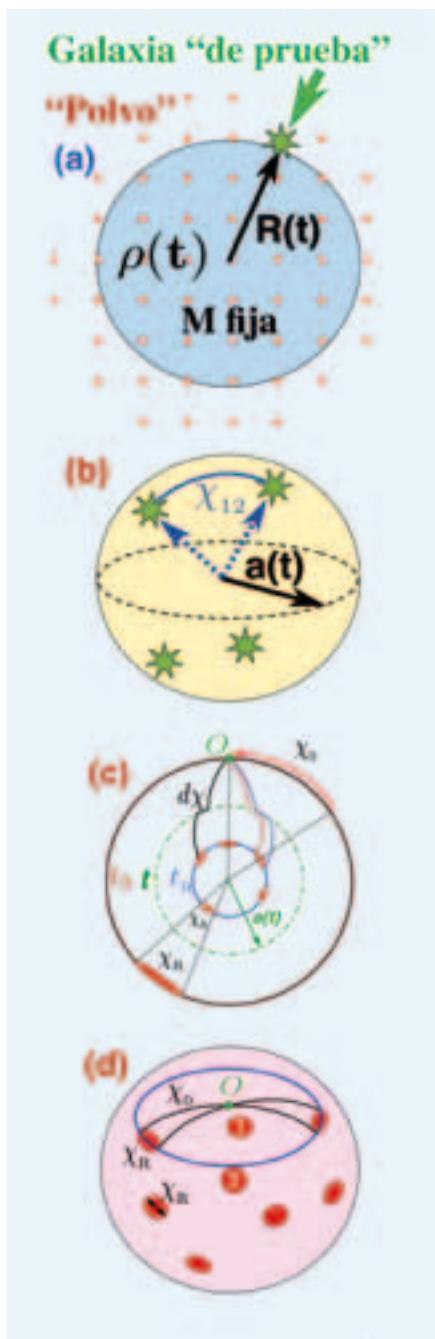


Fig. 3. (a) Big Bang newtoniano. (b) Universo espacialmente 2D (la superficie de la esfera). (c) Cómo viaja la luz. La “dimensión” radial es ficticia, como en (b). (d) Horizonte hoy (azul) y zonas causalmente conexas antes de la “liberación” de la radiación de fondo (las pecas rojas), en 2D.

es mucho mayor que el horizonte desde el que nos llega la RF, el círculo (azul). Como $a(R)$ creció tanto, la ecuación (3b) nos dice que $\Omega \rightarrow 1$: el universo es crítico y plano, las esferas de las figuras 3b, c, d se salen de la página. Durante la inflación la densidad de radiación, materia, monopolos magnéticos primordiales, *and what not*, se diluyó exponencialmente. No son necesarias la homogeneidad y geometría 3D uniforme que supusimos: como una sábana arrugada que uno estirase, la inflación lo “planchó” todo. Queda por ver cómo salirnos de ésta (la inflación).

Como el de Higgs, el “inflatón”, ϕ , sería un campo escalar (de espín 0) que impregnase el “vacío”. Su energía potencial de auto-interacción, $V[\phi]$, puede ser tan sencilla como $V = m_\phi^2 \phi^2 / 2$, con m_ϕ la masa del inflatón. $V[\phi]$ es una densidad de energía del vacío, correspondiente a una “constante”

de su radiación) debería corresponder a un ángulo $\theta_a \sim \theta / \sqrt{3} \sim 1^\circ$, con picos armónicos. Las observaciones, véase la figura 2, concuerdan bien con esta estimación. La línea (verde) de la misma figura es impresionante, aun siendo un ajuste con 6 parámetros. Corresponde al modelo estándar: Λ CDM ($\Lambda + \text{materia oscura fría}$). *Oscura* significa que interacciona sólo gravitacionalmente. *Fría*, que la temperatura de sus constituyentes es inferior a su masa. *Oscura* es, sobre todo, su identidad.

La hipótesis inflacionaria
La teoría de la inflación (de Starobinski, Guth, Linde, Steinhardt, Mukhanov...) consiste en dotar al universo de una $\Lambda(t)$ “dinámica”, que inicialmente domine su evolución y varíe lentamente con t : $\Lambda(t) \approx \Lambda$. La ecuación (5), con Λ dominante, es $H = \dot{a}/a = \sqrt{\Lambda/3}$. Su solución: $a_f = a_i \exp[H(t_f - t_i)]$, con $\{t_i, t_f\}$ el intervalo en que $\Lambda(t) \approx \Lambda$. El horizonte de la ecuación (10), a $t = t_f \gg t_i$, es $d_A(t_i, t_f) \approx cH^{-1} \exp[HT_f]$: tan “exponencialmente grande” como uno desee. Si, como veremos, la inflación es condición inicial de un Big Bang “clásico”... ¡se arregló todo!:!

El horizonte causal (una peca de la figura 3d, inflada)

cosmológica $\Lambda(t) = 8\pi G V[\phi(t)]$ —la inflación borra una posible dependencia espacial, $\phi(\vec{x})$; basta considerar $\phi(t)$. No deduzco la ecuación que rige la evolución de $\phi(t)$ en un espacio en expansión, que es intuitiva:

$$\ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + dV/d\phi = -\Gamma\dot{\phi}. \quad (12)$$

Con sólo el primer y tercer término, tenemos un oscilador —armónico si $V = m_\phi^2 \phi^2 / 2$. En $3H\dot{\phi}$, el 3 son las dimensiones espaciales, el resto una *fricción de expansión*, proporcional a la “velocidad” $\dot{\phi} \equiv d\phi/dt$. La otra fricción, $\Gamma\dot{\phi}$, refleja que ϕ puede estar acoplado a otros campos. Si las partículas que dichos campos describen son más ligeras que el inflatón, este se desintegaría en aquellas con una “anchura” Γ , el inverso de la vida media del inflatón.

Sin gran esfuerzo, los parámetros $\phi(t_i)$, m_ϕ y Γ pueden escogerse tales que, en la escala temporal H^{-1} , la “bola” $\phi(t)$ de la figura 4 ruede lentamente: $\ddot{\phi}$ y $\Gamma\dot{\phi}$ despreciables y $\Lambda(t) \approx \Lambda$. Y esto durante tantos “e-foldings” —factores e en $\exp[H(t_f - t_i)]$ — como las observaciones exijan. Pasado mucho tiempo ($\sim 100 H^{-1} \sim 10^{-32}$ s en casos típicos), la bola llega a la zona (b) de la figura y oscila, $\ddot{\phi}$ ya no es despreciable. Como para una bola cuyo rozamiento calienta la vasija en la que oscila, el valor medio de $|\phi(t)|$ disminuye ($\Gamma \neq 0$) y el universo se “recalienta” [7]: nacen el resto de las partículas, ya sean las del modelo estándar y la materia oscura, o sus ancestros.

Este escenario tiene un bonus más. El estado inicial es un campo en un sólo estado: su entropía es nula. Otro ahorro para el hipotético demiurgo. La pantagruélica entropía que el universo tiene (incluso en su diminuta fracción hoy visible) se generó espontáneamente.

Subrepticiamente he supuesto que $V[\phi = 0]$ es nulo o despreciable: $\Lambda \approx 0$ a la salida de la inflación. Caro pagaremos este despiste. La gravedad, como vimos y no como otras fuerzas, “sabe” de densidades de energía, como $V[\phi]$, y no sólo de diferencias de potencial. Podría haber añadido una constante a $V[\phi]$ y todo sería distinto.

Predicciones inflacionarias

Hemos aquí con un universo disparatadamente homogéneo. ¿De dónde provienen las irregularidades de la RF y las “estructuras”: planetas, galaxias etc.? La inflación responde a la pregunta, aunque en la evolución tardía y no-lineal la materia oscura juega un rol que no discutire.

El “horizonte inflacionario” es la máxima distancia, $d_F(t_1)$, a $t = t_1$, desde la que llegará información causal en el lejano futuro, $d_F(t_1) = a(t_1) \chi(t_1, \infty)$ en la notación de la ecuación 10 [8]. En un UCDM $d_F \rightarrow \infty$. Durante la inflación $a(t) = a(t_1) \exp[H(t - t_1)]$ y $d_A = c/H$ fijo! Verdadero horizonte: más allá de él nada llega.

Todo campo es cuántico y el inflatón no es una excepción. Como tal, puede fluctuar alrededor de su valor clásico, $\varphi(t) = \varphi_c(t) + \Delta\varphi(t, \vec{x})$, siendo φ_c el campo de la anterior sección. Muy *chapucamente* (los detalles son demasiados), φ , durante la inflación, está metido en una caja causal de dimensión fija d_A y la incertidumbre de Heisenberg implica $\sqrt{\langle \Delta\varphi(\vec{x})^2 \rangle} \sim d_A^{-1} \sim H$. Estas fluctuaciones se traducen en variaciones de $V[\varphi]$ y, por tanto, de la densidad de energía. Vistas en la RF, son pecas como las de la figura 3d, reinterpretadas ahora como fluctuaciones sobre un fondo uniforme. **¡Los más grandes entes observables nacieron como fluctuaciones cuánticas!** El “cuántico” implica que las irregularidades de la RF son, como las observadas, “gaussianas”: hay correlaciones entre dos direcciones... y no tres o más.

Hay “pecas”, como la 1 de la figura 3d, que traspasaron el creciente horizonte azul antes de las que vemos como RF. Estando más cerca que la fuente de la RF, las vemos más “viejas”. Si corresponden a excesos de densidad de materia—oscuro y ordinaria—han tenido tiempo (como los átomos en la recombinação) de separarse de la expansión global y llegar a ser galaxias, planetas y lectores de la REF.

La inflación correctamente predice que $\Delta\varphi(k)$ —la transformada de Fourier de $\Delta\varphi(\vec{x})$ —es $\Delta\varphi(k)^2 \propto k^{n-1}$, sin escalas privilegiadas y con $n \approx 1$. También la polarización lineal de la RF, correlacionada con las inhomogeneidades de temperatura, es la predicha.

La inflación también vaticina ondas gravitacionales primordiales, en principio observables. Serían el aldabonazo máximo para esta teoría. Hoy por hoy aun no está claro si han sido recientemente detectadas por BICEP2.

El agua-{fiestas cosmológicas}

El espacio relativista es tetradiimensional y un “suceso” sucede en un “punto” $x^\mu = (t, \vec{x})$. El “intervalo” entre dos puntos cercanos es $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$, con los índices repetidos sumados y g , en ausencia de gravitación, la matriz 4×4 diagonal $\text{Diag}\{1, -1, -1, -1\}$. En RG, la estructura del espacio-tiempo (la métrica, g) depende de las “fuentes” de gravedad que se hallen presentes. En un campo débil, por ejemplo, a una distancia r de una masa M , $g_{00} \approx 1 + 2GM/r$. De ahí que los GPS tengan esto en cuenta.

La fuente gravitatoria en RG es $8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$, con Λ ya definida y $T_{\mu\nu}$ el tensor de energía-impulso. Para un objeto de {energía, impulso} $p_\mu \equiv \{E, \vec{p}\}$, $T_{\mu\nu} = p_\mu p_\nu \delta^3[\vec{x} - \vec{x}(t)]/E$, con $\vec{x}(t)$ su trayectoria [9]. Einstein añadió Λ a $T_{\mu\nu}$, la única posibilidad compatible con la RG. Puede interpretarse Λ como una rareza de la RG, o como proporcional al $T_{\mu\nu}$ de un campo escalar que permea el vacío con una densidad de energía no nula. Aunque el factor de escala, $a(t)$ varíe, la métrica de un universo homogéneo, $g_{\mu\nu}$, no lo hace. Por ende, el término Ω_Λ^0 en la ecuación (7) no

varía con y . ¡La densidad de energía del vacío no se diluye con la expansión!

En unidades naturales $G = 1/M_p^2$, $M_p \approx 10^{19} \text{ GeV}$ [10]. Como G dicta la escala de las ecuaciones de la RG, cabría esperar que la densidad “natural” del vacío fuese $\rho_0 \sim M_p^4$. La consiguiente constante cosmológica sería $\sim 10^{120}$ veces la observada: $\Lambda_0 = 8\pi G \Omega_0 \rho_c$, ver la Tabla 1. Tras la inflación, el universo habría sufrido otras transiciones de fase, en las que ρ_0 cambió. Por ejemplo, el mecanismo de Higgs (y otros)—responsable de las masas de las partículas elementales—invoca una transición en la que el campo de Higgs evoluciona de manera parecida al inflatón de la figura 4. El correspondiente salto es $\Delta\Lambda[\text{Higgs}] \sim 10^{56} \Lambda_0$.

La densidad energética del vacío, tememos pues, habría dado saltos de “altura” colosal, para acabar aterrizando en su diminuto—pero no nulo—valor presente. Absurdo. Como frente al éter “newtoniano” del siglo XIX—que no era invariante relativista, a diferencia del “vacío” no vacío que he discutido—estamos en la inopia. Situación idónea para cualquier físico que goze de un empleo estable, aunque sea en una oficina de patentes.

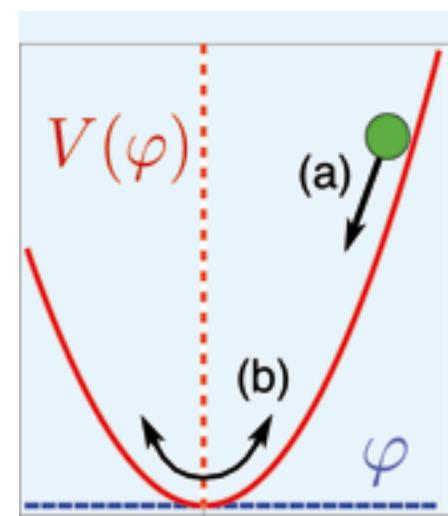


Fig. 4. Potencial y evolución del inflatón $\varphi(t)$. (a) Lento rodar inflacionario. (b) Oscilación y recalentamiento.

A. De Rújula acknowledges partial support from the European Union FP7 ITN INVISIBLES (Marie Curie Actions, PITN-GA-2011-289442). También agradezco a José Adolfo de Azcárraga sus pacientes comentarios, consejos y apoyo.

Notas

- [1] En esta “recombinación” electrones y núcleos de un mismo átomo se “separan” de la expansión, adquiriendo los átomos su dimensión fija con la que cotejar la aún creciente distancia entre ellos. Estrellas, galaxias, cúmulos y supercúmulos se han ido posteriormente “separando”.
- [2] Emplearé a veces unidades en las que la velocidad de la luz es $c = 1$. Un segundo (s) son 9192631770 períodos de la transición hiperfina del estado fundamental del ^{133}Cs . Como $c \approx$ un pie por nano-s, basta definir *exactamente* así “mi pie”, p , para que $c \equiv 1 \text{ p/ns}$, con gran ahorro de Pt, Ir y unidades (en las mismas se expresan energías y masas o tiempos y distancias). La definición del metro es análoga a la de mi p . También, con la constante de Boltzmann $k_B = 1$, la temperatura tiene unidades de energía, e.g. eV. Asimismo usaré una constante de Planck $\hbar \equiv h_p / (2\pi) = 1$: energías y tiempos inversos tienen las mismas unidades.

- [3] Un lector apasionado puede llamar τ_1 (τ_2) al período de una onda emitida (recibida) a $t = t_1$ (t_2) en la ecuación (10) y, a d_A fijo, comprobar esta afirmación.
- [4] Con $\Omega = 1$ evito que en el futuro ($y < 1$) domine $(1-\Omega)y^2$.
- [5] T_R es menor que la energía de ionización del H, E_B : el universo contiene unos 3×10^9 fotones por electrón y basta su "cola" térmica $\sim \text{Exp}[-(E_B/2)/T_R]$ para ionizarlo.
- [6] A $t < t_R$ el tiempo puede definirse en función de la temperatura o de la distancia media entre dos electrones, o como la cadencia de una reacción dada, e.g. $e\gamma \leftrightarrow e\gamma$. ¡O como el parámetro que relaciona estas y/u otras cosas!
- [7] "Re" en re-combinación de electrones y núcleos y en recalentamiento del universo quiere decir que es la primera vez que pasó. Los cosmólogos son como son.
- [8] Una discusión minuciosa de cómo las fluctuaciones cuánticas salen del horizonte inflacionario, se "congelan" y vuelven a entrar en el horizonte post-inflacionario y a evolucionar... requiere más espacio del que dispongo.
- [9] Moviendo un objeto o mirándolo desde distintos sistemas inerciales, vemos variar E y \vec{p} , pero con $p^2 = E^2 - |\vec{p}|^2 = m^2$ fijo. La masa es invariante. Usar $E = m$ —más conocida como $E = mc^2$ y falsa excepto en reposo— para concluir, con un juvenil Einstein, que "la masa aumenta con la velocidad" sería confundir = e ≡.
- [10] M_p es la "masa de Plank", quien introdujo parte de las "unidades naturales". Añadiendo $M_p = 1$ toda cantidad es un mero número, ¡cuanto ahorro en conversiones!



Álvaro de Rújula
Instituto de Física Teórica,
UAM-CSIC,
Theory Division, CERN

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/ Huélica 7
E-08940 Cornellà de Llobregat (Barcelona)

T: +34 93 668 43 11
F: +34 93 668 43 70
info.vacuum.bal@oerlikon.com
www.oerlikon.com/leyboldvacuum

oerlikon
leybold vacuum

El largo y sinuoso camino de la fibra óptica

José A. Martín-Pereira

Introducción

El 7 de julio de 1960, la Hughes Aircraft Company convocó una Conferencia de Prensa en el Hotel Delmonico, de Nueva York, para anunciar la realización del primer láser. En ella, su artífice, T. Maiman señaló las cinco aplicaciones para las que se estimaba que el nuevo descubrimiento podía ser una herramienta formidable. Una de las más significativas era la de lograr "un incremento significativo en el número de canales disponibles en comunicaciones".

Evidentemente no era el láser en sí el que, por sus características, iba a ser el único impulsor de ese incremento: era la luz que generaba la que sería la verdadera responsable de ese avance. Disponer de una radiación electromagnética, con una frecuencia varios órdenes de magnitud por encima de la de las microondas, hasta entonces protagonistas de los sistemas de comunicación, permitiría llegar a un nivel en el que millones de transmisiones podrían compartir canal y longitud de onda. Ese desplazamiento, desde las microondas a las radiaciones ópticas, aumentaría la frecuencia de la portadora en un factor de 100.000 con el consiguiente incremento de la capacidad del canal.

Esa posibilidad fue enseguida reconocida por las grandes industrias y compañías de comunicaciones y, con ellas, los laboratorios académicos que las daban soporte. La búsqueda de nuevos tipos de láseres, con mayor fiabilidad y mejores prestaciones que el inventado por Maiman, avanzó con un ritmo frenético a partir de entonces. Prácticamente la mayor parte de los tipos con los que se ha estado trabajando hasta el final del siglo xx fueron descubiertos en muy pocos años. De hecho, entre 1960 y 1965, la literatura existente muestra cientos de nuevas clases de láseres y múltiples variaciones de los mismos.

Pero aunque la introducción del láser fuera un factor imprescindible para el desarrollo de las comunicaciones, esta era una condición necesaria pero no suficiente. El otro factor que era imprescindible determinar era el medio a través del cual se llevaría a cabo la transmisión. La propagación a través de la atmósfera, en un camino análogo a como se estaban desarrollando gran parte de los sistemas de microondas, estuvo desde el principio descartado. Los principales problemas derivaban de los gradientes de temperatura del aire, así como de otros factores como la situación atmosférica o la contaminación. Por ejemplo, una diferencia de temperatura de 0,001 °K en un haz que tuviera 10 cm de diámetro y recorriera una distancia de 1 km sería suficiente para deflectarle una distancia igual a la de su diámetro. Llegó a estimarse

que la máxima distancia que podría alcanzarse, para obtener un 99 % de fiabilidad en la transmisión para cualquier tipo de condiciones atmosféricas, no podría sobrepasar de unos pocos kilómetros [1]. Y así, conjuntamente con los estudios sobre los nuevos láseres que se estaban creando, empezó una fuerte carrera por encontrar el medio más favorable como soporte de la transmisión. En esta carrera, los principales protagonistas fueron los científicos e ingenieros que trabajaban en las grandes compañías de comunicación. Este entorno será el objetivo central de las presentes líneas.

Propuestas y algunas soluciones previas

En la década de los cincuenta, bastantes años antes de que la propuesta de Kao viera la luz, dos batallas se estaban dando en el campo de la transmisión de radiaciones electromagnéticas. Por un lado se encontraba la que se desarrollaba en el entorno de las microondas. Por otro, la que buscaba transmitir luz e imágenes a través de un cilindro de material transparente. En la primera, las principales protagonistas eran las compañías telefónicas de ambos lados del Atlántico. En la segunda, un heterogéneo grupo de industrias que iban desde las que fabrican instrumentos para medicina a las que, por ejemplo, buscaban soluciones para enviar la imagen captada por el periscopio de un submarino.

Las microondas habían sido protagonistas de gran parte del avance tecnológico desarrollado en la Segunda Guerra Mundial. Si gracias a ellas pudieron implementarse los sistemas de radar que salvaron a Gran Bretaña de la invasión alemana, aún tenían pendientes varios problemas fundamentales. El primero era lograr un generador que emitiera a una longitud de onda que, cuando se transmitiera a través de la atmósfera, sufriera la menor atenuación posible. El segundo, conseguir un medio cerrado por el que pudiera transmitirse la radiación en tierra sin que tuviera contacto con el exterior. La solución del primer problema condujo, como ya es ampliamente conocido, al desarrollo por Townes del primer láser y, con ello, a poner la primera piedra para el nacimiento del



Fig. 1. Sir Charles Kuen Kao (Hong Kong, 1933).

láser. La solución al segundo dio lugar a un fructífero avance en la creación de guías de onda con los diseños más sofisticados y que, en su imagen más inmediata para un profano, se asemejaban a las cañerías de una complicada obra de fontanería. Todas las compañías telefónicas centraron su actividad principal de desarrollo en estas guías y nadie dudaba de que tendrían un futuro muy largo y, además, muy fructífero económico.

Por lo que se refiere a la transmisión de luz o imágenes por medio de tubos huecos o cilindros de vidrio, su historia de retrotrae hasta finales del siglo XIX [2]. De hecho, en 1881, William Wheeler patentó un sistema de iluminación de una vivienda, hoy ampliamente reproducido como curiosidad en muchos libros, y que gracias a un gran foco de luz situado en el sótano y mediante "cañerías" llevaba la luz a las diferentes habitaciones de la casa. Pero la verdadera historia de la transmisión

con miles de kilómetros entre ellas y, en muchos casos sin apenas problemas orográficos, en Gran Bretaña, y obviamente en el continente europeo, la situación era muy diferente. Las grandes distancias aquí no existían y el objetivo era enlazar entre sí núcleos urbanos próximos, con topografías intermedias muy complicadas y, de ser posible, extender ese tendido al interior de las ciudades.

En lo que todas las compañías coincidían era en la idea de que su objetivo no podía descansar en un transporte a través del aire. Y aquí empezaron a diferenciarse los planteamientos realizados a un lado y otro del Atlántico.

Los técnicos de la Bell y el resto de empresas de telefonía americanas, muy desde el principio, optaron por la idea que más se asemejaba a la del transporte de microondas a través de guías. El medio ideal por sus características era el aire, pero en un medio libre este podía perturbarse con la presencia de mínimos elementos atmosféricos, lluvia, niebla... u otros factores ya derivados del hombre, como la contaminación; la solución más fácil en consecuencia sería confinarlo a un entorno cerrado en el que todo pudiera ser controlado. Esto es, continuar con las guías de onda ya bien conocidas desde los años cincuenta.

La literatura de los años sesenta ofrece una muy amplia colección de propuestas, muchas de ellas presentadas por miembros de los equipos de los laboratorios de la Bell, aunque también los investigadores de la Standard Telecommunications Laboratories, Ltd, (STL) británicos, participaron en la carrera. Dos ideas fueron, en un principio, las que recibieron mayor atención: basar simplemente la transmisión en una conducción a través de un largo tubo con las paredes metalizadas para lograr una mayor reflexión o añadir al mismo una serie de elementos que fuerzan una transmisión lo más confocal posible. En una de las propuestas más referenciadas, la de C. C. Eaglesfield [3], del año 1961, se mostraba que un tubo hueco de una pulgada de diámetro y con una tolerancia de ± 3 mil, metalizado especialmente en su interior, podría transmitir "un número muy elevado de canales", con una atenuación por debajo de los 2,5 dB/milla, pudiendo permitir radios de curvatura de hasta media milla. Pero en esta propuesta, planteada muy próxima en el tiempo a la aparición de los primeros láseres de gas, pronto surgieron problemas derivados de los modos electromagnéticos que podían propagarse. Cada uno de ellos tendría unas características diferentes de propagación y, con ello, la posibilidad de ensanchamiento de los pulsos con su consiguiente solape; esto implicaba una fuerte limitación sobre la velocidad de transmisión.

Para soslayar lo anterior, se inició el planteamiento de nuevas soluciones basadas en tubos huecos equivalentes a los anteriores pero en los que se introducían una serie de estructuras con-

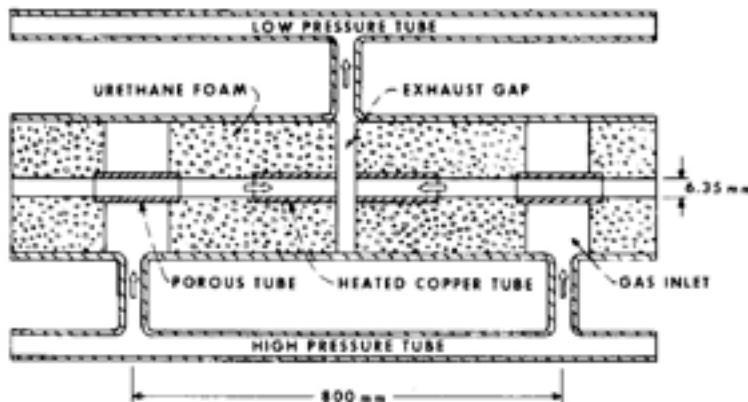


Fig. 2. Sección de una lente térmica de gas para guiado de radiación óptica.

de imágenes tuvo lugar esencialmente en muchos de los principales países europeos en los años previos y posteriores a la Segunda Guerra Mundial. Con los nombres de Lamm, Hansell, O'Brien, Hickset y algunos otros, pueden encontrarse un gran número de patentes en las que conductos de diferentes vidrios eran capaces de llevar luz para muy diferentes aplicaciones, desde iluminar la cavidad bucal en odontología a sistemas que ampliaban el tamaño de las pantallas de la recién nacida televisión.

Los años de las grandes guías bajo tierra

Igual que en todo problema físico, las condiciones de contorno determinan las soluciones y los resultados obtenidos en cualquier desarrollo que se lleve a cabo. Los dos grandes entornos en los que iba a desarrollarse la batalla por las comunicaciones ópticas, Estados Unidos y Gran Bretaña, tenían condicionantes muy distintos. En ambos eran las compañías telefónicas las que pujaban por llevar a cabo sistemas de transmisión basados en la luz. Pero mientras que en Estados Unidos la prioridad se daba a los grandes tendidos que enlazasen las ciudades de una costa con otra y a estas entre sí,

focales que impedirían la dispersión espacial del haz. Igual que antes, nuevos efectos perturbadores iban apareciendo según se hacían las primeras pruebas de campo. Mínimas irregularidades en las superficies del tubo, del orden de $\lambda/10$, acumulaban efectos de dispersión modal, igual que lo hacían variaciones del gradiente térmico del entorno, vibraciones del suelo donde estuviera enterrada la conducción y, como es lógico, inestabilidades de las lentes. Todo ello llevó a una solución que ya casi sólo fue adoptada por los laboratorios de la Bell: introducir gas en el interior de los tubos y diseñar lentes de gas específicamente diseñadas para este uso. Quizás la propuesta más elaborada, y ya con bastantes resultados experimentales que la respaldaban, puede verse en la propuesta de P. Kaiser, de 1969 [4].

Pero los laboratorios de STL, como se dijo antes, atendiendo a sus aplicaciones futuras de enlaces de pequeñas distancias y orografía complejas, empezaron a buscar otros caminos. Y a la vista de cómo los laboratorios de la ATT en Estados Unidos se estaban enfrentando al tema, con recursos ingentes, decidieron abandonar casi en su totalidad los desarrollos que llevaban a cabo en ondas milimétricas. Casi todo su personal se transfirió al naciente campo de las futuras comunicaciones ópticas. Con ello un gran número de expertos en electromagnetismo se encontró trabajando en torno a un margen de longitudes de onda diferente. Entre ellos se encontraba A. E. Karbowiak que llevaba ya cerca de diez años trabajando sobre la posibilidad de transmitir luz a través de un medio material, siguiendo la estela de las antiguas guías de luz y que, a la vista de los desarrollos americanos, estimó que la única solución factible sería con fibras ópticas.

Pronto Karbowiak contrató a un joven ingeniero chino, Charles K. Kao, que estaba realizando un doctorado "industrial" en la Universidad de Londres, mientras trabajaba en problemas prácticos en la STL, para que calculara las propiedades de las guías-ondas milimétricas multimodo. El tema no era muy atractivo para Kao que creía que gran parte del problema se encontraba en la transmisión multimodo y, en consecuencia, que posiblemente se resolvería pasando a monomodo. Karbowiak estimaba que el paso de las microondas a la luz se resolvería reduciendo las dimensiones de todo por un factor de 100.000. Conjuntamente con Kao contrató también a G. A. Hockham que se había graduado de la universidad hacía sólo dos años. Los fondos destinados al proyecto no eran muchos, pero la investigación se reduciría a la parte teórica, en principio no demasiado compleja. La realización real seguiría otro camino. La idea básica de Karbowiak era transmitir luz a través de delgadas películas del material adecuado (polietileno, entre otros) con lo que las dimensiones de la guía serían del orden de 0,2 μm de grosor y



1 cm de anchura. Según su incipiente teoría esta guía transmitiría solo un modo. Y ahí se quedó la idea, porque, a mediados de 1964, Karbowiak recibió una oferta muy atractiva económicamente para ir a la Universidad de Nueva Gales del Sur, en Australia. El tema y el grupo, de sólo dos personas, Kao y Hockham, quedó en manos del primero que, inmediatamente, decidió abandonar la guía plana y pasar, como algunos otros, a la fibra óptica recubierta, recogiendo la idea de aprovechar la reflexión total, planteada mucho antes por otros investigadores.

Y el primer sencillo cálculo que hicieron Kao y Hockham fue estimar qué propiedades debería tener la posible guía. Teniendo en cuenta la potencia de láser que se podría introducir a la fibra y la que debería salir para poder ser detectada adecuadamente, llegaron a la cifra mágica de que no debería absorber más de 20 dB/km. Esto es, que tras recorrer un kilómetro al menos el 1 % de la luz que había entrado llegase al otro extremo. Este sencillo número determinó todo su trabajo a partir de entonces.

Kao y Hockham se dividieron la tarea en dos misiones perfectamente definidas, que eran las que se correspondían con los entornos en los cuales la luz podría perder intensidad: las irregularidades en la guía, que podrían dar lugar a dispersión de la luz, y la transparencia de los materiales de los que se podría disponer. Hockham, más experto en ondas milimétricas, se centró en la primera, mientras que Kao se dirigió a la segunda. El trabajo del primero constituiría la parte fundamental de su Tesis Doctoral y se reflejó, además de en el modelo teórico, en la realización práctica de una serie de modelos a una escala muy superior a la real, en los que la experimentación resultaba más fácil. Algunos de ellos aparecerán en el artículo publicado en 1966 [5] y que luego se comentará.

Por lo que se refería al material, las cosas se tornaron bastante más difíciles. No había apenas nada en la literatura y los fabricantes de vidrio tampoco tenían mucha más información. De hecho, nadie había estudiado los límites fundamentales de la

Fig. 3. G. A. Hockham, coautor del artículo de 1966 con Kao, con los modelos de guías de microondas fabricados para comprobar su modelo.

transparencia del vidrio. Tampoco nadie había necesitado ese dato dado que a lo más que aspiraban los fabricantes de fibras de luz era a llevar ésta a una distancia no superior a unos cuantos centímetros. La atenuación que presentaban era del orden de 1 dB/m y eso era suficiente para sus fines. No era de extrañar el que todos los que habían intentado el camino de aplicarlas en comunicaciones lo hubiesen abandonado muy pronto.

La base de Kao, mucho más formado en el entorno del electromagnetismo que en las realizaciones empíricas de los fabricantes de vidrio, le llevó a tratar de encontrar qué expresiones podrían determinar lo que luego los experimentos deberían confirmar. Los tres factores que deberían estar presentes en las posibles ecuaciones serían: las reflexiones en las superficies, presentes sobre todo a la entrada y a la salida, el scattering de luz por los átomos del vidrio y la absorción de radiación óptica por estos.



Fig. 4. Charles Kao, en 1965, realizando una de las experiencias iniciales sobre fibras ópticas en los laboratorios de la Standard Telecommunication Laboratories en Harlow, Reino Unido.

En el problema del scattering pronto encontraron una expresión que les sirvió para empezar a andar. Algunos años antes R. D. Maurer, en la Corning Glass Works, había dado una fórmula que daba idea de su magnitud. Cuando la aplicaron a su estructura encontraron un número que les convenció de que su idea no era descabellada. Según el estudio de Maurer, las pérdidas por el scattering deberían ser del orden de 1 dB/km, para una longitud de onda de una micra.

Por lo que respecta a la absorción, todos los fabricantes de vidrio sabían, desde épocas históricas, que el principal origen de la transparencia era la cantidad de impurezas presentes en el material. Pero se ignoraba qué capacidad de absorción tendría el vidrio si se le quitaban todas las existentes. Lo que podía ser válido en la fabricación de lentes, en vidrieras o en fibras de luz, seguramente dejaría de tener sentido al aplicarlo a largas distancias. Las únicas palabras que le dieron ánimo para seguir en su camino fueron las del Profesor Rawson, del Instituto de Tecnología del Vidrio, de Sheffield, que le indicó que muy posiblemente,

cuando todas las impurezas se hubieran eliminado, la atenuación quizás llegase a los 20 dB/km. Esto significaba que las comunicaciones por fibra óptica podrían llegar a ser posibles.

Con todo lo anterior, Kao y Hockham decidieron juntar todas las piezas y empezar la parte empírica. Obtuvieron unas pocas fibras en STL con unos núcleos por debajo de las cuatro micras, en las que, a pesar de tener unas pérdidas muy altas, la luz roja de un láser de He-Ne obtenida a la salida mostraba una transmisión monomodo. Hicieron otras pruebas con un láser de semiconductor y con luz blanca y, tras probar los modelos de microondas de Hockham y ver su concordancia con lo obtenido, estimaron que las comunicaciones a través de fibras ópticas podían ser una realidad.

El 27 de enero de 1966 presentaron sus resultados en la sede de la Institution of Electrical Engineers, en Londres, y a continuación mandaron para su publicación un artículo con más detalles a los *Proceedings* del mismo IEE. El artículo [5] fue publicado en julio de ese año y constituye el artículo seminal de las comunicaciones ópticas a través de una fibra óptica. Los Laboratorios STL, ansiosos por adelantarse a sus posibles competidores, no esperaron ni a la presentación oral ni a la escrita para informar a la prensa de lo que habían obtenido. El 26 de enero remitieron una nota a la prensa en la que anunciaban que "Experiencias de transmisión a corta distancia sobre guías de fibra óptica han dado resultados positivos. Han mostrado una capacidad de transmitir información a una velocidad de un gigaciclo, lo que es equivalente a unos 200 canales de televisión o a más de 200.000 canales de telefonía". Sin dar muchos detalles del sistema en su conjunto, indicaban que "cuando estas técnicas se perfeccionen será posible transmitir una gran cantidad de información entre Europa y América a través de un único cable", lo que era imposible con las estructuras huecas que se estaban ensayando para las ondas milimétricas. Señalaban, lo cual era totalmente cierto, que los dispositivos usados no estaban aún disponibles comercialmente y que la comunicación a muy grandes distancias, a través del espacio, presentaba aún muchos problemas sin resolver.

La noticia, tanto la dada a la prensa como a los medios especializados, apenas tuvo eco. Algunas revistas muy de segunda fila mencionaron ese año las experiencias de Kao y ninguna de las de primera hicieron la más mínima referencia. Por ejemplo, en un número especial publicado en octubre de 1966 por los *Proceedings* del IEEE, y dedicado exclusivamente a los nuevos tipos de láseres y a sus posibles aplicaciones, en el artículo dedicado a la Transmisión Óptica, y escrito por S.E. Miller, de los Laboratorios de la Bell, se seguía indicando como única posibilidad de transmisión de luz a través de un medio confinado la realizada a través de tubos huecos con lentes en su interior, bien convencio-

nales o bien de gas [6]. Esta situación se seguía manteniendo varios años después y, por ejemplo, en la misma revista, en otro número especial de 1970, en esta ocasión ya dedicado específicamente a "Optical Communication", en el artículo de D. Gloger centrado en la transmisión óptica a través de guíaondas [7], las fibras ópticas aparecen en él con un protagonismo análogo al que se da a la transmisión a través de guías huecas con lentes en su interior.

¿Qué fue necesario para aclarar el camino?

Impulso final

Aunque Kao trató por todos sus medios de impulsar en STL el desarrollo de nuevos procesos para la fabricación de fibras ópticas con las características deseadas, su intento no avanzó a la velocidad deseada. Incluso su primer colaborador, Hockham, abandonó pronto el tema de las comunicaciones ópticas y se centró en el desarrollo de antenas, tema con el cual se sentía más familiarizado. A pesar de ello Kao llegó a realizar medidas basadas en muestras de sílice fundida con las que fabricó fibras de dióxido de silicio, SiO_2 , y en las que llegó a conseguir tener menos de una parte por millón de impurezas. Los resultados seguían siendo prometedores, pero los fondos necesarios para fabricarlas de manera continua no le llegaron. Los laboratorios de la Bell tampoco conseguían desvincularse de su línea de conducciones huecas. El empujón definitivo vino de una compañía totalmente desvinculada del campo de las comunicaciones: la Corning Glass Works.

Bob Maurer, cuyos cálculos hacía algunos años habían sido, como ya se ha visto, una de las bases para el impulso inicial de Kao, estimó que era el momento para que la Corning aprovechara el conocimiento que había acumulado durante muchos años. Estaba completamente convencido de que la sílice fundida era el material ideal, a pesar de que casi todos le evitaban por su reducido índice de refracción y por la temperatura tan alta que tenía de fusión. Pero Maurer estaba seguro de que podía ser el material en el que se podía conseguir una mayor pureza y además la Corning llevaba treinta años trabajando en él. Maurer, a su vez, llevaba con la sílice desde el año 1956.

La estrategia de la Corning se encaminó a estudiar todos los parámetros posibles de la sílice fundida y a integrar en su equipo a todos aquellos que estimó podían dar nuevas ideas. Sus dos piezas fundamentales fueron Peter Schultz y Donald Kerk. El primero se acababa de graduar en la Rutgers y el segundo, de recibir su doctorado en la Michigan State University. El canadiense Félix Kappron pronto se unió al grupo. Si éste se centraría en las dimensiones óptimas de núcleo y cubierta, los anteriores lo hicieron en el material. Todo su trabajo apenas tuvo contacto con el exterior, de acuerdo con la política de la Corning. Durante el

verano de 1967, un gran grupo de estudiantes realizaron sus proyectos de graduación bajo la dirección de Maurer, en torno a temas relacionados con las fibras de vidrio, tanto en el material, como en la forma de hacerlas lo más finas posible y en sus propiedades ópticas y mecánicas. Los resultados que podía alcanzar la Corning en todos estos temas estaban con toda seguridad muy por encima de lo que Kao podía conseguir en su laboratorio.

La historia de cómo el grupo fue probando técnicas y desechándolas a continuación es una verdadera odisea de pruebas y errores que podría cubrir varios capítulos en la historia de las Comunicaciones Ópticas. Toda ella se realizó casi en secreto, sin contacto con los otros grupos que trabajaban en el tema; nadie, de hecho, tenía la más mínima sospecha de cuál era la situación en la que se encontraban ni de qué resultados estaban teniendo.

Los resultados surgieron al principio del verano de 1970. Parece que un viernes por la tarde, encontrándose Don Keck sólo en el laboratorio, consiguió estirar un kilómetro de fibra que al enrollarse en un tambor se rompió en dos trozos. Tomó el de 200 metros y, estando seguro de que al volver el lunes la fibra se habría hecho mucho más frágil, aunque estaba solo, trató de hacer una transmisión de luz a su través. El resultado fue sorprendente con respecto a lo que se había conseguido en anteriores ocasiones. Tras enfocar el haz en el núcleo, un destello rebotó hacia el exterior, con una forma diferente de la del haz de entrada. La razón, según intuyó de inmediato, era que la luz había llegado a rebotar en el otro extremo componiéndose con la de entrada. Según se com-



Fig. 5. Nota de prensa dada en enero de 1966 por STL para anunciar los primeros desarrollos de una fibra óptica.

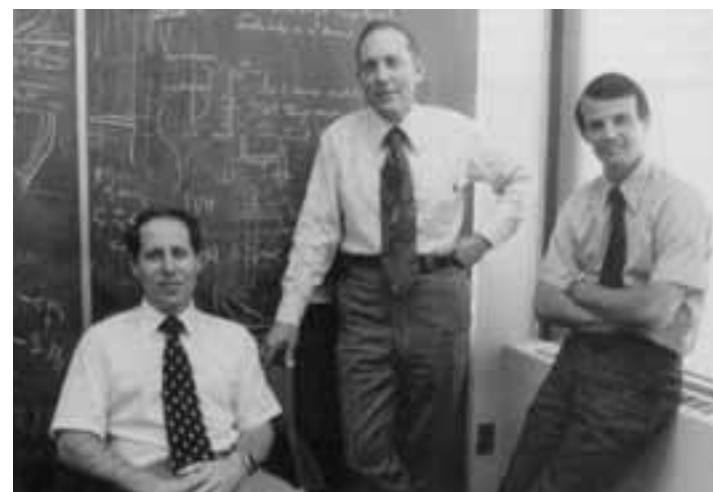


Fig. 6. Donald Keck, Robert Maurer y Peter Schultz, en los laboratorios de la Corning Glass Works, en 1970.



Fig. 7. Cubierta del libro de C. K. Kao, de 1982, sobre Sistemas de Fibra Óptica.

lo abogados de la Corning intentaron salvaguardar lo más posible su desarrollo. Maurer y Schultz presentaron el 11 de mayo una patente con las propiedades de una guía de sílice fundida [8] y Keck, otra también con Schultz sobre la fabricación de fibras [9]. Maurer a continuación escribió un breve resumen de lo obtenido para presentarlo en una conferencia que se celebraría en Londres a finales de septiembre, en la sede de la Institution of Electrical Engineers. Únicamente escribió que había obtenido unas pérdidas por scattering de unos 7 dB/km en fibras rectas, sin curvaturas, hecho que estaba dentro de lo que otros, como Kao, habían dicho.

La conferencia estaba destinada a mostrar lo que se estimaba era el futuro de las telecomunicaciones: la transmisión de ondas milimétricas a través de guías-ondas. Nadie vislumbraba ningún futuro para las fibras ópticas. Cuando Maurer presentó sus resultados de 16 dB/km, y que no había mencionado en el resumen que había enviado, muy pocos atendieron. Al final de la conferencia, casi todos mantenían la certeza en el futuro de las guías.

Pero pronto las cosas cambiaron. La Post Office británica pidió a Maurer comprobar los resultados experimentales y a partir de este momento el resto de las industrias que ya trabajaban en el tema se lanzaron al desarrollo de nuevas configuraciones. Pronto todas se dieron cuenta de que, además, existían dos problemas cuya solución no era fácil. Por un lado se encontraba el problema de introducir luz al núcleo de la fibra, así como la alineación entre dos fibras que se quisiera unir. Por otro, determinar en ellas el mejor diseño para lograr una mejor transmisión. Pronto se vio que, aunque las fibras monomodo eran las idóneas, introducir luz en ellas era un problema muy difícil con la tecnología de que se disponía. Los japone-

ses pronto encontraron una solución con fibras de gran diámetro de núcleo en las que se creaba un perfil de índice de refracción gradual. Curiosamente, este perfil de índice era el que presentaban las lentes de gas desarrolladas unos años antes y, gracias a ello, la teoría de propagación de un pulso de luz por ella pudo presentarse en pocos meses. Eran multimodo, pero la dispersión entre modos se hacía muy pequeña. La mayor parte de los fabricantes optaron por soluciones análogas a ésta y pronto las fibras multimodo comenzaron a dominar el mercado.

A partir de ese momento, la aventura de la fibra óptica ya discurrió por otros caminos. Nadie discutió su futuro y sólo quedaba sacar de ella el mejor resultado posible. Esa aventura llega hasta nuestros días.

Colofón

Muy pronto se encontró algo que era obvio: la sílice fundida presentaba unas propiedades que eran fuertemente dependientes de la longitud de onda que pasaba por ella. Y si por ella iba a transmitirse una radiación óptica con una cierta información, para que en su avance sufriera las mínimas perturbaciones, debería ser capaz de introducir una dispersión lo más reducida posible en la señal, conjuntamente con una baja atenuación. En 1975, el grupo de W. A. Gambling, en la Universidad de Southampton, encontró que a 1,27 μm el material presentaba una dispersión nula [10]. Este resultado era muy favorable para la transmisión debido al hecho de que próxima a esas frecuencias, si la sílice se dopaba ligeramente con algunos dopantes como GeO₂, se encontraba una zona de atenuación mínima. Es la zona que ahora se conoce como "segunda ventana".

Lo anterior disparó una carrera por encontrar la zona de trabajo más favorable para la transmisión de señales ópticas. Pronto se encontró que la sílice fundida también presentaba otro mínimo de atenuación alrededor de 1,55 μm y esa zona se denominó "tercera ventana". En su entorno se encuentran hoy la mayor parte de las comunicaciones.

En 1986, el mismo grupo de Gambling, ahora ya encabezado por David N. Payne, encontró una nueva posibilidad para que las fibras ópticas pudieran ser verdaderas protagonistas de las comunicaciones ópticas [11]. Dopadas adecuadamente con erbio podían convertirse en el elemento que faltaba para llegar a conseguir unas verdaderas comunicaciones ópticas, con la mínima intervención de electrónica posible. Son los actualmente empleados amplificadores de fibra dopada con erbio y que eliminaron a los repetidores usados hasta entonces, en los que la señal óptica debía transformarse a eléctrica para que pudiera ser regenerada y, tras ello, vuelta a convertirse en óptica. Si 1964 implicó un salto en la forma de transmitir señales, 1986 significó su asentamiento. Es de señalar que

si la ponencia de Maurer en 1970 fue el hito de la conferencia de ese año, aunque casi pasó desapercibida en ese momento, la de Payne en Brighton, en 1986, en el marco de la European Conference on Optical Comunicactions, ECOC'86, significó un nuevo jalón en este campo. Todos los asistentes quedaron/quedamos mudos ante lo presentado.

C. K. Kao siguió hasta 1970 en los laboratorios de la STL y ese año pasó a la Universidad China de Hong Kong para crear el Departamento de Ingeniería Electrónica y una serie de instituciones a su alrededor. En 1974 la ITT le contrató en sus laboratorios de Virginia y posteriormente pasó a los de Connecticut, compaginándolo con algunas clases en la Universidad de Yale. Siguió su colaboración con ITT hasta 1986 en donde alcanzó el puesto de Corporate Director of Research. En 1982 publicó un libro sobre sistemas de fibras ópticas [12]. En 196 páginas cubría todo el espectro de las comunicaciones ópticas desde la composición de los materiales hasta consideraciones económicas sobre el diseño de sistemas. El libro era como una visión general de este campo, quizás más para ejecutivos de las grandes compañías de comunicaciones que para los que trabajaban profesionalmente en este campo. No llegó a ver una segunda edición. Hacia 1987 volvió a la Universidad China de Hong Kong donde mantuvo su actividad hasta su jubilación en 1996. Entre 1997 y 2002 mantuvo una relación como profesor visitante con el Imperial College, de Londres, y durante esos años se le podía ver ocasionalmente por la Conferencia Europea de Comunicaciones Ópticas, ECOC. En el cambio de siglo, en una de las innumerables listas de personajes importantes que se confeccionaron en esos días, se señalaba a Kao como uno de los cinco personajes más importantes en Asia en los últimos cien años. Los otros cuatro eran Deng Xiaoping, Akira Kurosawa, Mohandas K. Gandhi y Akio Morita. En 2004 se le diagnosticó que sufría de Alzheimer y sus apariciones en público se hicieron más esporádicas. Cuando en 2009 recibió el Premio Nobel, fue su mujer la que leyó el discurso de recepción.

Referencias

- [1] W. A. GAMBLING, "The Rise and Rise of Optical Fibers", *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, núm. 6 (2000).
- [2] J. HECHT, "City of Light", Oxford Univ Press. 1999.
- [3] C. C. EAGLESFIELD, "Optical Pipeline: A Tentative Assessment", *Proc. IEE* (London), vol. 109b, pp. 26-32 (enero de 1962).
- [4] P. KAISER, "An Improved Thermal Gas Lens for Optical Beam Waveguides", *Bell. Sist. Tech. J.*, vol. 49, pp. 137-153 (enero de 1970).
- [5] K. C. KAO y G. A. HOCKHAM, "Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies", *Proc. IEE*, vol. 113, pp 1151-1158 (julio de 1966).
- [6] S. E. MILLER y L. C. TILLOTSON, "Optical Transmission Research", *Poc. IEEE*, vol. 54, pp. 1300-1311 (octubre de 1966).
- [7] D. GLOGE, "Optical Waveguide Transmission", *Proc. IEEE*, vol. 58, pp. 1513-1520 (octubre de 1970).
- [8] R. D. MAURER y P. C. SCHUTZ, "Fused Silica Optical Waveguide" (11 de mayo de 11 1970). Pat. U.S. 3.659.915.
- [9] D. B. KECK y P. C. SCHULTZ, "Method od Producing Optical Waveguide Fibres" (11 de mayo de 11 1970). Pat. U.S. 3.711.262.
- [10] D. N. PAYNE y W. A. GAMBLING, "Zero Material Dispersion in Optical Fibres", *Electronics Letters*, vol. 11, núm. 8. pp. 176-178 (17 de abril de 1975).
- [11] S. B. POOLE, D. N. PAYNE, R. J. MEARS, M. E. FERMANN y R. E. LAMING y J. LIGHTWAVE, *Tecnol. 4*, 870 (1986).
- [12] KAO, CHARLES K., *Optical Fiber Systems: Technology, Design, and Applications* (McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1982).



José A. Martín-Pereira
Profesor Emérito, Universidad
Politécnica de Madrid

Granada Seminar



25 YEARS OF GRANADA SEMINAR

June 15-19, 2015

In La Herradura, Tropical Coast of Granada, Spain

PHYSICS MEETS THE SOCIAL SCIENCES

Información detallada y constantemente actualizada en
<http://ergodic.ugr.es/cp/>

Descubriendo a Maxwell

Eloísa López y Claudio Aroca

En este número de la *REF* dedicado al Año Internacional de la Luz no podía faltar un recuerdo a James Clerk Maxwell, a quien debemos una de las grandes unificaciones de la Física. Antes de Maxwell había luz y había electricidad y magnetismo, después de Maxwell, la luz ya no es sino campos eléctricos y magnéticos propagándose a través del espacio.

Este artículo tiene dos partes, la primera es una introducción a la biografía y a las ideas de J. C. Maxwell. La segunda parte puede considerarse como una aproximación intuitiva a las ecuaciones de Maxwell desde el punto de vista de un físico veterano pero actual. Nuestra visión del mundo ha cambiado completamente desde la época de Maxwell. Ahora estamos acostumbrados a tratar con átomos, campos, fotones, etc... y nuestra aproximación a las ecuaciones de Maxwell es muy diferente.

Breve biografía de James Clerk Maxwell

Sin duda el siglo xix es el siglo del electromagnetismo, empezando por el descubrimiento de la inducción electromagnética por Michael Faraday en 1831. Faraday realizó numerosos experimentos sobre la producción de electricidad por el magnetismo y también tuvo la intuición de introducir en física la idea de campo. Faltaba que llegase James Clerk Maxwell (figuras 1 y 2) para descubrir la producción de magnetismo por campos eléctricos variables, dar a las ideas de Faraday una formulación matemática cuantitativa y establecer las ondas electromagnéticas, concluyendo que la luz es una onda electromagnética. A Maxwell se le considera el científico del siglo xix que más influencia tuvo en la física del siglo xx. En el centenario del nacimiento de Maxwell, Einstein escribió:

Antes de Maxwell los investigadores concebían la realidad física —en la medida en que se supone que representa los fenómenos naturales— como puntos materiales, cuyos cambios sólo consisten en movimientos que pueden formularse mediante ecuaciones diferenciales totales. Después de Maxwell se concibió la realidad física como representada por campos continuos que no podían ser explicados mecánicamente y que debían representarse mediante ecuaciones diferenciales parciales.

James Clerk Maxwell nació en Edimburgo el 13 de junio de 1831, dos meses después de que Faraday anunciase su descubrimiento de la inducción electromagnética. Fue el único hijo de una familia acomodada que pronto se trasladó a su finca en Glenair donde James pasó sus primeros años. Su padre estaba muy interesado en la tecnología, pero fue su madre quien se hizo cargo de la educación inicial del niño hasta que murió de cáncer cuando James tenía sólo ocho años.

A los diez años J. C. Maxwell empezó sus estudios de secundaria en la Academia de Edimburgo, donde hizo amigos que durarían toda su vida, como Lewis Campbell o Peter Guthrie Tait. En quinto curso empezó a destacar en geometría y ganó la medalla de matemáticas de la Academia por un trabajo sobre cómo se podía construir una curva oval perfecta me-

diante alfileres. Durante el sexto curso hizo un trabajo *Sobre la descripción de los óvalos y las curvas con multiplicidad de focos*, que fue leído en la Edinburgh Royal Society por James Forbes, profesor de la Universidad de Edimburgo.

A los dieciséis años, en 1847, ingresó en la Universidad de Edimburgo. Además de la especulación filosófica, a Maxwell le gustaba experimentar y Forbes, profesor de Filosofía Natural (o sea Física) le dejaba utilizar su laboratorio de física y química, donde hizo experimentos con colores y luz polarizada con aparatos construidos por él. En sus tres años de estudiante en esta universidad publicó dos trabajos, uno matemático, *On the theory of rolling curves*, y otro físico, *On the equilibrium of elastic solids*.

La estancia en la Universidad de Edimburgo era un paso para entrar en la de Cambridge, lo que hizo en 1850. En esa época, en la Universidad de Cambridge tenían el *Mathematical Tripos*, un sistema de exámenes, principalmente sobre matemáticas y física teórica, instituido a mediados del siglo xvii. El *Tripos* constaba de dos partes, la primera duraba cuatro días y los estudiantes que obtenían los mejores resultados pasaban a la segunda parte de cinco días. El estudiante con mejor calificación alcanzaba el rango de *Senior Wrangler* y, el segundo, *Second Wrangler*. Había todavía otra prueba de más categoría, el *Smith Price*. Casi todos los físicos británicos más importantes del siglo xix estudiaron en Cambridge y se examinaron de los *Tripos*. En octubre de 1851 James entró a formar parte del grupo de William Hopkins, tutor muy prestigioso pues sus estudiantes siempre conseguían los primeros puestos en estas pruebas. En enero de 1854 tuvieron lugar los *Tripos* y Maxwell fue *Second Wrangler* mientras que Edward Routh obtuvo el primer puesto. En el *Smith Price* compartieron el primer puesto.

Sus mejores amigos eran Peter Tait y William Thomson (futuro Lord Kelvin). Los tres, Tait, Thomson y Maxwell, mantuvieron toda su vida correspondencia sobre temas científicos y firmaban T (Thomson), T' (Tait) y dp/dt (Maxwell). Esto último se debe a que, en uno de sus libros, Tait enuncia la segunda ley de la termodinámica como $dp/dt = JCM$, iniciativas de Maxwell. Con T'' se designaba a Tyndall, de quien Tait

decía que T^{α} era una magnitud de segundo orden. Tenían otros seudónimos, como H para William Hamilton y H^2 para Hermann Helmholtz.

En Cambridge, Maxwell conoció el trabajo de Faraday *Investigaciones experimentales sobre electricidad*, que le impresionó mucho y escribió sobre ello:

Faraday nos enseña tanto sus experimentos fallidos como los exitosos, y sus ideas crudas así como las desarrolladas, y el lector, inferior a él en poder inductivo, siente simpatía más que admiración y está tentado a creer que, si tuviese la oportunidad, él también sería un descubridor.

En octubre de 1855, Maxwell, con veintidós años, fue nombrado *fellow* del Trinity College para dar clases de hidrostática y óptica. Poco después empezó a trabajar en su artículo *Sobre las líneas de fuerza de Faraday*, base de su teoría del Electromagnetismo. Para explicar el fenómeno de la inducción electromagnética, Faraday había introducido el concepto de estado electro-tónico generado por un imán o un circuito. Cuando cambia este estado por el movimiento relativo de ambos, imán o un circuito, se produce en el circuito una corriente eléctrica. Maxwell describió matemáticamente este fenómeno en su trabajo *Sobre el estado electro-tónico de Faraday*, utilizando geometría diferencial. Obtuvo una magnitud vectorial que describía el estado electro-tónico, escribiendo las tres ecuaciones de las componentes en los tres ejes espaciales para cada magnitud vectorial. Sus conclusiones aparecen en dos artículos que fueron leídos en la Cambridge Philosophical Society en diciembre de 1855 y febrero de 1856 respectivamente y publicados en sus *Transactions*.

Después de leer estos artículos, Faraday escribió a Maxwell:

Debes suponer que es un trabajo muy gratificante para mí y me da mucho coraje para reflexionar. Al principio estaba casi aterrorizado al ver tanta fuerza matemática hecha para sostener el tema y después maravillado al ver que el tema lo aguantaba tan bien.

Maxwell tenía veinticinco años y Faraday sesenta y cuatro.

En 1856 Maxwell obtuvo la cátedra de Filosofía Natural en el Marischal College de Aberdeen, donde estuvo 4 años. Allí se casó con Katherine Mary Dewar, hija del director del College. No tuvieron hijos y ella le ayudó en sus investigaciones sobre la teoría del color. Los resultados de estos trabajos están en el artículo *"Experiments of colour, as perceived by the eye, with remarks on colour blindness"*.

Conviene recordar también que Maxwell es uno de los pioneros de la física estadística. En abril de 1859 leyó el artículo *"Sobre la forma de movimiento que llamamos calor"*, de Rudolf Clausius,

publicado en 1857, y, en 1860, Maxwell publicó en el *Philosophical Magazine* el artículo *"Illustrations of the dynamical theory of the gases"*, donde introduce la función de distribución para las velocidades de las partículas y que es un clásico de la física estadística.

En 1860, antes de incorporarse a su nuevo puesto como profesor de Filosofía Natural en el King's College de Londres, recibió la medalla Rumford, distinción con la que la Royal Society premiaba descubrimientos importantes sobre calor y óptica. En Londres tenía menos carga docente y por tanto más tiempo para sus investigaciones. Asistía a las conferencias de la Royal Society y de la Royal Institution, donde conoció personalmente a Faraday, y siguió trabajando en los fenómenos electromagnéticos. El resultado de este trabajo es el artículo *"Sobre las líneas físicas de fuerza"* del que se publicaron dos partes en marzo y abril de 1861 en *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. Las partes 1 y 2 del artículo son *La teoría de los vórtices moleculares aplicada a los fenómenos magnéticos* y *La teoría de los vórtices moleculares aplicada a las corrientes eléctricas*. En su finca de Glenair, en el verano de 1861, siguió trabajando sobre el modelo de los vórtices y tuvo la idea de considerar un medio elástico y, así, identificar las fuerzas electrostáticas con las fuerzas provocadas por la elasticidad transversal de los vórtices. Llegó a la conclusión de que los fenómenos electromagnéticos se propagaban en ondas transversales y que la velocidad de propagación de estas ondas coincidía con la velocidad de la luz. Así, en 1861, escribe en una carta a Thomson:

Desarrollé las ecuaciones en el campo antes de tener sospecha alguna de la proximidad entre los dos valores de la velocidad de propagación de los efectos magnéticos y el de la luz. De forma que tengo motivo para creer que los medios magnéticos y luminosos son idénticos.

Estas ideas se publicaron en la parte 3 y 4 del artículo en diciembre de 1861 y febrero de 1862: *La teoría de los vórtices moleculares aplicada a la electricidad estática* y *La teoría de los vórtices moleculares aplicada a la acción del magnetismo*.



Fig. 1. J. C. Maxwell joven.

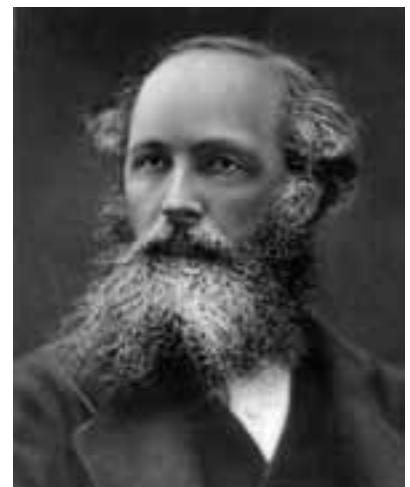


Fig. 2. J. C. Maxwell.



Fig. 3. Maxwell y su esposa, Katherine Mary.

En Glenair escribió dos libros, *Theory of Heat* (1871) y su gran *Treatise of Electricity and Magnetism* (1873), obra cumbre de la literatura científica. Tardó seis años en escribir las más de mil páginas de los dos volúmenes de este último libro, donde utilizó un riguroso tratamiento matemático. En él aparecen las ecuaciones en derivadas parciales del campo electromagnético. Uno de los fenómenos que predecía es la presión de la radiación. “*Por consiguiente, en un medio en el que se propagan ondas existe una presión normal a las ondas, y numéricamente igual a la energía por unidad de volumen*”. Y, a continuación, “*un cuerpo plano expuesto a la luz del sol experimenta esta presión solamente en su lado iluminado, y por tanto sería repelido del lado sobre el que cae la luz*”. En tiempos de Maxwell no se conocían las cargas eléctricas elementales y por tanto la naturaleza de la corriente eléctrica. Estudiando las leyes de Faraday de la electrólisis, Maxwell escribió:

De todos los fenómenos eléctricos, la electrólisis aparece como el más adecuado para suministrar un entendimiento real de la verdadera naturaleza de la corriente eléctrica, porque encontramos corrientes de materia ordinaria y corrientes de electricidad que forman parte esencial del mismo fenómeno.

Maxwell imaginó la existencia de moléculas de electricidad pero hasta 1897 no apareció la partícula elemental cargada, el electrón, descubierto por J. J. Thomson.

En 1871, Maxwell fue designado para la cátedra de Física Experimental de Cambridge, recientemente creada. Aceptó el puesto a pesar de reconocer su falta de experiencia en la docencia de la física experimental. Su primera tarea fue supervisar la construcción del laboratorio, financiado por William Cavendish, duque de Devonshire. Las clases empezaron a impartirse durante la construcción del laboratorio y en 1874, terminado el edificio, comenzó el trabajo experimental en el laboratorio

sobre la luz polarizada. Maxwell había llegado al concepto actual de campo: un ente físico cuya naturaleza no se evidencia mediante propiedades o características mecánicas, sino por su capacidad de almacenar y transmitir energía. Pero necesitaba tiempo para trabajar y, en 1865, renunció a la cátedra para volver a la finca de Glenair. “Ahora tengo mi tiempo completamente ocupado con experimentos y especulaciones de tipo físico, lo que no podía emprender mientras tenía deberes públicos”, escribía a C. B. Taylor.

Cavendish. Una de las primeras tareas fue la comprobación exhaustiva de la ley de Ohm. La mayoría de los estudiantes eran recién licenciados que querían investigar en física. Uno de ellos, Richard Glazebrook, cuenta en su libro sobre Maxwell:

No había clases regulares ni ejercicios establecidos de demostraciones dispuestos para un examen, eso vino después. En tiempos de Maxwell aquellos que quisieran trabajar tenían a su disposición el laboratorio y asistencia y ayuda en él, pero les dejaba bastante independencia para investigar sobre el aparato y los mejores métodos de usarlo.

Maxwell marcó una manera de trabajar en el laboratorio Cavendish que lo convirtió en un referente mundial y tuvo grandes éxitos científicos. Sus sucesores fueron J. W. Strutt (lord Rayleigh), J. J. Thomson y Ernest Rutherford, todos ellos ganadores de premios Nobel.

El 5 de noviembre de 1879, la misma enfermedad de su madre acabó con la vida de Maxwell a los cuarenta y ocho años de edad.

Una aproximación intuitiva a las ecuaciones de Maxwell

Cuando nos pidieron que escribiésemos un artículo sobre Maxwell nos preguntamos ¿de qué modo aparece Maxwell en la vida de los viejos físicos, que pasamos un bachillerato de seis años con reválidas, preuniversitario y selectividad?

Las cargas eléctricas, la electrificación por fraternamiento e inducción, los principios de la interacción entre cargas y el hecho de que no se podía separar el polo norte del polo sur de un imán aparecía en la enciclopedia que estudiábamos hasta el ingreso en el instituto.

Más tarde, en el bachillerato, nos decían que las cargas eléctricas creaban un campo que iba de las cargas positivas a las negativas y que disminuía con la distancia al cuadrado, por tanto no había posibilidad de realizar un trabajo con el campo electrostático. Lo del campo eléctrico nos parecía innecesario (todavía no sabíamos el significado de campo) y lo del trabajo, discutible: en un viejo libro habíamos visto el motor electrostático de Benjamin Franklin (figura 4) que funcionaba con cargas eléctricas. Sin embargo, Franklin era poco de fiar, libertino, revolucionario, masón, así que, quizás, lo de su motor tenía trampa. Teniendo en cuenta los malos antecedentes de Franklin y la posibilidad de suspender si no se usaba el campo eléctrico y si no se admitía el hecho de que no se podía obtener trabajo moviendo una carga eléctrica en el campo electrostático, lo que implicaba que no existían líneas de campo cerradas, tuvimos que aceptar que

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1)$$

Y, teniendo en cuenta la definición de rotacional, esto ya en la Facultad,

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (2)$$

Con el campo magnético las cosas eran muy diferentes, Ampère había encontrado que las líneas de campo magnético rodeaban a las líneas de corriente y que por tanto eran cerradas, esto es

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad (3)$$

Enseguida pensamos que si fuese posible encontrar una carga magnética de un solo polo tendríamos el motor eléctrico ideal, pero no era posible separar los polos del imán.

Había una esperanza, el campo creado por un conductor rectilíneo disminuía con la distancia, r , luego si colocábamos un imán en la dirección de r daría vueltas porque las fuerzas sobre cada polo eran opuestas pero de diferente módulo. Lo montamos y no funcionaba. Alguien con más conocimientos de mecánica nos miró con profundo desprecio y nos dijo "el par mecánico es siempre cero y es el par lo que hace girar los motores". Para hacer un motor eléctrico había que hacer algo similar al motor de Franklin, con polos magnéticos cambiando de signo. Cuando llegamos a este nivel de conocimientos ya habían pasado algunos años y lo de que Franklin fuese un libertino empezaba a ser interesante.

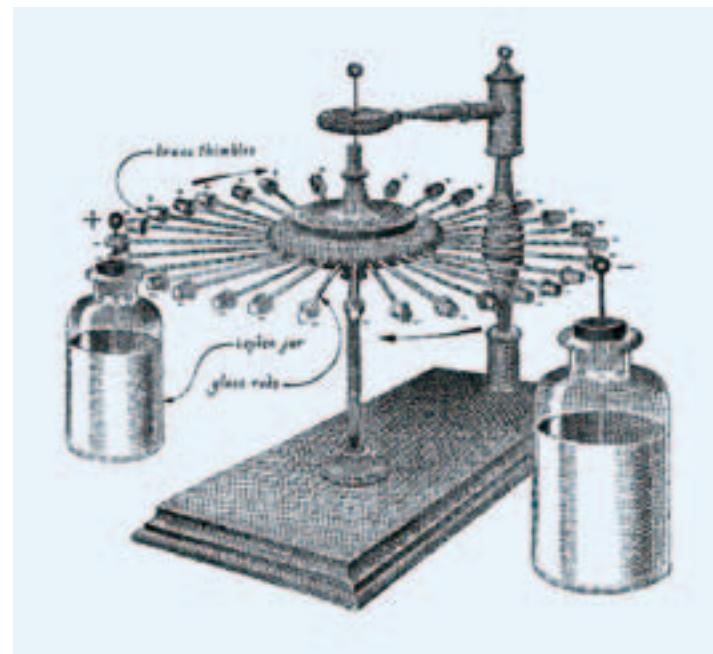
Después, en la universidad, nos definieron la densidad de corriente j y la expresión anterior se cambió por algo más general pero que en esencia era casi lo mismo

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint j \cdot d\vec{s} \quad (4)$$

y, teniendo en cuenta la definición de rotacional, se podía escribir:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (5)$$

El primer recuerdo de Faraday fue cuando estudiamos física y química en el Instituto. Un flujo magnético variable en el tiempo generaba fuerzas electromotrices en circuitos eléctricos. Había un signo menos, no debía de ser muy importante ya que sólo te quitaban algunos puntos en el examen si no lo ponías. Entendimos, al fin, como funcionaba una dinamo y un generador de tensión alterna, que era lo que teníamos en casa. Las radios y otros aparatos funcionaban con corriente continua, algo que parecía absurdo: pudiendo usar dinamos que daban corriente continua, utilizar alternadores para después rectificar la corriente. Cuando nos explicaron los transformadores, todo cobró sentido, Tesla había aparecido en nuestras vidas, pero sorprendentemente ni siquiera lo mencionaron. Aquella sociedad, y quizás todavía la actual siguiendo a Unamuno¹, Rector Perpetuo de la Uni-



versidad de Salamanca nada menos, consideraba que no merecía la pena mencionar a Tesla, porque al igual que Edison, eran simples inventores de cosas técnicas. Lamentablemente tardaríamos años en conocer a Tesla y admirarlo. Por cierto, siempre me he preguntado ¿hasta qué punto necesitaron ambos, Tesla y Edison, manejar las ecuaciones de Maxwell para sus desarrollos? Y ¿por qué Edison utilizó corriente alterna en uno de sus inventos, la silla eléctrica?

Después, en tercer año de licenciatura, el profesor Velayos hizo unas bellas demostraciones de cátedra, observando la corriente eléctrica en un circuito al variar el campo magnético que lo atravesaba o al deformar el circuito. Nos quedó muy claro que era la variación de flujo magnético lo que generaba la tensión eléctrica en el circuito.

A continuación situó una espira de cobre bastante gruesa y pesada sobre un núcleo magnético rodeado por un arrollamiento, hizo pasar una corriente por la bobina y el anillo salió disparado poniendo en serio peligro a los alumnos de la primera fila. De pronto se comprendía la importancia del signo menos. Entonces fue cuando entendimos cómo funcionaba el cañón electromagnético desarrollado por los alemanes (figura 5) durante la segunda guerra mundial, para conseguir proyectiles con velocidad inicial mayor que la de los gases de impulsión. Al final aquello se resumía en una simple expresión

taba interesado por la cultura española, había leído a Unamuno y le gustaba España. Ya siendo premio Nobel, en una de sus visitas a España estuvo en el laboratorio Rockefeller invitado por D. Blas Cabrera, con el que tenía buena relación e interés por sus resultados experimentales. D. Blas invitó a Unamuno a visitar el laboratorio y así presentarle a Heisenberg. Según contaba D. Salvador, Unamuno ignoró por completo al *pobre Heisenberg*.

Fig. 4. Motor electrostático de Franklin.

¹ El prof. Don Salvador Velayos, que fue discípulo de D. Blas Cabrera, nos contó una interesante anécdota. Heisenberg es-

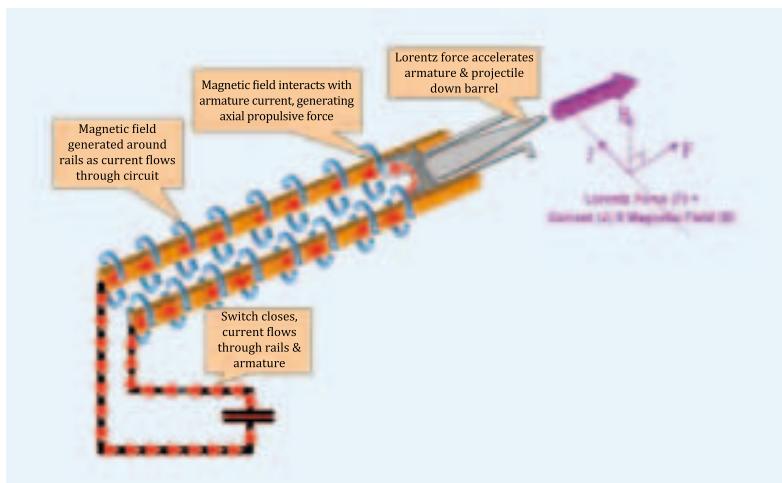


Fig. 5. Esquema de cañón electromagnético.

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

Maxwell aparece muy tarde, casi al final del curso de electromagnetismo del tercer año de la facultad. En algún curso anterior nos habían hablado de las ondas electromagnéticas y, para pasar los exámenes, era necesario abrazar varios artículos de fe:

1. No existía el éter (un tal Michelson, que era algo parecido a Santo Tomás en la física pero en sentido negativo, había demostrado su inexistencia).
2. Las ondas consistían en un campo eléctrico y otro magnético perpendiculares entre ellos.
3. Ambos campos estaban en fase.
4. La onda se propagaba en la dirección del producto vectorial del campo eléctrico por el magnético.

Pero la fe va perdiéndose poco a poco. Antes de Maxwell se manifestó Feynman con todo su esplendor en sus *Lectures on Physics* y, en su aparición, mostraba un experimento maravilloso: si se hace pasar una corriente creciente por un solenoide indefinido y situamos un carrusel con cargas eléctricas en torno al mismo, el carrusel se pone a girar impulsado por las cargas. Sobre las cargas actúa un campo eléctrico circular generado por el campo magnético variable. Se abrió la luz, un campo magnético variable generaba un campo eléctrico, y éste es el que genera la fuerza electromotriz que hace funcionar los generadores de tensión. Lo que sucedía era que

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (7)$$

Y, con la definición de rotacional,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

Al fin se entendía por qué el profesor Velayos se ponía tan pesado con la fuerza electromotriz. El motor de Franklin funcionaba mientras existiese carga en las botellas de Leyden. Para que funcionase de modo continuo se necesitaba un campo

electromotor que llevase cargas de una botella a la otra manteniendo su carga constante, esa era la trampa de Franklin.

Podría hacerse un motor eléctrico con la idea de Feynman. Era fácil, un solenoide con una barra de hierro en su interior y un cilindro metálico rodeándolo conectado a una fuente de alta tensión (figura 6). Si se hacía pasar una corriente eléctrica creciente por el solenoide se conseguiría un flujo magnético variable y por tanto un campo eléctrico circular alrededor del mismo. Aplicando una diferencia de potencial entre el núcleo y el cilindro metálico induciría cargas en el mismo que harían rotar al cilindro por la acción del campo eléctrico. Había algunos problemas de fácil solución, como sincronizar los campos eléctricos y magnéticos para que el cilindro se mantuviese dando vueltas y hacer una especie de jaula de ardilla para que girase el cilindro y no las cargas. Pero haciendo unos cálculos, con un campo eléctrico en el condensador de 20 kV/cm y un campo magnético variable de 2T/μs salía un par de milésimas de N.m. Claro, conseguir cargas elevadas en la superficie de un conductor con aire como dieléctrico es muy difícil, mientras que conseguir corrientes intensas es fácil. Lo mismo le había pasado a Franklin con sus motores electrostáticos, daban un par que no valía ni en los tiempos de la guerra de la independencia americana. No obstante, pese al fracaso tecnológico, el experimento hundía la bien cimentada fe en las ondas electromagnéticas. Si los campos eléctricos y magnéticos de las ondas eran armónicos deberían estar desfasados $\pi/2$, nunca en fase. Estas dudas se ampliaron cuando estudiamos a Maxwell. Los campos eléctricos variables crean campos magnéticos al igual que lo hacen las corrientes. Todo cuadraba, había una perfecta simetría, ¿por qué no habían contado antes que un campo eléctrico variable generaba un campo magnético? Todo era bastante simple, solo era preciso cambiar ligeramente la ley de Ampère

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint \vec{j} \cdot d\vec{s} + \mu_0 \epsilon_0 \iint \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (9)$$

o sea

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (10)$$

Viendo esta ecuación nos dimos cuenta de por qué tardaron tanto en hablarnos de este nuevo término, el factor era muy pequeño y el campo eléctrico debería cambiar muy rápidamente para que este efecto fuese perceptible.

Y, aún hay algo inquietante; si dentro de un condensador de placas circulares ponemos un imán con su momento magnético orientado en la dirección de un radio, aparecería un par mecánico que lo haría girar, mientras que si el imán se sitúa fuera del condensador, en la zona de campo magnético

creado por el conductor, no gira. ¿Alguien podría explicarlo?

Seguimos dándole vueltas a la ausencia de desfase entre el campo eléctrico y magnético en las ondas electromagnéticas propagándose en el vacío. El profesor hizo un poco de magia matemática con derivadas temporales y espaciales y, *voilà*, salieron los campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí, en fase y con un vector de Poynting en la dirección de propagación de la onda. Fuimos capaces de repetir sin equivocarnos la deducción, pero seguía faltando algo. Matemáticamente todo era correcto, los campos eléctricos y magnéticos eran perpendiculares, el vector de Poynting tenía unidades de potencia partido por superficie y un buen significado físico. Si se calculaba su flujo a través de la superficie de una resistencia recorrida por una corriente alterna, los vectores \vec{E} y \vec{B} eran perpendiculares y su flujo medio coincidía con la potencia media disipada. Cuando se hacía el cálculo para condensadores y autoinducciones los campos eran perpendiculares pero desfasados $\pi/2$, luego la potencia media aportada era cero. Si construimos un circuito oscilante L C, el flujo pasaba de un elemento al otro y viceversa. ¿Dónde encontrar la intuición? Naturalmente en el campo viajero de Feynman, en *Lectures on Physics*, una superficie indefinida súbitamente recorrida por una densidad superficial de corriente \vec{k} crea un campo magnético uniforme cuyo frente se propaga con velocidad v , y, al propagarse, va creando campo donde no lo había y por tanto, aun siendo el módulo de B constante, produce una variación local de campo que crea un campo eléctrico, que, siguiendo a Maxwell, ocupa todo el espacio llenado por B y es perpendicular a B , su módulo es $E = B v$ y se propaga generando un campo magnético compatible con el anterior $B = \epsilon_0 \mu_0 E v$, luego $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.

Un campo magnético armónico genera un campo eléctrico desfasado $\pi/2$ y viceversa, pero no es necesario un campo magnético variable, también se puede producir una variación de campo en el espacio si éste se llena de un campo que se propaga. En este caso los campos \vec{E} y \vec{B} están en fase, ya que el campo no tiene que variar temporalmente. Todo empezaba a cuadrar. Naturalmente en medios disipativos se producían atenuaciones en ambos campos y aparece un desfase, los campos se hacen temporalmente variables. En las ondas esféricas o cilíndricas los campos disminuyen con la distancia para conservar la energía y por tanto de nuevo hay un desfase entre el campo eléctrico y magnético.

Volvamos a la f.e.m., las líneas del campo electrostático son abiertas, lo que nos permitía definir el potencial eléctrico pero, a veces, el campo eléctrico tiene líneas cerradas, que en principio, nos impedirían definir el potencial eléctrico. Para solucionar el problema tenemos el campo electromotor

y la susodicha f.e.m. Pero en el caso del campo eléctrico las cargas eléctricas positivas y negativas son separables, y el campo creado por ellas es nulo dentro de una superficie esférica cargada, como demostró Cavendish, por lo que el campo creado por una carga es radial y varía con el inverso del cuadrado de la distancia. Con estas premisas era fácil demostrar que el flujo del campo eléctrico creado por una distribución de carga a través de una superficie cerrada era constante luego

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (11)$$

o, utilizando la densidad de carga y la definición de divergencia

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (12)$$



Fig. 6. Esquema de ¿motor electromagnético?

¿Qué pasaba con el campo magnético? ¿Por qué no hacer lo mismo que con el campo eléctrico? El campo creado por los polos de un imán cumple los mismos requisitos que el campo creado por las cargas eléctricas, es radial y disminuye con la distancia al cuadrado. El único problema es que no se pueden separar los polos positivos de los negativos. El hecho de que los polos no fueran separables se podía resumir en:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (13)$$

Posteriormente la teoría atómica nos permitió escribir

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (14)$$

No es igual que con el campo eléctrico porque no podemos separar las cargas, pero podemos trabajar con un potencial magnético escalar, de hecho los que trabajamos con materiales magnéticos lo hacemos constantemente, porque también hay campo magnético que tiene líneas abiertas y el único problema es que no podemos tener corrientes magnéticas siguiendo las líneas de campo.

En resumen, ya llegamos a las ecuaciones de Maxwell, cuatro ecuaciones diferenciales que relacionan los campos eléctricos y magnéticos \vec{E} , \vec{B} con las cargas y las corrientes ρ y \vec{j}

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (16)$$

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (18)$$

Siendo ϵ_0 y μ_0 la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética del vacío respectivamente. La primera consecuencia de estas ecuaciones es que si consideramos el medio desprovisto de cargas y corrientes en esa región del espacio (ρ y \vec{j} nulas), se deduce fácilmente que los campos \vec{E} y \vec{B} verifican

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \nabla^2 \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (19)$$

Que son las ecuaciones de ondas que se propagan con la velocidad $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, que coincide con la velocidad de la luz en el vacío. Además \vec{E} y \vec{B} son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección de propagación, como supuso Fresnel que debían de ser las ondas luminosas para explicar la polarización de la luz.

A la vista de estos resultados, Maxwell proclamó en 1867 su convicción de que la luz es una onda electromagnética.

Bibliografía

- [1] GABÁS MASIP, NOEL, *La naturaleza de la luz Maxwell* (Editorial Nivola, 2012).

- [2] CLERK MAXWELL, JAMES, *Escritos científicos*, edición de José Manuel Sánchez Ron (CSIC, Madrid, 1998).
- [3] SÁNCHEZ DEL RÍO, CARLOS, *Los principios de la Física en su evolución histórica* (Editorial de la UCM, Madrid, 1986).
- [4] FEYNMAN, RICHARD P., LEIGHTON, ROBERT B. y SANDS, MATTHEW, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley Publishing Company, 1977).



Eloísa López
Universidad Complutense
de Madrid



Claudio Aroca
ETSI Telecomunicación (ISOM)
Universidad Politécnica
de Madrid

Calidad a la medida



Fabricación de cámaras, componentes y sistemas de vacío a la medida de sus necesidades.
Suministro de componentes standard de vacío.
Soldadura Electron Beam Welding y Brazing.

Ingeniería y asistencia técnica.

TRINOS Vacuum-Projects, S.L
Parque Empresarial Táctica
c/ Velluters, 17
46988 Paterna (Valencia)
España
Tlf: (+34) 96 134 48 31
Fax (+34) 96 134 48 30
comercial@vacuum-projects.net

En los límites de la difracción: superresolución y apodización en sistemas ópticos

Implementación en moduladores LCD

María J. Yzuel, Juan Campos, Juan C. Escalera y Andrés Márquez

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando las ondas se propagan y se encuentran con un obstáculo. Se trata de un aspecto fundamental en Óptica, ya que todos los sistemas ópticos están afectados por la difracción, produciendo en general dos efectos desfavorables. Por un lado produce un ensanchamiento de los haces a lo largo de su propagación. Por otro lado, limita el tamaño mínimo posible del haz al ser enfocado. A lo largo de los años, ha habido multitud de intentos de mejorar o reducir estos inconvenientes tanto en la difracción de campo lejano como también en la de campo cercano. En este artículo nos centraremos en el estudio de los límites impuestos por la difracción de campo lejano, y especialmente en el segundo problema que explicábamos antes: cómo mejorar el poder resolutivo o de una manera más general, la respuesta tridimensional de un sistema, ya que nosotros estamos especialmente interesados en sistemas ópticos como formadores de imagen. En segundo lugar mostraremos el uso de los moduladores espaciales de luz basados en cristal líquido (LC-SLM) para crear filtros de transmisión y/o fase no uniforme y también la generación de elementos ópticos difractivos orientados a formación de imagen. Mostraremos resultados experimentales que cubren un amplio abanico de posibilidades ofrecidas por el uso conjunto de los filtros mencionados y de los dispositivos LC-SLM.

Introducción

En la resolución aprobada por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 20 de diciembre de 2013 se proclama que el 2015 sea el año internacional de la luz y las tecnologías basadas en la luz, reconociendo su importancia para la vida de los ciudadanos del mundo y para el desarrollo futuro de la sociedad mundial en muchos niveles. En dicha resolución se observa que el año 2015 coincide con los aniversarios de una serie de hitos importantes de la ciencia de la luz, entre ellos el trabajo sobre la óptica de Ibn-Haytham en 1015, la noción del carácter ondulatorio de la luz propuesta por Fresnel en 1815, la teoría electromagnética de propagación de la luz formulada por Maxwell en 1865, la teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico en 1905 y de la incorporación de la luz en la cosmología mediante la relatividad general en 1915, el descubrimiento del fondo de microondas del cosmos por Penzias y Wilson y los logros alcanzados por Kao en la transmisión de luz por fibras para la comunicación óptica, ambos en 1965.

En este artículo queremos celebrar el 200.^º aniversario de la propuesta de Augustin Jean Fresnel (figura 1) del carácter ondulatorio de la luz y hacemos mención especial a su validez para interpretar la formación de imagen en sistemas ópticos mostrando la vigencia de la Teoría de la Difracción en cuestiones actuales de la óptica y la fotónica.

Las vicisitudes por las que pasó el entendimiento de la naturaleza de la luz, dieron lugar a dos planteamientos, uno mecanicista apoyado por Newton y otro ondulatorio propuesto por Huygens [1]. Antes de Huygens, Grimaldi [2] había observado algunos fenómenos que no se podían explicar con los principios de la reflexión y la refracción. Observó que los límites de las sombras no eran nítidos. Pero no fue hasta el siglo XIX cuando se retomó con autoridad el concepto ondulatorio de la luz cuando Young anunció la superposición de ondas [3] y pocos

años más tarde Fresnel anunció el carácter ondulatorio de la luz y en su memoria pudo explicar satisfactoriamente algunos experimentos de difracción [4].

El teorema de Huygens en el que plantea que “cada elemento de un frente de onda se puede ver como centro de una perturbación secundaria que da origen a onditas esféricas y que la posición del frente de ondas más adelante es la envolvente de las onditas” fue ampliado por Fresnel y condujo a la formulación del principio de Huygens-Fresnel que ha tenido una gran importancia en el desarrollo de la teoría de la difracción y que se puede considerar como el postulado básico de la teoría ondulatoria de la luz.

La presentación del trabajo de Fresnel al Premio de la Academia de Ciencias de Francia fue fuertemente rebatida, pero el que Arago, Presidente del Comité, comprobó experimentalmente la predicción de Fresnel de que podría haber luz detrás de un obstáculo, le valió la concesión del premio a Fresnel. En muchos textos [5-7] hay introducciones que explican muy bien la revolución que supuso la contribución de Fresnel y el impulso a líneas de óptica ondulatoria como son la difracción y las interferencias. Fresnel también anunció el fenómeno de la polarización de la luz y tienen su nombre las fórmulas de Fresnel que explican las amplitudes de la luz reflejada y refractada en una superficie que separa a dos dieléctricos isótropos. Estas fórmulas fueron obtenidas por Fresnel en 1823 de una forma menos general de lo que hoy las conocemos. El ingenio de Fresnel se aplica también a la polarización y diseña el conocido como rombo de Fresnel [7] de vidrio y que mediante dos reflexiones totales convierte luz polarizada lineal en luz polarizada circular o elíptica, que también puede usarse en modo inverso.

Fresnel tuvo que introducir en la teoría que propuso para explicar la difracción y al tratar de explicar también la propa-



Fig. 1. Augustin Jean Fresnel (1788-1827).

Sommerfeld eliminó alguna de las hipótesis contradictorias y estableció la teoría de Rayleigh-Sommerfeld. Con los avances en estos dos siglos, desde el anuncio de Fresnel (1815) de la luz como onda, sigue vigente la teoría escalar de la difracción para estudiar la mayor parte de los fenómenos.

Con estas bases planteamos este artículo, en el que tratamos especialmente el efecto de la difracción en sistemas ópticos formadores de imágenes.

La imagen dada por un sistema óptico no es perfecta ni aun cuando no existan aberraciones, debido al tamaño finito de la pupila del sistema (difracción). Uno de los primeros trabajos sobre la difracción de un sistema óptico fue realizado por Airy [8] en 1835, quien halló la solución analítica, basada en las funciones de Bessel, de la figura de difracción en el plano paraxial dada por un instrumento libre de aberraciones y pupila circular. Naturalmente, un sistema óptico, en cuanto a la formación de imágenes, además de la difracción, presenta el efecto de las aberraciones, y por ello comenzaron a aparecer trabajos sobre la influencia de las aberraciones en la calidad de la imagen y diferentes criterios para establecer las tolerancias a las aberraciones que eran admisibles en un sistema óptico. Uno de los primeros trabajos en este sentido es el de Lord Rayleigh [9], quien postuló que la imagen de un punto (PSF, Point Spread Function) dada por un sistema óptico no sería significativamente diferente de la del sistema perfecto si el frente de onda (no esférico) puede estar contenido entre dos frentes de ondas esféricos separados menos de un cuarto de la longitud de onda. Strehl [10] señaló cómo las pequeñas aberraciones reducen la intensidad en el máximo principal, y formuló como medida de degradación de la calidad de la imagen el cociente entre la intensidad en el máximo de la imagen con y sin aberraciones (razón de Strehl). El límite del cuarto de onda se corresponde a un valor de la razón de Strehl de 0,8. Dado el limitado número de casos que pueden tratarse de forma analítica

gación rectilínea de la luz, algunas hipótesis forzadas que fueron replanteadas en los siguientes 100 años por científicos como Kirchhoff, que dio una base matemática más sólida a la ideas de Huygens y Fresnel, y Maxwell, que identificó la luz como una onda electromagnética y planteó las ecuaciones que rigen el campo electromagnético. La formulación de Kirchhoff es una primera aproximación que supuso el poder explicar los resultados en la mayor parte de los casos. Som-

y la complejidad de sus cálculos, en cuanto se pudo se utilizó la capacidad de los ordenadores para realizar el cálculo numérico [11].

Hasta ahora hemos citado trabajos en los que se consideraba que la transmisión en la pupila es constante, pero esto no siempre es así. De hecho ya en el año 1935 Straubel [12] consideró pupilas de transmisión no uniforme en particular del tipo $P(r) = (1 - r^2)^p$. El primer efecto que se estudió fue el que se dio en llamar *apodización*, que consiste en la eliminación de los máximos secundarios de la imagen difraccional del punto (PSF) (a costa de perder poder resolutivo) al introducir un filtro, por ejemplo de Straubel o semejantes. Este tipo de filtros es especialmente útil en espectroscopía, para no confundir máximos secundarios con líneas espectrales, y también ha sido utilizado en telescopios para reducir los efectos difraccionales (máximos secundarios).

Mediante la utilización de filtros de transmisión no uniforme también se puede lograr un efecto opuesto a la apodización, llamado *superresolución* (o hiperresolución). Este efecto se produce cuando el radio del primer mínimo de la distribución de intensidad en la imagen de un punto (PSF) se reduce, aumentando por ello el poder resolutivo (normalmente a costa de aumentar la intensidad de los máximos secundarios). En particular, Toraldo di Francia [13] observó que por el hecho de haber una obstrucción central aumentaba el poder resolutivo y la profundidad de enfoque. Por ello, se puede dar al término *apodización* un significado más general, indicando cualquier tipo de modificación de la transmisión en pupila con el fin de mejorar la respuesta del sistema de acuerdo con algún criterio de calidad de la imagen.

Filtros apodizantes (en el sentido más general) también han sido utilizados para modificar la respuesta axial de un sistema óptico. Un objetivo de gran interés en un sistema óptico es mejorar la profundidad de enfoque [14], también en sistemas políchromáticos [15]. Se ha demostrado también que usando filtros apodizantes se puede mejorar la respuesta tridimensional de un microscopio confocal, logrando incluso superresolución en 3 dimensiones [16].

Más recientemente también se han estudiado filtros apodizantes sólo de fase (para evitar pérdidas de energía) o bien filtros complejos [17,18]. En algunos casos son prometedores pero de difícil realización práctica, por lo que también se buscan diseños más sencillos tales como filtros complejos anulares [19]. Diversos diseños han sido propuestos para aplicaciones tan variadas como almacenamiento óptico o microscopía confocal [20,21].

Ligado al tema de la difracción y de los sistemas ópticos también estaría el de los elementos ópticos difractivos, cuyo funcionamiento hace uso directo de la difracción en analogía con los elementos refractivos, cuya acción se fundamenta en la refracción de la radiación [22]. Tal como reflejaban Jari Turunen y Frank Wyrowski [22], la difracción,

siendo una propiedad fundamental del movimiento ondulatorio, no ha sido utilizada hasta hace poco en diversas aplicaciones para formación de imagen, por ejemplo a través de los denominados elementos ópticos difractivos, inicialmente propuestos y realizados por A. W. Lohmann al producir los primeros hologramas generados por ordenador [23]. Los elementos ópticos difractivos pueden realizar funciones que serían difíciles o incluso imposibles con los elementos convencionales [22], tales como la realización simultánea de varias funciones como podrían ser multiplexar y enfocar, o tal como veremos en este artículo focalizar y modificar la PSF de un sistema óptico simultáneamente.

De cara a la generación de filtros de transmisión no uniforme o de elementos ópticos difractivos se han abierto nuevas posibilidades en diseño, aplicaciones y flexibilidad de implementación con la implantación progresiva en las dos últimas décadas de los dispositivos moduladores espaciales de luz. De entre estos probablemente los basados en cristal líquido [24], las conocidas como pantallas de cristal líquido (LCD, Liquid Crystal Display), o también conocidas como moduladores espaciales de luz basados en cristal líquido (LC-SLM, Liquid Crystal-Spatial Light Modulator), son los más usados, y centrarán las aplicaciones que mostraremos en este artículo. Probablemente uno de los primeros usos de este tipo de pantallas en aplicaciones diferentes a las de pantalla visualizadora o display se produce por Liu *et al.* [25]. En la actualidad los dispositivos LC-SLM se usan en multitud de aplicaciones tales como en procesado de imagen [26], óptica difractiva [27], óptica adaptativa [28], memorias holográficas [29], además de en la implementación de filtros de pupila tanto con iluminación monocromática [30,31] como policromática [32]. Las pantallas LC-SLM se fabrican habitualmente para su uso como display, donde el interés está en producir elevados contrastes en intensidad. En las aplicaciones arriba mencionadas sin embargo, se pretende manipular ya sea la amplitud o la fase asociada al campo eléctrico en el frente de onda. Estas aplicaciones son por tanto más exigentes y precisan del diseño de modelos y técnicas de calibración apropiadas. La respuesta de estos dispositivos es también muy dependiente de la longitud de onda lo cual ha restringido su uso habitualmente a aplicaciones monocromáticas. En los resultados que mostraremos pondremos en evidencia el gran interés que ofrecen estos dispositivos para la generación de filtros de transmisión no uniforme y de elementos ópticos difractivos, y trabajando tanto en régimen de sólo amplitud como de sólo fase [33].

Influencia de los filtros de transmisión no uniforme en la respuesta de un sistema óptico

De la teoría difraccional se tiene que en el caso de un sistema óptico con simetría radial, la amplitud del campo electromagnético producida por una

cierta función de transmisión en la pupila del sistema, puede calcularse como:

$$U(\rho, W_{20}) = 2\pi \int_0^1 P(r) \exp[i2\pi W_{20}r^2] J_0(2\pi\rho r) r dr \quad (1)$$

donde W_{20} es el coeficiente de desenfoque, que controla la distancia a lo largo del eje óptico del plano imagen bajo análisis con respecto al plano de mejor imagen, ρ es la coordenada transversal dentro de dicho plano, $P(r)$ es la función de transmisión en el plano de la pupila, siendo r la coordenada radial dentro de dicho plano, y J_0 es la función de Bessel de primera clase y de orden 0. En general, resulta de interés expresar los cálculos con respecto a las coordenadas de laboratorio s y z , en lugar de hacerlo con respecto a las coordenadas análogas normalizadas ρ y W_{20} . Unas y otras coordenadas están relacionadas mediante los siguientes factores de escala,

$$s = \frac{\lambda}{AN} \rho, z = \frac{2\lambda}{AN^2} W_{20}, \quad (2)$$

donde AN es la apertura numérica del sistema, siendo λ la longitud de onda del haz incidente. Las expresiones anteriores, usualmente utilizadas para valorar la imagen difraccional del punto son válidas dentro del régimen de la aproximación paraxial, es decir para pequeñas y medianas aperturas numéricas, que acostumbra a cubrir gran parte de las situaciones de interés. Para completar las expresiones fundamentales conviene introducir la amplitud para el caso general de iluminación policromática, en cuyo caso la PSF del sistema viene dada por,

$$G(\rho, W_{20}) = (1/\lambda^2) |U_\lambda(\rho, W_{20})|^2 \quad (3)$$

donde $U_\lambda(\rho, W_{20})$ es la amplitud monocromática mostrada en la ecuación (1).

Los filtros de transmisión no uniforme son utilizados en sistemas formadores de imagen para modificar la respuesta del sistema óptico (PSF). Dependiendo del diseño, el filtro de amplitud (o de fase), genéricamente llamado apodizador, puede producir *apodización* o *superresolución* tanto en un plano transversal como a lo largo del eje óptico. A continuación, en la figura 2, mostraremos cómo filtros de transmisión no uniforme, concretamente tres tipos concretos con funciones polinómicas sencillas, pueden producir estos efectos. Así, en las figuras 2(a) y (b) se muestra respectivamente en función del coeficiente de desenfoque W_{20} y de la coordenada transversal ρ la distribución de intensidad de la PSF, para estos tres filtros junto con el resultado de la apertura uniforme a efectos de comparación. A continuación señalaremos algunas propiedades interesantes y en la siguiente sección mostraremos algunos resultados experimentales utilizando estos filtros.

- Filtro b ($P(r) = 1 - 4r^2 + 4r^4$): este filtro es neutral en la dirección transversal y *superresolven-*

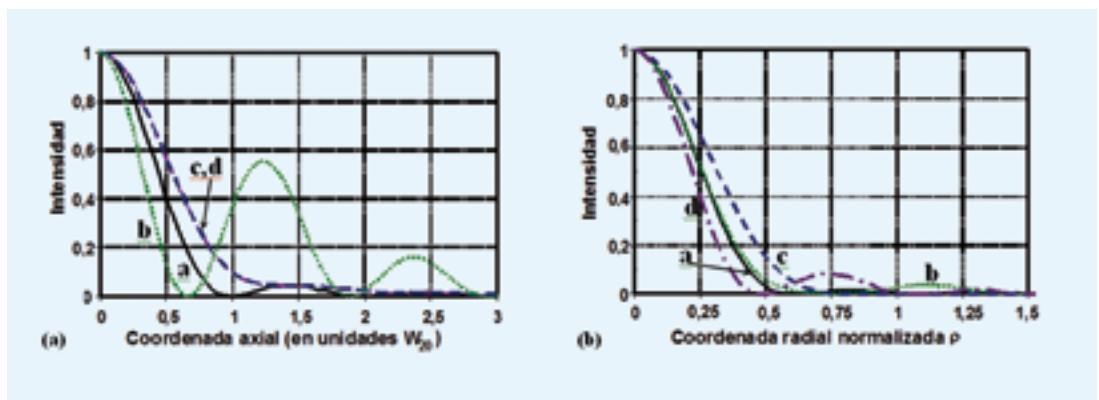


Fig. 2. Intensidad calculada numéricamente (a) a lo largo del eje y (b) en el plano de mejor imagen, para los filtros: **a**, transmisión uniforme; **b**, hiperresolvente axial ($P(r) = 1 - 4r^2 + 4r^4$); **c**, apodizante transversal ($P(r) = 1 - r^2$); **d**, hiperresolvente transversal ($P(r) = r^2$).

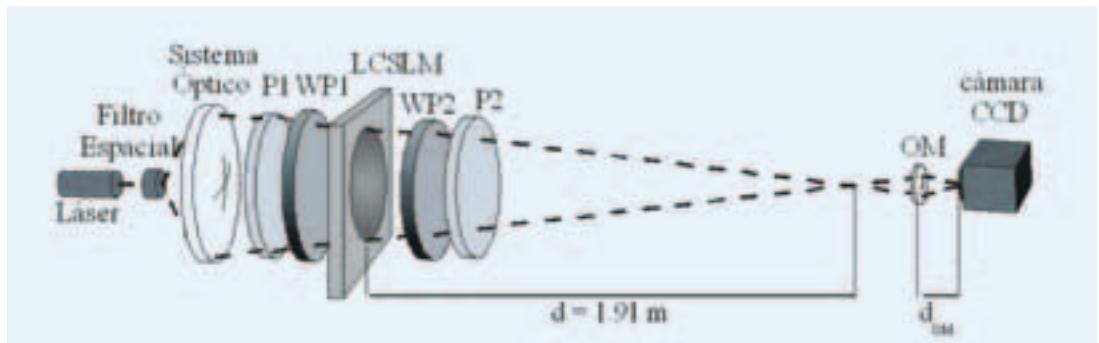
te en la dirección axial, de hecho produce varios focos a lo largo del eje. Por eso le llamamos *filtro superresolvente axial* o filtro *multifoco*. Estos filtros tienen mínima transmitancia en la zona media de la pupila y máxima en el centro y en la parte exterior.

- Filtro c ($P(r) = 1 - r^2$): este filtro es *apodizante* en la dirección transversal y *apodizante* a lo largo del eje. Su respuesta axial es la misma que la del filtro d. Este filtro tiene máxima transmisión en el centro de la pupila. A este tipo de filtros le llamamos *filtros apodizantes transversales*.
- Filtro d ($P(r) = r^2$): este filtro es *superresolvente* (o *hiperresolvente*) en la dirección axial y *apodizante* a lo largo del eje (aumenta la profundidad de enfoque). Este filtro tiene máxima transmisión en la parte exterior de la pupila. A este tipo de filtros le llamamos *filtros superresolventes transversales*.

Resultados experimentales

Los resultados de la PSF y de formación de imagen que mostraremos para los diferentes filtros han sido obtenidos usando una pantalla de cristal líquido nemático helicoidal [33], de las que usualmente vienen incorporadas en videoproyectores de uso comercial. Estas pantallas actúan como conversores de estados de polarización entre el estado de polarización del haz de luz incidente y el transmitido. Al insertarlas entre polarizadores y láminas retardadoras a la entrada y a la salida orientados de manera conveniente, se puede conseguir que en función del voltaje aplicado (nivel de gris enviado por la tarjeta gráfica del ordenador) se produzca

Fig. 3. Montaje experimental para controlar la PSF mediante filtros de transmisión no uniforme.



una modulación de la transmisión en amplitud o en fase. Así, se puede tener un control eléctrico píxel a píxel que se traduce en una modulación espacial de las propiedades del frente de onda a la salida de la pantalla. En la figura 3 mostramos el esquema de un sistema híbrido óptico-digital

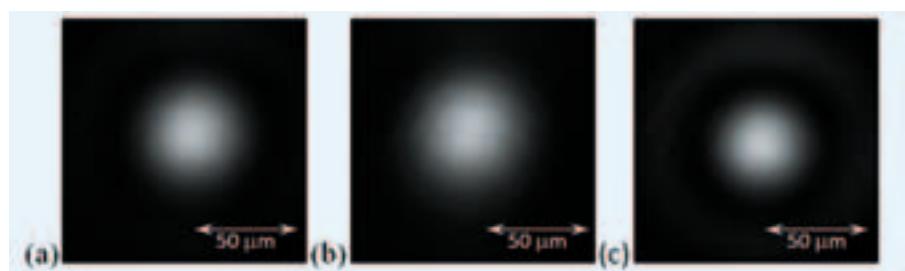
que permite modificar la PSF de un sistema óptico mediante la introducción en el plano de la pupila de filtros de transmisión no uniforme, enviados a la pantalla de cristal líquido, la cual debe estar inserta entre dos polarizadores (P1, P2) y en según qué condiciones también entre dos láminas retardadoras (WP1, WP2) [31]. Hay que mencionar que en general estas pantallas producen una modulación acoplada de la amplitud y la fase. Aplicando técnicas apropiadas es posible producir configuraciones de modulación de cuasi-sólo amplitud o de cuasi-sólo fase [33], no sólo para iluminación monocromática, sino también para varias longitudes de onda [32]. Para la captación del plano imagen oportuno disponemos de un objetivo de microscopio (OM) a una distancia fija de la cámara CCD, de modo que al mover de manera solidaria este conjunto podemos observar con la misma magnificación los diferentes planos a lo largo del eje que se deseen analizar.

Vamos a mostrar resultados obtenidos para filtros de transmisión no uniforme [30, 31], para lo cual se necesita que la pantalla de cristal líquido trabaje en régimen de cuasi-sólo amplitud. En la figura 4(a), (b) y (c) mostramos respectivamente la imagen obtenida de la respuesta en el plano de mejor imagen producida por la apertura clara (transmisión uniforme), y por los filtros $P(r) = 1 - r^2$ y $P(r) = r^2$. En la figura 2 habíamos mostrado que la respuesta a lo largo del eje es idéntica, siendo un filtro hiperresolvente y el otro apodizante en el plano de mejor imagen con relación a la respuesta de la apertura clara. Esto último es lo que justamente se observa al comparar con respecto a la figura (a): el diferente tamaño de la mancha central en las figuras (b), mayor tamaño, y (c), menor tamaño. Las imágenes se muestran con una escala transversal en micras con que cuantificar la posición de máximos y mínimos, que tal como se mostró en [31] muestran un buen acuerdo con los valores teóricos.

En las figuras (b), mayor tamaño, y (c), menor tamaño. Las imágenes se muestran con una escala transversal en micras con que cuantificar la posición de máximos y mínimos, que tal como se mostró en [31] muestran un buen acuerdo con los valores teóricos.

La capacidad de multiplexar varias funciones en un mismo elemento óptico es especialmente fácil de implementar y poner a prueba mediante moduladores espaciales de haces de luz, debido al control en tiempo real que ofrece su conexión a ordenador a través de la tarjeta gráfica del mismo. Se produce así una gran flexibilidad y otras alternativas de diseño son posibles de cara a modificar la respuesta de un sistema óptico. En este sentido, se mostró en [34] cómo mediante el multiplexado de lentes difractivas de diferentes focales, bajo ciertas condiciones la lente combinada puede producir una respuesta equivalente a un aumento de la profundidad de enfoque, tal como también sería posible por ejemplo mediante filtros de transmisión no uniforme ya descritos. En esta aplicación la pantalla trabaja en régimen de sólo fase. Cada lente se diseña de manera que lentes con focales consecutivas proporcionan distribuciones de amplitud a lo largo del eje que se superponen. De entre los diversos esquemas de multiplexado espacial en [35] se vio que el multiplexado espacialmente aleatorio proporciona un sistema cuya respuesta impulsional (PSF) tiene lóbulos laterales reducidos, y por tanto es apropiado para formación de imagen de objetos extensos. Hay que decir que el muestreo de una lente de Fresnel provoca la aparición de múltiples lentes cuando la frecuencia de muestreo es menor que la frecuencia de Nyquist. Para evitar dicho efecto la focal de la lente muestreada no debe ser menor de un cierto valor que dependerá de la apertura de la lente y de la longitud de onda con la que deba operar.

En la primera fila de la figura 5 se muestra la imagen formada por una sola lente difractiva en diversos planos a lo largo del eje. En la segunda fila se tiene el resultado para una lente multiplexada resultado del multiplexado aleatorio de 33 lentes. El objeto extenso utilizado es la estrella de Siemens, cuyo contenido en frecuencias espaciales decrece a medida que nos alejamos radialmente del centro de la figura. De este modo, podemos evaluar de una manera bastante aproximada la respuesta en frecuencia (MTF, Modulation Transfer Function) del sistema simplemente observando el contraste de los sectores a medida que observamos a diferentes distancias radiales respecto del centro de la estrella de Siemens. El rango de focales cubierto por las 33 lentes está entre 92 cm y 108 cm, con espaciado de 0.5 cm entre focales consecutivas. La lente escogida para la primera fila es la de focal 100 cm. Cada una de las columnas se corresponde con un plano diferente a lo largo del eje, concretamente el plano de mejor imagen de dicha lente, a 100 cm del LCD (que etiquetamos como plano $Z = 0$ cm), y en dos planos desenfocados: $Z = -6$ cm y $Z = -10$ cm (6 cm y 10 cm más cerca al LCD respectivamente). Si observamos la imagen en el plano $Z = 0$ cm, se



puede observar que la imagen producida por la lente única es más definida. Sin embargo, en los planos desenfocados la lente única genera contrastes de inversión entre los sectores tal como es de esperar, ya que es precisamente la existencia de estos contrastes de inversión una de las maneras de identificar que una imagen ha sido captada en un plano desenfocado. Sin embargo, para la lente multiplexada estos contrastes de inversión no se producen y se mantiene la calidad de imagen dentro de este amplio rango axial, lo que demuestra que se ha conseguido generar un elemento con una gran profundidad de enfoque.

Fig. 4. Medida experimental de la PSF en el plano de mejor imagen para: (a) transmisión uniforme; (b) $P(r) = 1 - r^2$; (c) $P(r) = r^2$.

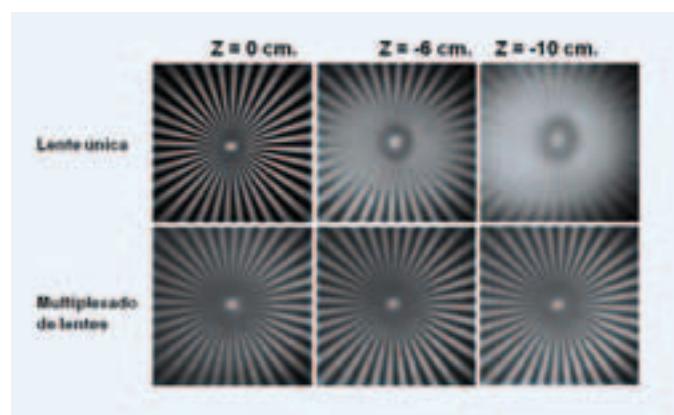
Conclusiones

En el presente artículo hemos hecho especial énfasis en el papel central que juega la difracción en la formación de imagen en sistemas ópticos. La difracción limita la anchura mínima de la PSF que se puede obtener y por tanto la resolución. Sin embargo, tal como hemos mostrado, la manipulación del frente de onda mediante filtros apropiados permite generar tanto hiperresolución como apodización en la respuesta tanto axial como transversal. La disponibilidad de moduladores espaciales de luz, tales como las pantallas LCD aquí vistas, facilita enormemente la generación de estos filtros, que se pueden cambiar en tiempo real. Varias aplicaciones han servido de ejemplo para mostrar el importante abanico de posibilidades que ofrece este campo de investigación.

Agradecimientos

Queremos agradecer su inestimable y entusiasta colaboración a todos los colegas que han participado en la investigación mostrada en este trabajo y cuyos nombres aparecen como coautores junto

Fig. 5. Imágenes de la estrella de Siemens capturada en el plano de mejor imagen ($Z = 0$) y en los planos desenfocados ($Z = -6$ cm y $Z = -10$ cm) para una sola lente y para una lente multiplexada (33 lentes mediante multiplexado espacialmente aleatorio).

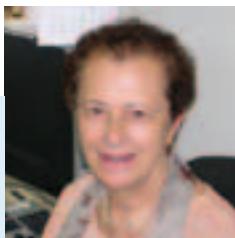


a nosotros en los artículos citados. Agradecemos el apoyo económico recibido de parte del Ministerio de Economía y Competitividad (FIS2012-39158-C02-01) y de la Generalitat de Catalunya (contrato 2014 SGR 1639).

Referencias

- [1] C. HUYGENS, *Traité de la Lumière* (completado en 1678, publicado en Leyden en 1690).
- [2] F. M. GRIMALDI, *Physico mathesis de lumine, coloribus, et iride, aliisque annexis libri duo* (Bologna ["Bonomia"], Italia, Vittorio Bonati, 1665).
- [3] T. YOUNG, "The Bakerian Lecture: Experiments and calculations relative to physical optics". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* (Royal Society of London) 94, pp. 1–16 (01/01/1804).
- [4] A. J. FRESNEL, "Mémoire sur la Diffraction de la lumière, où l'on examine particulièrement le phénomène des franges colorées que présentent les ombres des corps éclairés par un point lumineux", *Annales de la Chimie et de Physique*, 2.^a serie, vol. 1, pp. 239–281 (1816) (presentado ante l'Académie des Sciences el 15/10/1815).
- [5] J. W. GOODMAN, *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill, San Francisco, 2.^a edición, 1997).
- [6] W. T. CATHEY, *Optical Informatin Processing and Holography* (John Wiley & Sons, Inc, 1974).
- [7] M. BORN y E. WOLF, *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1964).
- [8] G. B. AIRY, *Trans. Camb. Phil. Soc.* 5, 283-291 (1835).
- [9] J. W. STRUT (LORD RAYLEIGH), *Philos. Mag.*, 8, 403 (1879).
- [10] K. STREHL, "Die Beugungstheorie des Femrohrs", Barth, Leipzig (1894).
- [11] H. H. HOPKINS y M. J. YZUEL, *Opt. Acta*, 17, 3 157-182 (1970).
- [12] R. STRAUBEL y PIETER ZEEMAN, *Verhandelingen*, Martinus Nijhoff, 302 (1935).
- [13] G. TORALDO DI FRANCIA, *Atti. Fond. Giorgio Ronchi* 7, 366-372 (1952).
- [14] J. OJEDA CASTAÑEDA, E. TEPICHIN y A. DÍAZ, *Appl. Opt.*, 28 (1989) 2666.
- [15] J. C. ESCALERA, M. J. YZUEL, J. CAMPOS, *Appl. Opt.*, 34 (1995) 1655.
- [16] M. MARTÍNEZ-CORRAL, P. ANDRÉS, J. OJEDA CASTAÑEDA, G. SAAVEDRA, *Optics Comm.*, 119, (1995) 491.
- [17] T. R. M. SALES y G. M. MORRIS, *J. Opt. Soc. Am. A*, 14 (1997) 1637.
- [18] W. T. CATHEY, E. R. DOWSKI, *App. Opt.*, 41 (2002) 6080.
- [19] C. J. R. SHEPPARD, J. CAMPOS, J. C. ESCALERA y S. LEDESMA, *Optics Comm.*, 281 (2008) 3623.
- [20] H. F. WANG, C. J. R. SHEPPARD, K. RAVI, S. T. HO, G. VIENNE, *Laser Photonics Reviews*, 6 (2012) 354.
- [21] J. CAMPOS, J. C. ESCALERA, A. MÁRQUEZ y M. J. YZUEL, *Asian Jour. Physics*, vol 23, 3 (2014) 363-402, en prensa.
- [22] J. TURUNEN y F. WYROWSKI, *Diffractive optics for industrial and commercial applications* (Akademie Verlag, Berlín, 1997).
- [23] A. W. LOHMAN y D. P. PARIS, "Binary Fraunhofer holograms, generated by computer", *Appl. Opt.* 6, 1739-1748 (1967).
- [24] S. SERATI y K. BAUCHERT, *Laser Focus World*, mayo de 1999, 229-233.
- [25] H-K . LIU H-K, J. A. DAVIS y R. A. LILLY, *Opt. Lett.* 10, 635-637 (1985).
- [26] J. CAMPOS, A. MÁRQUEZ, M. J. YZUEL, J. A. DAVIS, D. M. COTTRELL e I. MORENO, *Appl. Opt.*, 39 (2000) 5965.
- [27] J. MCORIST, M. D. SHARMA, C. J. R. SHEPPARD, E. WEST, K. MATSUDA, *Micron*, 34 (2003) 327.
- [28] R. DOU y M. K. GILES, *Opt. Lett.*, 20 (1995) 1583.
- [29] H. J. COUFAL, D. PSALTIS, B. T. SINCEBOX (eds.), *Holographic Data Storage* (Springer-Verlag, Berlín, 2000).
- [30] J. A. DAVIS, J. C. ESCALERA, J. CAMPOS, A. MÁRQUEZ, M. J. YZUEL y C. IEMMI, *Opt. Lett.*, 24 (1999) 628.
- [31] J. CAMPOS, M. J. YZUEL, A. MÁRQUEZ, J. C. ESCALERA, J. A. DAVIS, C. IEMMI y S. LEDESMA, *Proceedings SPIE*, 4457 (2001) 99.
- [32] A. MÁRQUEZ, C. IEMMI, J. CAMPOS, J. C. ESCALERA y M. J. YZUEL, *Optics Express*, 13 (2005) 716.
- [33] A. MÁRQUEZ, C. IEMMI, I. MORENO, J. A. DAVIS, J. CAMPOS y M. J. YZUEL, *Opt. Eng.*, 40 (2001) 2558.
- [34] C. IEMMI, J. CAMPOS, J. C. ESCALERA, O. LÓPEZ-CORONADO, R. GIMENO y M. J. YZUEL, *Optics Express*, 14 (2006) 10207.
- [35] A. MÁRQUEZ, C. IEMMI, J. CAMPOS y M. J. YZUEL, *Opt. Lett.*, 31 (2006) 392.

María Josefa Yzuel
Universidad Autónoma de
Barcelona, Real Academia de
Ciencias y Artes de Barcelona



Juan Campos
Universidad Autónoma de
Barcelona



Juan Carlos Escalera
Universidad Autónoma de
Barcelona



Andrés Márquez
Universidad de Alicante



La excepcional contribución de Ibn-al-Hytham (Alhacén) a las ciencias

Un intento de aproximación a la ciencia de la óptica en el Renacimiento Musulmán del siglo xi

María L. Calvo

El Año Internacional de la Luz y de las tecnologías basadas en la luz se celebra en este año de 2015. Hay una intención primordial en la decisión de la UNESCO como llamada de atención global acerca de cómo aquellas tecnologías, donde la luz interviene de forma determinante, han ido modificando e influyendo en nuestra vida cotidiana y en una mejora de nuestra calidad de vida. Es decir, en cómo se ha ido ganando el reto de proporcionar a la humanidad nuevas tecnologías que mejoren sustancialmente sus necesidades en educación, energía, agricultura, comunicaciones y salud, entre las más significativas. Esta iniciativa de la UNESCO permite también celebrar el milenio de la publicación *El Libro de la Óptica* (en árabe *Kitāb al-Manāzir*, y en la traducción latina *De Aspectibus o Perspectiva*) del científico musulmán del siglo xi, Ibn-al-Hytham, más conocido en el mundo occidental como Alhacén. Recogemos aquí, textualmente, las palabras de Irina Bokova, Directora General de la UNESCO: “A groundbreaking scientist and a humanist from a thousand years ago, the life and work of Ibn-al-Haytham have never been as relevant as they are today”.

En este artículo pretendemos realizar una breve, y con seguridad, no muy detallada aproximación al excepcional trabajo y contribuciones de Alhacén a la ciencia, la filosofía y, en particular, a la óptica y a las teorías sobre el mecanismo de la visión en los seres vivos. Para realizar y demostrar sus teorías, Alhacén se sirvió del diseño de experimentos, que no por ser algunos de gran sencillez y originalidad, carecían de rigor metodológico. Debemos entender, que la ciencia en el siglo x-xi tenía una conexión ineludible con la filosofía y con la religión independiente del contexto y ubicación religiosos y culturales. Este es un aspecto que puede resultar excesivamente alejado de nuestra forma moderna de abordar los resultados científicos aplicando una lógica cartesiana, con la que, consciente o inconscientemente, desarrollamos nuestro trabajo como investigadores hoy en día.

Y por ello, no deseamos eludir este aspecto, y esperamos que el lector se sumerja en el intento de exponer lo más esencial del pensamiento renacentista musulmán de los siglos ix, x y xi (por no extendernos) dentro de la llamada Edad de Oro del Islam. En este viaje nos encontraremos con personajes absolutamente fascinantes, algunos de los cuales fueron ciudadanos musulmanes en la península ibérica, con una proyección en las ciencias y la filosofía modernas, ciertamente notoria.

Para apoyar estas tesis iniciales del trabajo conviene mencionar aquí que el periódico *The New York Times* publicó en 1999 un artículo sobre la importancia de los trabajos de Alhacén [1]. Como texto indicativo podemos resaltar: “Say, then, that the most important idea of this millennium was set in motion by a man named Abu Ali al-Hasan ibn-al-Haytham,

born around the year 965 in Basra, in what is now Iraq. Even by his Western name, Alhazen, he remains a little-known figure in the history of thought. But the idea that Ibn-al-Haytham championed is so ingrained in us that we don't even think of it as an innovation, let alone one that has appeared so late in the human day”.

El contexto histórico

Como requisito previo y necesario, debemos de aproximarnos a la Grecia Antigua, mencionar (aunque sea brevemente y aunque nuestra intención no sea profundizar en tesis de filosofía



Fig. 1. Reproducción de una sección de una página manuscrita del libro de astronomía *Almagesto*, cuyo autor es Ptolomeo, traducido al árabe por el astrónomo y matemático Al-Ḥajjāj ibn Yūsuf ibn Maṭar (786-833), el cual también tradujo *Los Elementos* de Euclides [4]. Esta versión árabe muestra el interés de los científicos musulmanes del medioevo por la ciencia griega.



Fig. 2. Un dibujo ilustrativo inspirado en la fisonomía de Ibn-al-Hytham (Alhacén), nacido en 965 en la ciudad de Basora (pertenece actualmente a Iraq, y entonces al Emirato Buyid), fallecido en El Cairo, Egipto, en 1040, (entonces Califato Fatimí). Personaje singular, representativo del Renacentismo Musulmán, físico, matemático, astrónomo y con extensos conocimientos en otros muchos campos de la ciencia como la medicina, la hidráulica y las ciencias naturales.

de la ciencia) a los grandes pensadores que abordaron los aspectos más intrincados del pensamiento humano y su acercamiento al conocimiento del mundo en el que nos movemos. Ello constituyó una primera fase fundamental en el posterior desarrollo de la ciencia, tal y como ha llegado hasta nuestros días, con teorías algunas de ellas contrapuestas, que implicaron la necesidad de discusiones, de refutar ideas y conceptos, de

revisar argumentos, y, en definitiva, de ir construyendo los ladrillos del edificio del conocimiento y la descripción científica de lo que conocemos.

Paseándonos por la Grecia Antigua, conviene mencionar aquí a aquellos pensadores y filósofos cuyos textos originales en griego fueron posteriormente traducidos al árabe. Ello constituyó una clave primordial, que trataremos más adelante, para entender la extraordinaria expansión de la ciencia musulmana en lo que se ha dado en llamar el Renacimiento Musulmán, que abarca los siglos VIII a XIII de nuestra era. Una etapa de la historia en la que Occidente vivía en el oscuro mundo medieval, donde la población (inmersa en la lucha por la supervivencia) apenas tenía acceso a cualquier información que pudieramos calificar como culta. Nos centraremos en las teorías sobre el mecanismo de la visión humana, como punto esencial para hacer un recorrido histórico hasta llegar a las contribuciones de Alhacén. Partiremos de los atomistas, que intuyeron la necesidad de un “contacto”: las partículas del objeto tienen que entrar en contacto con el ojo del observador para que éste perciba dicho objeto (Demócrito, Epicuro), que constituye la llamada teoría de la introducción. En la Grecia Antigua, Platón y Aristóteles sentaron las bases de las teorías sobre la historia de las ideas, y su origen divino. Contribuyeron al inicio y exposición de teorías básicas sobre los mecanismos de la visión: ¿por qué vemos?, ¿cómo vemos?, ¿cómo apreciamos el mundo que nos rodea? Platón enunció varias premisas según las cuales un flujo de luz emana del observador al objeto teniendo este rayo o flujo que “emana” las mismas propiedades que los rayos del sol [2], y que dieron lugar a la teoría de la extramisión. Aristóteles, en sus textos sobre *Physica*, ya introducía la idea de que la naturaleza es el impulso primigenio para que se produzcan cambios en el entorno. Además, estableció una primera teoría sobre el mecanismo de la visión fuera de las dos teorías mencionadas: la luz no es un sólido, tampoco es fuego ni emana del observador. A través de sus experimentos intuyó que la luz que recibe un objeto se refleja y se transmite por un medio transparente, el éter,

hasta el ojo [3]. Euclides (Alejandría, Egipto, cerca de 325 a. C) realizó importantes contribuciones en matemáticas (*Los Elementos*) y óptica. Presentó una teoría, basada en la extramisión, sobre los atributos de ciertos objetos luminosos (como las estrellas) para emitir rayos de luz que llegaban al ojo, y que interpretaba como rayos que posteriormente emanaban del ojo, como efluvios, y se propagaban divergiendo a velocidad extraordinariamente alta. Estas conclusiones fueron refutadas más tarde por Ibn-al-Hytham quién demostró, a partir de sus experimentos originales, que eran erróneas. Ptolomeo (Alejandría, Egipto, cerca del año 90 a. C), seguidor de las teorías de Euclides, abordó el razonamiento lógico con teorías matemáticas. En su libro *Optica* expuso teorías sobre la reflexión y la refracción de la luz, el color. Además, conviene mencionar aquí, como dato fundamental en este análisis, que sus libros sobre astronomía fueron traducidos al árabe en el siglo IX, como comentaremos más adelante. Todos estos presupuestos y teorías, muchas de ellas con base empírica, debieron de tener una gran influencia en los estudios amplísimos que realizó Ibn-al-Hytham, impulsado por su tremenda curiosidad de comprobar directamente los límites de la realidad perceptual, una auténtica revolución.

El renacimiento o edad de oro de la ciencia musulmana no puede entenderse sin un breve análisis de la expansión del Islam, fundamentalmente en los siglos X y XI. Esta expansión desde ciudades de gran actividad intelectual como Bagdad y Damasco, donde florecieron grandes escuelas islámicas del pensamiento, de las matemáticas, astronomía, medicina, llegó, como muy bien sabemos, hasta la península ibérica y configuró en Al-Andalus una sociedad multicultural. En Al-Andalus las escuelas del pensamiento fueron igualmente florecientes. Una figura señera fue Ibn-Rushd (Córdoba 1126 - Marrakesh 1198), más conocido como Averroes, médico, jurista, filósofo, que también estudió el ojo humano y conjeturó acerca del mecanismo de la visión.

Al-Andalus fue, y merece la pena recalcarlo aquí, una ruta fundamental para la transmisión de los conocimientos de la ciencia árabe hasta Europa.

Escuelas árabes de traductores: una clave para entender la expansión de la ciencia musulmana

Aunque este artículo está enfocado en la figura de Ibn-al-Hytham, y aunque quien escribe no tiene una base de conocimientos suficientes en historia de la ciencia, haciendo un esfuerzo de aproximación, es imprescindible mencionar aquí la influencia de las grandes escuelas de traductores árabes. En particular, muchos de estos traductores se especializaron en traducir textos del griego al árabe. Muchas de estas actividades se realizaban en las llamadas “Casas de la Sabiduría”, incentivadas por

los califas de la época, que ya empezaron a existir en el siglo VIII y que fructificaron en el siglo IX (figura 1). En Al-Andalus, igualmente, llegaron a existir importantes núcleos de escuelas de traductores. Basta mencionar, comparativamente, que en el siglo IX el monasterio de Saint Gall, en Francia, pasaba por tener una de las bibliotecas más importantes de Europa con aproximadamente cuarenta volúmenes, mientras que en las bibliotecas de Córdoba se almacenaban hasta 500.000 ejemplares. El gran desfase cultural entre Occidente y Oriente pudo deberse, como explicación técnica, a la falta de producción de papel en aquél, algo que no ocurría en Oriente donde las técnicas de producción llegaron y se expandieron desde China.

Podemos afirmar que la posterior ciencia medieval europea daría un gran salto adelante a través de la reelaboración realizada por los científicos musulmanes en la llamada Edad de Oro de la ciencia musulmana.

Abū 'Alī al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haytham y sus contribuciones en óptica

Con objeto de centrarnos en los experimentos diseñados por Ibn-al-Hytham (965, Basora, actual Iraq - 1040, El Cairo, Egipto) sobre óptica y visión, no entraremos en detalles biográficos concretos de su vida, que pueden hoy en día encontrarse en Internet con un cierto rigor y detalle [5]. Sí parece adecuado, sin embargo, definir a Ibn-al-Hytham como un personaje renacentista, aplicando el concepto acuñado para el posterior Renacimiento europeo, un intelectual, matemático, astrónomo, científico e ingeniero hidráulico, con amplísimas inquietudes que le llevaron a leer (y posiblemente traducir) a los grandes pensadores griegos y a revisar sus teorías. En particular, las ya mencionadas en la sección anterior sobre los mecanismos de la visión humana (figura 2).

Ibn-al-Hytham, conocido en la Edad Media con el nombre de Alhacén, se sitúa en la misma época y casi en el mismo nivel que Avicena (Bujará, Persia [actualmente Uzbekistán], 980 – Hamadán, Persia [actualmente Irán], 1037) insigne científico y médico. También es contemporáneo del matemático, astrónomo y filósofo Al-Biruni (Corasmia, Persia [actualmente Uzbekistán], 973 – Gazni, Persia [actualmente Afganistán], 1048). La obra más original de Alhacén y que ha tenido una gran influencia posterior en los científicos europeos, es un tratado de óptica, *El Libro de Óptica* (de la traducción del original árabe *Kitāb al-Manāzir*, *The Optics*, en la traducción inglesa) [6] (figura 3).

El *Libro de Óptica*, en su versión en latín, consta de siete volúmenes traducidos por el filósofo, físico y matemático polaco medieval Witelo (también conocido por Vitelio) e impresos en el año 1270. Ciertas copias de la traducción llevan también el título *De Perspectiva o De Aspectibus*, que son traducciones literales de la palabra árabe *manazir*

(نظران). La obra contiene una exhaustiva revisión de los conceptos que sobre la luz y los fenómenos naturales asociados a la luz emitieron los filósofos y pensadores griegos. El volumen II trata sobre aspectos de teorías de la visión, la información que se obtiene de los objetos (dimensión, distancia, belleza, etc.). El volumen III trata de los errores que se pueden presentar en la visión de los objetos, aberraciones. El volumen IV trata de los fenómenos de la reflexión de la luz. El volumen V estudia los problemas y las soluciones a la formación de las imágenes ópticas obtenidas por reflexión en superficies reflectoras. El volumen VI explica las ilusiones ópticas producidas por la observación de imágenes ópticas obtenidas por reflexión de la luz. El volumen VII explica la refracción de la luz y la formación de imágenes ópticas por refracción.

Todos estos textos fueron sin duda completados en El Cairo, donde residió la mayor parte de su vida adulta, y estarían fechados entre 1028 y 1038. También historiadores y estudiosos de su obra refieren que Ibn-al-Hytham visitó la península ibérica, entonces bajo el dominio de los califatos como el de Córdoba, que tuvo una gran influencia en la expansión de la cultura musulmana de la época [7].

Un breve estudio de un posible experimento diseñado por Ibn-al-Hytham sobre la formación de post-imágenes en el ojo humano

Uno de los aspectos a resaltar en los temas tratados en los libros de Ibn-al-Hytham sobre fenómenos luminosos es cómo llegó a concebir y diseñar experimentos, que hoy en día pueden parecer sencillos y triviales, pero que en aquella época implicaban la revisión y cuestionamiento de las antiguas teorías de los filósofos griegos sobre la visión. No olvidemos que las últimas teorías seguían vigentes en el contexto de la ciencia del Medievo. Ello permitió el establecimiento de su nueva y revolucionaria teoría sobre la naturaleza de la luz y sobre las leyes que rigen el mecanismo de la visión humana. Aunque su diseño y contribución más conocida fue la cámara oscura, no entraremos aquí en su desarrollo, y nos concentraremos directamente en sus experimentos de la visión

Fig. 3. Reproducción de una página del Libro Tercero del *Libro de la Óptica*, en su versión en latín. En esta página se puede apreciar un dibujo o esquema del ojo humano, tal y como fue diseñado por Ibn-al-Hytham. Este esquema se observa también en la figura 4 en la versión original del texto en árabe.



Fig. 4. Descripción original de Ibn-al-Hytham de la anatomía del sistema visual humano. Aparece en una copia de su *Libro de la Óptica* (*Kitāb al-Manāzir*), datada del año 1083, en la Librería Sulemaniye, Estambul, Turquía. Se describe la conexión del globo ocular con el nervio óptico, así como la córnea, el cristalino, los humores acuoso y vítreo y la retina. También se reproduce el quiasma óptico.



directa de objetos luminosos (el Sol). Tomando sus conocimientos sobre la anatomía del ojo humano, Ibn-al-Hytham enunció el mecanismo de la visión binocular. Sus estudios se vieron además ampliados y fundamentados en sus trabajos de disección, que le permitieron realizar un esquema completo del ojo con su correspondiente nomenclatura. Los términos utilizados hoy en día para la fisiología del ojo: cristalino, humor acuoso, humor vítreo, retina, fueron creados e introducidos por Ibn-al-Hytham (véase figura 4).

Ibn-al-Hythm realizó, a principios del siglo xi de nuestra era un experimento crítico [8]. Refirió lo que ocurría cuando un observador mira directamente al sol: entonces, al cerrar los ojos, el observador percibe una post-imagen del sol, estando aquél con los párpados cerrados (véase figura 5). La post-imagen se desvanece gradualmente hasta desaparecer. En sus explicaciones, argumentó que este fenómeno no podía ser el resultado de «algo» emitido desde dentro del ojo (lo que los defensores de la teoría de la extramisión llama-

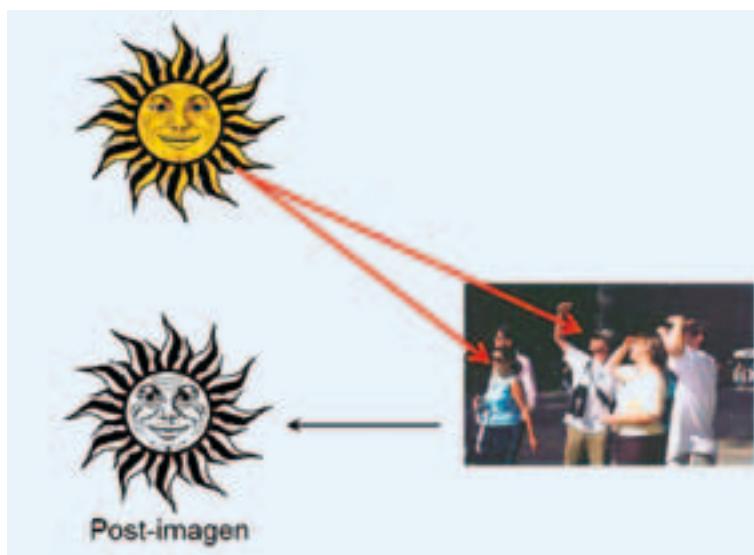
ban “rayo visual”). Por el contrario, el fenómeno debía ser causado por una fuente o estímulo externo. Repitió el experimento utilizando el sol u otra fuente brillante de luz vista a través de un espejo o reflejada en un segundo objeto, con resultados similares.

Estos experimentos demostraron que una fuente de estímulos externa (al ojo) sirve para excitar al proceso visual (figura 5). De esta forma concluyó convincentemente el debate abierto, desde hacía entonces más de mil años, entre las teorías de los efluvios inmanentes y emanantes y la teoría dinámica, en favor de esta última. Estas conclusiones proporcionaron un gran paso hacia la creación de la ciencia experimental moderna. Estos experimentos le permitieron introducir el concepto de visión binocular, y la necesidad de que exista un mecanismo en el cerebro que permita interpretar la formación de post-imágenes. En la figura 6 se plantea un sencillo experimento al lector para la reproducción de post-imágenes, que puede considerarse como una versión, en el contexto de los conocimientos de nuestra época, de lo iniciado por Alhacén hace mil años.

En la explicación moderna de este fenómeno hay que recurrir tanto al mecanismo de la visión asociado a los fotorreceptores de la retina (conos y bastones), los cuales, después de una exposición prolongada a un estímulo (sobre-estimulación) sufren un fenómeno de saturación, como al funcionamiento del córtex visual. Cuando las señales neuronales de la retina decrecen en intensidad en el córtex visual, se produce una respuesta alternativa semejante a un ajuste de balance del color (aquí, en este test, de niveles de grises). Estas adaptaciones permiten mantener de forma homogénea y balanceada el proceso dinámico de la visión. En el momento en el que las post-imágenes desaparecen, después de unos segundos, de nuestro campo visual es cuando en el córtex visual se ha restablecido el balance entre las señales neuronales procesadas.

Como ya hemos indicado en la Introducción de este artículo, en la conmemoración del principio del tercer milenio (2001), el periódico *The New York Times* argumentó que éstas y otras contribuciones relacionadas con los mecanismos de la visión, propuestas por Ibn-al-Hytham en el siglo xi han sido las contribuciones científicas más importantes del segundo milenio [1]. Sus experimentos le llevaron a enunciar teorías originales acerca de la naturaleza de la luz y su propagación (en el entonces éter). Se podría enunciar: “En un medio homogéneo, los rayos luminosos emitidos por una fuente casi puntual se propagan en línea recta. Esta propagación se hace a lo largo de los radios de una esfera cuyo centro será la fuente puntual”. Este enunciado nos parece hoy en día algo trivial y evidente. Pero debemos de recordar el contexto histórico en el que se enunció. Era en-

Fig. 5. Esquema para una interpretación libre de un experimento análogo al diseñado por Ibn-al-Hytham. Observación directa por un observador de una fuente luminosa (el sol) y la formación de las llamadas post-imágenes, una vez que el observador tiene los párpados cerrados. Con estas observaciones y conclusiones Ibn-al-Hytham demostró que las antiguas teorías griegas de la extramisión para explicar el mecanismo de la visión eran incorrectas.



tonces un momento de la historia de la ciencia en la que Ibn-al-Hytham pudo apoyarse únicamente en la geometría de Euclides. De esta forma llegó al razonamiento lógico.

En relación con los mecanismos de la visión y la formación de post-imágenes, es digno de ser mencionado aquí que sus experimentos fueron posteriormente revisados por científicos, filósofos, intelectuales e incluso escritores europeos del siglo XIX, como el alemán Johann Wolfgang von Goethe [9], el cual realizó observaciones directas del sol en el ocaso y refirió la formación de post-imágenes [10].

Las teorías sobre el mecanismo de la visión binocular y los experimentos realizados por Ibn-al-Hytham sobre visión del observador sentaron posteriormente las bases de una nueva área en las ciencias de la visión, la llamada Psicofísica, cuyo primer ejemplo lo tenemos en las contribuciones de los alemanes Ernst Heinrich Weber (1795-1878) y Gustav Theodor Fechner (1801-1887). Estos últimos formularon las leyes acerca de la relación entre la magnitud del estímulo visual y la intensidad percibida por el observador [11]. Estas leyes siguen vigentes hoy en día.

Conclusión

En este artículo nos hemos aproximado a la vida y a la obra de un insigne científico árabe del siglo XI, Ibn-al-Hytham, conocido en Europa como Alhacén. De su ingente y original obra compendiada en los siete volúmenes de *El Libro de la Óptica* (*Kitab-Al-Manazir*) hemos dedicado especial atención al experimento que diseñó hacia el año 1015. Esta efeméride ha sido seleccionada por la UNESCO como una de las cinco fechas memorables y significativas que han hecho posible la declaración por las Naciones Unidas del Año Internacional de la Luz 2015. Otras fechas y científicos, que realizaron igualmente diversas contribuciones fundamentales, están recogidas también en este número especial. La mayor motivación del presente artículo ha sido intentar que el curioso lector pueda hacer un recorrido por la historia de este personaje único y por las contribuciones que aportó a la ciencia. Aportaciones que siguen vigentes en el mundo de hoy, en este tercer milenio. Podemos decir, sin caer en la exageración, que Ibn-al-Hytham está considerado como el padre de la óptica.

Para terminar, conviene recordar que durante la época del oscurantismo medieval, los científicos árabes salvaron gran parte del conocimiento acumulado que había tenido su origen en Europa y en la cuenca del Mediterráneo, en particular las contribuciones colectivas de los antiguos griegos y romanos. Debido a las invasiones árabes en la península ibérica y al desarrollo posterior de grandes centros de enseñanza localizados en varios puntos de la geografía peninsular, este conocimiento volvió a introducirse en Europa.

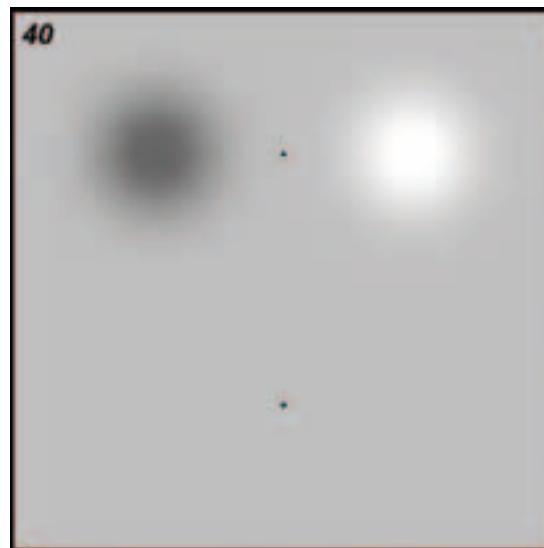
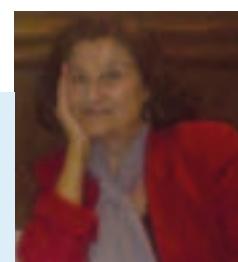


Fig. 6. Un sencillo experimento para la observación de la formación de post-imágenes. El lector debe mirar fijamente el punto negro superior central (preferiblemente tapando con la mano el punto negro inferior central). Después de unos minutos de observación fija, las dos manchas difusas (estímulos visuales) a derecha e izquierda de dicho punto central desaparecerán. Entonces inmediatamente el observador debe mirar el punto negro inferior. Verá aparecer dos imágenes localizadas igualmente a derecha e izquierda de este punto central inferior, pero ahora la que era oscura aparecerá blanca y viceversa, es decir, se verán los negativos o complementarias a las imágenes de arriba. Después de unos segundos estas post-imágenes desaparecen. ATENCIÓN: SE RECOMIENDA NO HACER EL TEST MÁS DE DOS VECES SEGUIDAS.

Referencias

- [1] <http://www.nytimes.com/1999/04/18/magazine/best-idea-eyes-wide-open.html>
- [2] DAVID C. LINDBERG, *Theories of Vision from Al-Kindi to Kepler* (Chicago, 1976).
- [3] CHARLES G. GROSS, "The fire that comes from the eye", *The Neuroscientist*, vol. 5, No.1, 58-64 (1999).
- [4] UNESCO, *Historia de la Humanidad, desarrollo cultural y científico* (Planeta, 1979, tomo 4.).
- [5] <http://en.wikipedia.org/wiki/Alhazen>
- [6] IBN-HYTHAM, *The Optics*, edición y traducción al inglés de A. I. Sabra (Kuwait, primer tomo, 1983, Londres, segundo tomo, 1989). *Opticae Thesaurus Alhazeni Arabis Libri Septem* (Basilea, 1572, primera edición impresa por Frederick Risner).
- [7] ROSANNA GORINI, "Al-Hytham the man of experience. First steps in the sciences of vision", *JISHIM*, 2, 53-55 (2003).
- [8] JAY M. ENOCH, "Introducción a la historia de las lentes", en: *Óptica Avanzada* (coord. M. L. Calvo) (Ariel Ciencia, Planeta, Barcelona, 2002. Capítulo 1). [Y referencias proporcionadas en este capítulo].
- [9] JOHANN W. VON GOETHE, *Zur Farbenlehre (Teoría del Color)* (Tübingen, 1810).
- [10] MARCEL MINNAERT, *The nature of light & colour in the open air*, Dover Publications Inc. (Nueva York, 1954).
- [11] GUSTAV T. FERCHNER, *Elementen der Psychophysik (Elementos de Psicofísica)*, 1860. (Leipzig, Breitkopf & Härtel, 1907, tercera edición, dos volúmenes).

María Luisa Calvo
Departamento de Óptica de la
Facultad de Ciencias Físicas,
Universidad Complutense
de Madrid



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

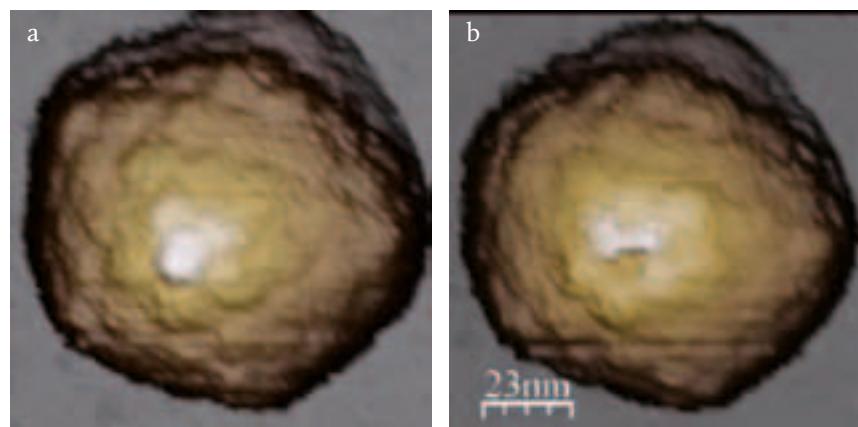


FÍSICA DE LOS VIRUS

El ciclo vital de un virus requiere a veces que su estructura sea muy estable, por ejemplo cuando transportan el genoma viral de célula en célula; o una resistencia estructural muy pequeña, por ejemplo, cuando empaqueta su genoma durante su formación, o lo libera durante la infección en la célula huésped. El proceso que convierte un virus inestable en estable se llama **maduración**. Este proceso conlleva cambios estructurales en la cápsula viral encaminados a hacerla más resistente. En algunos virus la maduración requiere el ensamblaje de proteínas ajenas al virus en diferentes sitios de su pared exterior, denominadas **proteínas decorativas o cemento**. Entender y cuantificar el

(DOI: 10.1038/ncomms5520) medir y cuantificar el refuerzo mecánico de un virus inducido por sus proteínas cemento. Para ello se ha utilizado como modelo el virus *bacteriófago lambda*, cuyo estadio final de maduración requiere el ensamblaje de proteínas cemento. En este trabajo se ha estudiado la **resistencia mecánica de virus individuales con y sin proteínas cemento, utilizando el microscopio de fuerzas atómicas**. Por un lado se ha estudiado la dureza y fuerza de rotura de cada virus frente a deformaciones puntuales individuales a alta fuerza (nanonewtons), encontrándose que las proteínas cemento incrementan estos parámetros mecánicos en un factor tres. Sin embargo, más que deformaciones puntuales, los virus se encuentran sometidos a impactos mole-

virus que ya ha sufrido impactos. Estos experimentos han mostrado que las proteínas cemento aumentan la resistencia de los virus a impactos moleculares en un factor 10, dando una explicación física a la estabilidad exhibida por los virus en el exterior de la bacteria.



papel estabilizador de estas proteínas es fundamental no sólo para entender su función biológica, sino también para usar los virus como contenedores nanométricos artificiales.

Un equipo multidisciplinar formado por los **físicos** Mercedes Hernando-Pérez y Pedro José de Pablo de la UAM y **biólogos** de la Universidad de Washington (Seattle) ha conseguido

culares provenientes del entorno donde evolucionan. En el caso del bacteriófago lambda, que infecta la **bacteria E. coli** (que se encuentra, entre otros sitios, en nuestro intestino), estos impactos son más abundantes en el exterior de la bacteria, donde se encuentran los virus maduros con proteínas cemento, que en el interior de la bacteria, donde los virus inmaduros no tienen proteínas cemento. Con esto en mente se ha sometido a cada virus a ciclos de fatiga mecánica a baja fuerza (piconewtons) que imitan los impactos moleculares anteriormente descritos. La figura muestra un virus intacto en el panel a y, en el panel b, un

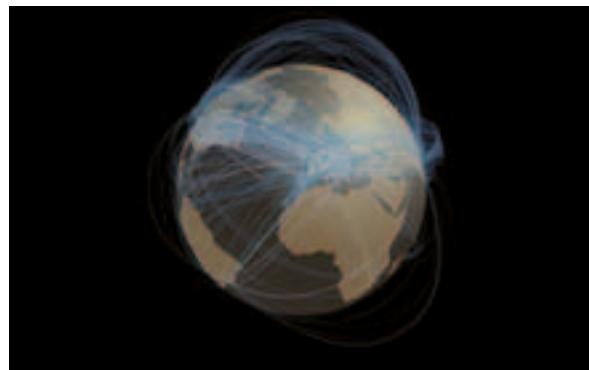
¹ Animamos al lector a que proponga contribuciones para ser consideradas en esta sección y, en su caso, a debatir temas que aquí se presentan enviando sus comentarios para la sección "Pulsos e impulsos".

RELACIONES ENTRE AMIGOS

BitTorrent, el protocolo más popular para compartir ficheros entre amigos, de igual a igual (*peer-to-peer, P2P*), es responsable de hasta una cuarta parte del tráfico total en internet. Y la **importancia socio-económica de las redes P2P** es cada vez mayor, como muestran los fallidos intentos en UE y EE.UU de crear leyes que regulen su funcionamiento. Es por tanto necesario entender el comportamiento de los usuarios de esas redes, pero uno se enfrenta con el problema de que solo cada usuario sabe exactamente lo que hace, a diferencia de Facebook, Twitter y otras plataformas, donde toda la información está en servidores centralizados.

Arnaud Gavaldà-Miralles, Jordi Duch y Roger Guimerà de la Universitat Rovira i Virgili, colaborando con investigadores de la Northwestern University, han estudiado (DOI: 10.1073/pnas.1309389111) por primera vez el comportamiento detallado de miles de **usuarios de BitTorrent** usando datos (hechos anónimos) sobre su actividad. Del análisis del tipo de ficheros que comparten, concluyen que se

comportan generalmente como especialistas, esto es, tienden a concentrarse en uno o unos pocos tipos de contenidos (música, series, películas, etc.) en lugar de compartir ficheros de todo tipo. Además, todavía más interesante, el comportamiento de estos usuarios está **correlacionado con factores socio-económicos y/o tecnológicos**. Por ejemplo, se observa que en cada país hay usuarios de todos los tipos, pero la proporción de usuarios de



cada tipo es diferente, lo que hace pensar que hay condicionantes externos que afectan a nuestro comportamiento en las redes P2P. En particular, y en contra de lo que se pudiera esperar, países más ricos tienen una sobrerepresentación de usuarios que comparten ficheros pequeños (música, libros, etc.) mientras que países más pobres tienen sobrerepresentados a los usuarios que comparten ficheros más grandes (películulas).

Los patrones de comportamiento observados tienen **consecuencias** potencialmente importantes: por ejemplo, si uno tiende a compartir siempre los mismos tipos de ficheros, acabará conectándose solo con un subconjunto de todos los usuarios de la red (los que comparten ficheros parecidos). Dicho de otra manera, la red de BitTorrent estará compartimentalizada, cosa que puede ser positiva a la hora de diseñar **protocolos más eficientes**. Pero la especialización también tiene consecuencias para la privacidad de los usuarios, porque **los especialistas son predecibles**:

con observar unas pocas descargas de un usuario especialista resulta relativamente sencillo (usando algoritmos de inferencia estadística) saber de qué tipo de usuario se trata o qué tipo de fichero será el próximo que descargue.

EXPLOSIONES CÓSMICAS QUE DESTRUYEN VIDA EN EL UNIVERSO

Los avances en astronomía observational de la última década y, en particular, el satélite Kepler de la NASA, que ha descubierto varios de miles de planetas, nos han mostrado que, básicamente, **cada estrella tiene asociado un planeta**

o un sistema planetario. En consecuencia, no es descabellado pensar que **la vida es abundante** pues, habiendo tantos planetas, muchos podrían tener condiciones adecuadas para albergar vida multicelular compleja como la que conocemos en la Tierra.

Pero el Universo parece ser más hostil de lo que podríamos pensar. Una reciente colaboración (DOI:

10.1103/PhysRevLett.113.231102) de Raúl Jiménez de la UB con la Universidad Hebreo de Jerusalén se pregunta por el papel de las explosiones cósmicas en la destrucción de vida. Interesan las explosiones más energéticas, debidas al colapso gravitatorio de **estrellas muy masivas** (entre 30 y 200 veces la masa solar) **que tienen en su centro un agujero negro**. Si éste gira rápidamente, va expulsando en forma de chorro el material que cae en él. Cuando este chorro interacciona con las capas externas del remanente de la estrella, **se forman**

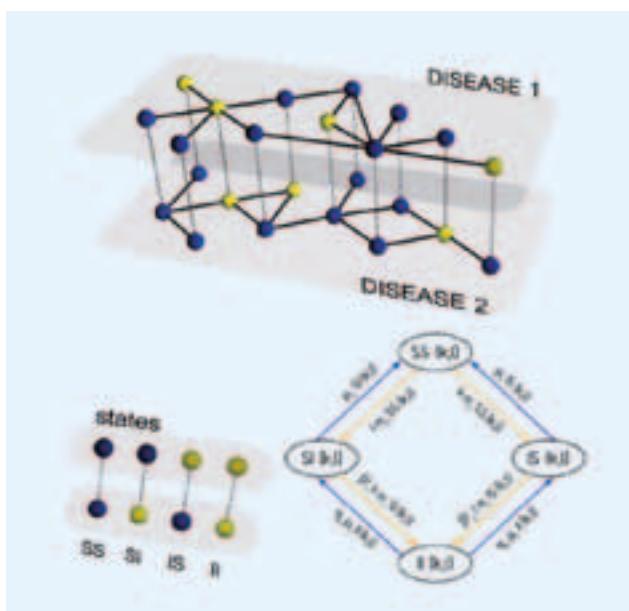
da de la estrella en torno a la que gira este planeta aumenta entonces exponencialmente, y puede **alterar el ADN de criaturas vivientes** con consecuencias catastróficas. El estudio concluye así que las explosiones de rayos gamma son suficientes para dañar la vida y, sorprendentemente, que habrían tenido un efecto devastador en el centro de nuestra propia galaxia, aniquilando la vida en la mayoría de los planetas próximos a ese centro. La **figura ilustra la probabilidad de que un planeta no se haya visto afectado en función de su posición en la galaxia**. Estas explosiones habrían tenido un **efecto casi catastrófico en el caso de la Tierra**, donde estuvieron cerca de destruir la vida durante la extinción del Ordovícico. Los investigadores también argumentan que la vida en el Universo se vio especialmente afectada, incluso parcialmente extinguida, por exposición a las explosiones de rayos gamma cuando era joven, con unos 6 millardos de años. Parece que **la vida sólo está protegida de ese efecto en zonas de baja densidad en suburbios del Universo** como nuestra Vía Láctea. Quizá esas explosiones cósmicas **expliquen la paradoja de Fermi**, ¿por qué no nos han colonizado?



rayos gamma por efecto Compton inverso con energías superiores a 100keV que escapan al medio interestelar. Al llegar estos rayos a la atmósfera de un planeta, pueden **destruir su capa de ozono**. La radiación ultravioleta recibida

LOS MALES NUNCA VIENEN SOLOS

¿De qué depende el impacto de una enfermedad infecciosa sobre una población? Probablemente es la pregunta más importante que hoy se plantea la **epidemiología matemática**, esa rama del conocimiento con casi 90 años de historia empeñada en describir cuantitativamente, mediante modelos matemáticos, la **propagación de enfermedades infecciosas**. Desde su nacimiento, esta disciplina nos ha ido permitiendo describir diferentes **epidemias reales** con notable precisión, desde el brote de peste que asoló la Europa medieval a la pandemia de gripe A-H1N1 en 2009. Sin embargo, hay aspectos todavía hoy poco estudiados, como las **interacciones entre enfermedades que se propagan simultáneamente** sobre una misma población. En los modelos clásicos, cada enfermedad es descrita



por separado, pese a que, en la realidad, multitud de patógenos se propagan simultáneamente entre nosotros, interactuando entre ellos de un modo que resulta en ocasiones fundamental para comprender su impacto global. Tal es el caso, por ejemplo, del **efecto potenciador que el VIH ejerce sobre la propagación de la tuberculosis**, que en determinadas áreas geográficas —especialmente en el África subsahariana— representa un problema de salud pública de primera magnitud. Pero los mecanismos de interacción entre enfermedades pueden ser muy variados y, en ocasiones, un tipo de patógeno atenúa la propagación de otro. Es lo que se observa en la **competición entre diferentes cepas de gripe** cada año.

La interacción entre los procesos de propagación tiene **a veces un origen socio-sanitario**, en lugar de estrictamente inmunológico. Un dramático ejemplo está teniendo lugar actualmente en los países africanos más azotados por el ébola, en los que el diagnóstico de la enfermedad y su posterior contención se ve dificultado por los elevados índices de malaria, causante de síntomas similares. Otros aspectos que influyen en el desarrollo y en el alcance de las interacciones entre enfermedades son la **arquitectura de las redes de propagación** y las **características específicas de cada proceso infeccioso involucrado**. De este modo, importantes diferencias dinámicas emergen dependiendo de si las enfermedades estudiadas se transmiten sexualmente o por vía aérea, o de si los individuos ganan inmunidad tras una primera infección.

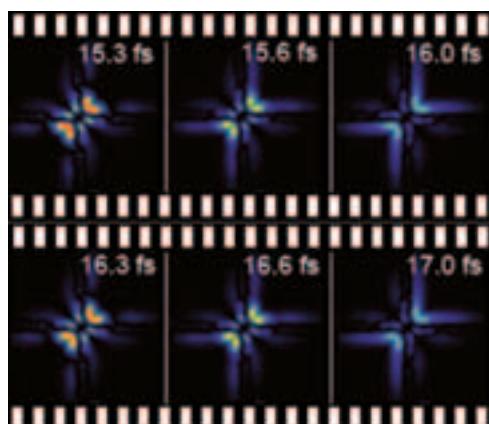
En un trabajo reciente (DOI: 10.1103/PhysRevX.4.041005), Joaquín Sanz, Sandro Meloni y Yamir Moreno del BIFI en UNIZAR, en una colaboración con la República Popular China, proponen y estudian un modelo para la propagación de dos enfermedades dinámicamente co-dependientes bajo la influencia de todos esos factores. Se trata de llegar a comprender situaciones en las que la evolución de

una enfermedad no puede explicarse sin comprender su relación con otras.

COREOGRAFÍA DE UN PAR DE ELECTRÓNS

En el modelo de Böhr, el electrón del átomo de hidrógeno se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo atómico en 152 attosegundos. El attosegundo, trillonésima parte de un segundo (1 as = 10⁻¹⁸ s), es la escala de tiempo natural para el movimiento de electrones en cualquier átomo o molécula. Es un movimiento tan rápido que no pudo ser directamente observado hasta principios de siglo, cuando la **tecnología láser pudo producir destellos de luz suficientemente cortos (del orden de unos cuantos attosegundos)** para que las **fotografías del electrón no resultaran "movidas"**. En átomos con más electrones, éstos minimizan su repulsión mutua evitándose los unos a los otros, lo que da lugar a un movimiento “correlacionado”, o “concertado”, en el que cada electrón condiciona el comportamiento de los demás.

Los físicos teóricos Luca Argenti y Fernando Martín de la UAM, en colaboración con grupos experimentales en Heidelberg y Garching, acaban de informar (DOI: 10.1038/nature14026) de que han sido capaces de reconstruir y **controlar por primera vez el movimiento correlacionado de los dos electrones del átomo de helio**. Para ello han utilizado una **combinación de pulsos de luz visible y ultravioleta con**

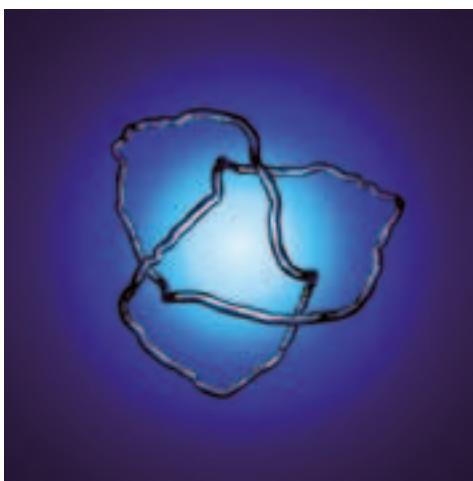


una duración de tan sólo unos pocos cientos de attosegundos. Dado que la mayor parte de los enlaces que mantienen unidos los átomos en las moléculas se forman a partir del apareamiento de dos electrones, el método desarrollado abre la puerta a controlar las propiedades de estos enlaces y, por tanto, a producir compuestos que no pueden ser obtenidos utilizando los procedimientos habituales de la química.

La figura muestra una película obtenida por esos investigadores del **movimiento de un par de electrones en el átomo de helio**. Al cabo de 15,3 femtosegundos (10^{-15} s) de iniciado el reloj, los dos electrones están cerca del núcleo (zona de color rojo cercana al centro de la imagen), y luego se alejan de él. El color indica la probabilidad de encontrar uno de los electrones en la posición A (eje vertical) y el segundo en la posición B (eje horizontal) en una línea trazada a través del átomo (a lo largo de la dirección de polarización del láser). Un femtosegundo más tarde, es decir, 16,3 femtosegundos después de haber iniciado el reloj, vuelven a su posición original.

RESUELTA UNA CONJETURA DE KELVIN SOBRE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS

El escocés **William Thomson** fue un célebre físico del siglo XIX. Entre sus logros científicos, por los que recibió el título de Lord Kelvin, destaca el descubrimiento y cálculo del **cero absoluto**, que le llevó a introducir la escala de temperaturas que lleva su nombre, y la predicción teórica y descubrimiento experimental del **“efecto Thomson”**, que relaciona calor y electricidad. También tuvo un papel relevante en estudios industriales y es célebre su



argumento para calcular la edad de la Tierra (que conducía a una estimación errónea por no tener en cuenta la energía nuclear, entonces desconocida). En 1875, motivado por sus investigaciones sobre la estructura de la materia, Kelvin planteó un problema apasionante sobre las **estructuras geométricas que pueden aparecer en un fluido en equilibrio**. Conjeturó que las ecuaciones de Euler para un fluido incompresible, $\partial_t \mathbf{u} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P$, que relacionan el campo de velocidades \mathbf{u} con la presión P en cada punto del fluido, tenían soluciones estacionarias \mathbf{u} como *tubos de vorticidad* finos arbitrariamente complejos, esto es, vórtices con formas toroidales posiblemente anudadas, mostrando una complicada topología, tales que la vorticidad del fluido o rotacional $\nabla \times \mathbf{u}$ es tangente a sus fronteras.

Alberto Enciso y Daniel Peralta del Instituto de Ciencias Matemáticas y del CSIC han confirmado esta conjetura (arXiv:1210.6271, por aparecer en *Acta Mathematica*). Su demostración ha suscitado una considerable atención pues, aparte de esperada, combina una admirable intuición física con técnicas de ecuaciones en derivadas parciales, sistemas dinámicos y geometría diferencial desarrolladas por los mismos autores. Es notable que este trabajo involucra ideas que subyacen en problemas de la electrostática, y relacionadas con los toros invariantes de Poincaré que desempeñan un papel clave en mecánica celeste. Además, los tubos de vorticidad anudados intervienen en la teoría lagrangiana de la turbulencia, y la conjetura de Kelvin ha impulsado el desarrollo de la teoría de nudos.

Kelvin propuso explicar los átomos como tubos de vorticidad en el éter con distintas topologías y tipos de nudos.

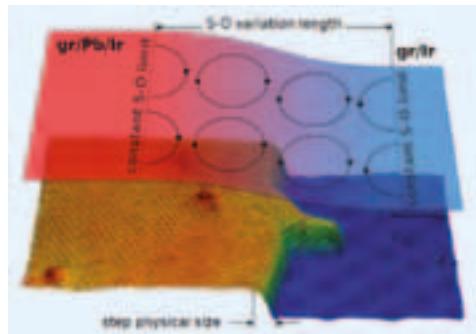
Esta teoría atómica fue pronto desterrada pero la conjetura siguió respetándose pues se basaba en el transporte de la vorticidad probado por Helmholtz y en observaciones experimentales de ondas de agua y anillos de humo, las primeras de las cuales se remontan a Maxwell. Experimentos recientes, mucho más precisos, en el laboratorio Irvine de la Universidad de Chicago han conseguido reproducir aquellas estructuras complejas en fluidos, confirmando experimentalmente el trabajo de Enciso y Peralta. La figura muestra una imagen producida por ordenador de un tubo de vorticidad (cortesía de William Irvine).

UNA FUERTE INTERACCIÓN ESPÍN-ÓRBITA EVITA COLISIONES EN GRAFENO

El diseño de dispositivos electrónicos viene sacando buen provecho de la carga del electrón pero las nuevas tecnologías han empezado a usar con ventaja su espín, esa especie de imán intrínseco capaz de dos orientaciones que simula perfectamente el bit binario. Así, mientras la electrónica clásica codifica información mediante corrientes de carga (donde los espines van orientados al azar), la llamada “**espintrónica**” puede usar **corrientes de espín** consiguiendo un almacenamiento más sencillo y directo. Los primeros dispositivos espintrónicos aprovechaban la interacción entre campos magnéticos intrínsecos del material y el espín de los electrones que circulaban por él, pero la segunda generación busca aprovechar efectos debidos, incluso en ausencia de campo externo, a la **interacción entre el espín de los electrones y su órbita**. Si esta interacción es grande, los electrones notan un campo magnético efectivo. La deseada **incorporación del grafeno a esta tecnología** —un objetivo del proyecto *Graphene Flagship* de la UE— choca con la dificultad de que la interacción espín-órbita es despreciable en el grafeno

Desde esta perspectiva, la única propiedad interesante del grafeno es la posibilidad de **transportar muy rápidamente electrones sin modificar sus espines en el trayecto**. Sería deseable que hiciera de filtro, controlando a voluntad el espín durante la transmisión. Pero, según se predijo hace unos años, manipular los

espines electrónicos en grafeno requiere una interacción espín-órbita grande. Investigadores en el IMDEA Nanociencia, el Instituto de Ciencia de Materiales del CSIC, la UAM y la UPV/EHU han encontrado (DOI: 10.1038/nphys3173) una manera práctica de **crear en grafeno una interacción espín-órbita un millón de veces más intensa que la intrínseca** intercalando una sola capa de átomos de plomo por debajo del grafeno. Los electrones en el material así modificado se comportan **como si estuvieran en presencia de un campo magnético del orden de 80 Teslas**, de modo que sus **estados cuánticos accesibles son discretos y su polarización de espín es controlable**. Técnicamente (figura) la variación espacial de la interacción espín-órbita (muy grande en grafeno intercalado con Pb y muy pequeña en grafeno sin intercalar) genera un pseudocampo magnético que confina los electrones del grafeno en niveles de Landau. Además, **ciertos estados electrónicos en estas condiciones** están “topológicamente protegidos”, esto es, **son inmunes a defectos, impurezas o perturbaciones geométricas**. Es como



si en el material espintrónico tradicional hubiera circulación por una carretera de un solo carril, ocurriendo así frecuentes colisiones, mientras que el material modificado dispusiera de un “control de tráfico” con dos carriles espacialmente separados haciendo más difíciles las colisiones.

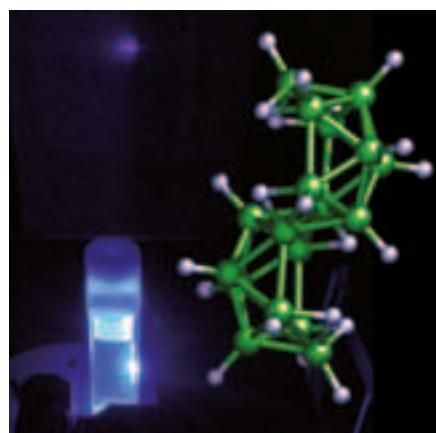
ESPERANZA DE NUEVOS MATERIALES PARA FABRICAR LÁSERES MÁS VERSÁTILES

Los láseres azules son imprescindibles en multitud de aplicaciones, desde espectroscopía y procesado de materiales,

hasta comunicaciones submarinas, biotecnología y medicina. Tras más de medio siglo de investigación y desarrollo, aún se buscan materiales generadores de luz láser azul sintonizable, eficiente y duradera, y, además, fáciles de producir y procesar y, sobre todo, baratos. Hasta hoy, tanto la investigación como la comercialización de estos materiales se ha centrado, principalmente, en compuestos orgánicos (colorantes láser, polímeros conjugados, cristales de moléculas pequeñas) o inorgánicos (puntos cuánticos coloidales, perovskitas halogenadas). Luis Cerdán, Inmaculada García-Moreno y Ángel Costela, del Instituto de Química-Física Rocasolano del CSIC, en colaboración con investigadores checos, han propuesto (DOI: 10.1038/ncomms6958) una radical alternativa a este tipo de materiales: los hidruros de boro o *boranos*.

Son moléculas inorgánicas de boro e hidrógeno con una ostensible deficiencia electrónica que les obliga a compartir densidad electrónica en una suerte de deslocalización cuasi-aromática, adquiriendo para ello **configuraciones poliédricas**. En este trabajo se ha recurrido a disoluciones de *anti-B₁₈H₂₂*, un complejo de 18 átomos de boro y 22 de hidrógeno con una estructura que recuerda, como muestra la imagen, a un fullereno dividido por la mitad y unido por sus bordes. Este compuesto ya fue sintetizado y descrito en los años 60, pero ha habido que esperar hasta 2012 a que un estudio fotofísico en profundidad revelase sus **excelentes propiedades de emisión**: un rendimiento cuántico de fluorescencia (eficiencia de conversión lumínica) del 97%.

El nuevo estudio hispano-checho ha demostrado que las disoluciones de *anti-B₁₈H₂₂* pueden emitir pulsos de luz láser azul (406 nm) de una duración de 4 nanosegundos con una eficiencia (relación entre energía de emisión y energía de excitación) que alcanza el 10%. Además, ha mostrado que este nuevo compuesto láser presenta una resistencia a la degradación por irradiación láser mayor o comparable a la de los colorantes orgánicos comerciales en esta región espectral, lo que permitiría obtener emisión láser durante más tiempo sin necesidad de renovar el medio de ganancia, **abaratando así costes y reduciendo el impacto ambiental**. Si bien es cierto que la eficiencia obtenida



en este trabajo no es excelente, sí **hay margen de mejora**. Por ejemplo, los colorantes orgánicos, siendo lo más parecido a los boranos en cuanto a propiedades estructurales y de emisión, comenzaron su andanza láser hace 50 años con unas eficiencias del 4%, y a día de hoy se publican eficiencias del 70%.

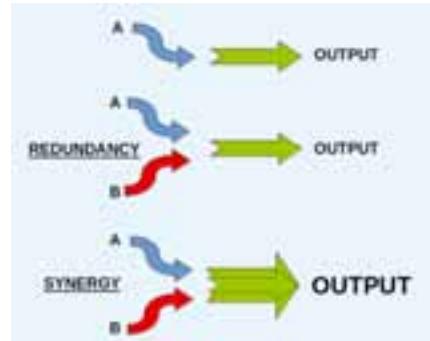
CAUSALIDAD, SINERGIA Y REDUNDANCIA EN REDES COMPLEJAS DINÁMICAS

Los **organismos vivos** típicamente formados por multitud de subsistemas semejantes, cada uno con su respectiva dinámica reguladora e interactuando entre ellos, son **paradigma de sistema complejo**. La estructura de las interacciones en estos sistemas viene siendo modelada en los últimos años **haciendo explícitas o suponiendo que existen mallas o redes** que los relacionan, y hoy se consideran desde redes neuronales hasta redes genéticas, pasando por redes de interacción de proteínas y metabólicas. Hace unas décadas se introdujo en econometría el concepto de **causalidad de Granger** para estudiar sistemas con interacciones dinámicas direccionales, “de A hacia B”, digamos. Si al estudiar una serie temporal, tratando de predecir su futuro, se consigue reducir el error incluyendo una segunda serie en el modelo de análisis, se dice que la segunda serie tiene influencia causal de tipo Granger en la primera.

En las **redes dinámicas**, cuyas interacciones cambian con el tiempo, interesa identificar los flujos de información, para lo que son relevantes los conceptos, intuitivos y elusivos al mismo tiempo, de *redundancia* y *sinergia*. La **sinergia**

es consecuencia de la cooperación: la información contenida en un conjunto de variables es mayor que la suma de la información de las variables. La **redundancia**, que propicia una menor información en el conjunto que la suma de las contribuciones individuales, se manifiesta como una elevada correlación entre variables, y puede ser consecuencia de la influencia de una variable externa.

Una reciente colaboración (DOI: 10.1088/1367-2630/16/10/105003) de los físicos Sebastiano Stramaglia y Jesús M. Cortes, en el Instituto Biocruces de Investigación Sanitaria de Bilbao, con las Universidades de Bari y Gante, trata de caracterizar estos conceptos en situaciones de interés práctico. Esto es, se **estudia la dinámica de sistemas complejos en el caso de un cerebro epiléptico**. Tomando como series temporales registros electro-cortico-gráficos (potenciales eléctricos registrados mediante sensores intracraneales) se **compara la actividad previa a una crisis epiléptica con la actividad en plena crisis**. De este modo, y analizando la causalidad de Granger entre pares de electrodos,



se ha observado cómo los electrodos asociados al área epileptógena (la que desencadena la crisis) operan sinérgicamente influyendo en el resto del sistema (conduciéndolo hacia la crisis). Si no se considerara el **efecto de la sinergia**, la acción de estos electrodos quedaría infravalorada.

En el mismo trabajo se informa acerca del estudio de datos de **expresión genética procedentes de 94 genes de un cultivo celular de carcinoma cervical** que viene manteniéndose vivo desde 1951 (HeLa). Aquí se observa que **sinergia y redundancia coexisten** en las redes, resaltando una complejidad en la interacción nunca antes observada en expresión simultánea de genes.

COMENTARIO INVITADO

Capital humano, formación universitaria y empleo. El caso de los egresados de Física

Por Teodoro Luque Martínez

En la primavera del 2013, graduados de diferentes universidades estadounidenses emprendieron acciones legales contra las mismas por haberles creado falsas expectativas laborales. En 2011 en China, país que aumentará de 8 millones a 200 el número de estudiantes para el año 2020, el Ministerio de Educación indicó que las titulaciones en las que el 60 % de sus egresados no encontraran trabajo en dos años se reducirían o eliminarían. Estas son solamente un par de noticias relativas a los egresados, a modo de ejemplo, para ilustrar la necesidad de tomarlos en consideración tanto desde una perspectiva personal, como institucional o social.

El objetivo que ahora nos proponemos es reflexionar sobre la generación de capital humano y el empleo, a través de la formación universitaria analizada por los principales protagonistas (los egresados), en este caso, para una especialidad concreta como es la de Física. Para ello comenzemos por plantear la conexión entre la teoría económica y la estrategia europea, para después seguir con el análisis del empleo de los egresados de la licenciatura de Física en España y de la opinión que tienen sobre su formación y su inserción laboral.

Tradicionalmente se han considerado como factores de producción la tierra, el trabajo y el capital. Esto se matiza al incluir como factores de crecimiento económico la innovación, el conocimiento o el capital humano, entendido como la cantidad, la calidad y el grado de formación de las personas. De manera que una empresa, una entidad, en suma, una sociedad que mejora su capital humano es aquella que aumenta la formación, las habilidades, las capacidades y la experiencia de sus integrantes.

En síntesis, según la teoría, el crecimiento económico se incrementa con el aumento de la cantidad de los factores productivos, con el aumento de la calidad de los mismos o con la mayor eficiencia en su combinación. Tanto la calidad como la eficiencia se ven afectadas especialmente por la variación en el capital humano. La inversión en capital humano, en definitiva en el trabajo (vía salud, experiencia o educación), contribuye al crecimiento económico por el aumento de la productividad en la producción y/o por la vía del progreso técnico.

En esta sección, personas notables, no necesariamente físicos, son invitadas a hablar (a través de una entrevista) o a escribir acerca de aspectos de su profesión o de su actividad, o en relación con sus experiencias que pueden interesar a los físicos. Animamos al lector a debatir temas que aquí se presentan enviando sus comentarios para la sección "Pulsos e impulsos".

Efectivamente, para conseguir crecimiento económico o para aumentar la productividad es importante la dotación de capital físico (sean instalaciones o infraestructuras). Pero a partir de determinados niveles de capital físico no se crece, o el crecimiento se ralentiza notablemente, si no se produce un aumento del capital humano.

El capital humano está asociado positivamente con la capacidad de adaptación de las personas, la tasa de actividad, el empleo, la renta y la inclusión social. A mayor capital humano más posibilidades de empleo, de mayor renta, de mayor capacidad de adaptación, de más integración social y de más formación a lo largo de toda la vida, cerrándose así un círculo virtuoso con beneficios tanto para el individuo como para la sociedad en su conjunto. Lo contrario ocurre con menor formación, que da lugar a menor posibilidad de empleo, menor renta, menor capacidad de adaptación y menor integración social. De estos planteamientos teóricos hay suficiente evidencia empírica, aunque no siempre tienen un reflejo coherente en las decisiones políticas.

En definitiva, la mejora del capital humano se consigue básicamente mediante la formación, reglada o no, formal o informal, y mediante la experiencia. Y dentro de la formación se consigue, especialmente a los efectos que ahora nos ocupa, con la formación universitaria.

La Estrategia 2020 de la Unión Europea parece tener presente estos postulados al establecer como objetivo el lograr un *crecimiento inteligente*, apostando por la educación, la I+D+i y la sociedad digital; un *crecimiento sostenible* mediante una economía que utilice más eficazmente los recursos, que sea más verde y competitiva; y un *crecimiento integrador*, persiguiendo un alto nivel de empleo que favorezca la cohesión económica, social y territorial. Para ello esta estrategia concentra los recursos en tres prioridades: ciencia excelente, liderazgo industrial y retos sociales. Al menos sobre el papel, esta estrategia apuesta por una conexión entre crecimiento, generación de capital humano, formación especializada para un desarrollo inteligente y sostenible.

Como ya se ha dicho, ahora nos ocupa la formación en un caso concreto, la de los licenciados en Física, por tanto, la formación universitaria. Conviene recordar que la misión tradicional de la universidad incluye, como aspectos nucleares, la formación y la investigación, a los cuales se les han añadido otros como extensión universitaria o responsabilidad social universitaria. Para conocer el desempeño en los distintos aspectos de la misión de la universidad es necesario medir, establecer indicadores, y ésta no es tarea fácil. Una aproximación

consiste en medir las características de los *inputs* del proceso universitario como son el nivel de formación, composición y cualidades de los estudiantes que empiezan; las características de los profesores; los recursos disponibles o el entorno del proceso de enseñanza-aprendizaje. También hay que medir los resultados que se obtienen como los relativos a la actividad investigadora y de transferencia (incluyendo publicaciones, proyectos, innovación, creación de empresas, desarrollo de capacidades formativas, por ejemplo); de conexión con la sociedad (actividades culturales o de difusión científica); los resultados de aprendizaje —incluyendo tiempo en obtención del título o empleabilidad entre otros aspectos— y, en definitiva, los relacionados con la reputación en conjunto de la universidad.

En muchos de estos indicadores tienen que ver o tienen mucho que decir los estudiantes, a la poste egresados universitarios. Su experiencia, su valoración del paso por la universidad o la tasa de empleo junto con las características del mismo es una información muy valiosa. Lo es para la universidad porque sirve o debe servir como retroalimentación para orientar su gestión, para el seguimiento del proceso de enseñanza o para la mejora los planes de estudios o los servicios prestados. Lo es para el Gobierno porque proporciona elementos para el diseño de la política educativa, de investigación o del sistema de becas. También lo es para los empleadores, ya sean empresas u otras entidades, en particular para sus decisiones de selección y gestión de personal. Y, por supuesto, para los estudiantes futuros y su entorno como forma de conocer los puntos fuertes o las dificultades con las que se pueden encontrar en las titulaciones que forman su conjunto de elección. En suma, para la sociedad puesto que la formación, además del interés individual, tiene un interés social, como ya se ha aludido, y es causa de importantes beneficios sociales.

Pues bien, centrándonos en los egresados de Física ahora se analizan, por un lado, datos de inserción laboral de los universitarios y, por otro, los datos de una encuesta de egresados de la Universidad de Granada.

Empleo en los egresados de Física según el estudio del Ministerio “Inserción laboral de los estudiantes universitarios”

El reciente estudio “Inserción laboral de los estudiantes universitarios”, presentado por la Secretaría de Estado de Educación, Formación Profesional y Universidades del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, es una fuente interesante que proporciona una fotografía del empleo de los egresados universitarios. Dicho estudio se basa en datos de la Seguridad Social de la promoción universitaria 2009/10, y analiza la tasa de afiliación de los egresados de dicha promoción anualmente durante los cuatro años que van desde 2011 a 2014, ambos incluidos.

Según los datos de este estudio, en dicha promoción las universidades españolas ofertaban 21

títulos de licenciatura en Física, que generaron 718 titulados en 2010, con una media por universidad de 34 egresados. Las universidades con más egresados fueron la Complutense de Madrid (138), Barcelona (87) y la Autónoma de Madrid (57); mientras que las universidades con menor número fueron Murcia y la Autónoma de Barcelona con 10, Islas Baleares y Extremadura con 8 y Córdoba con 7 personas tituladas.

La tasa de empleo o, más exactamente, de afiliación a la Seguridad Social de los egresados de Física el primer año tras terminar estudios (marzo del 2011) era del 36,9 %, cifra superior a la del conjunto de Ciencias Experimentales (35,8 %), pero bastante por debajo de la tasa general de todas las titulaciones (43,4 %). Sin embargo, el aumento es mayor en Física que en la media general, siendo en los años 2012 y 2013 del 59,62 % y del 61,98 %, respectivamente, frente a la media general que alcanza el 55,64 % y el 58,65 %. Al final de la serie (marzo del 2014) los titulados de Física alcanzan un porcentaje del 65,86 % de tasa de afiliación a la Seguridad Social que es superior a la media universitaria general (64,4 %) y aún más a la media de Ciencias Experimentales (63,6 %).

Hay que recordar que estos son datos de alta en Seguridad Social que no distinguen por categorías profesionales, ni respecto a la adecuación empleo-titulación. Ese dato tampoco incluye a aquellas personas que están trabajando en el extranjero. En suma, no incluye a las personas que no estén controladas por la Seguridad Social.

En todos los casos, la titulación de Física se imparte en universidades públicas, puesto que ninguna universidad privada la ofrecía en la promoción objeto del estudio. Las universidades con los mayores porcentajes de egresados/as de Física trabajando en 2014 son las de Islas Baleares (88 %), Sevilla (78 %), Barcelona (75 %), País Vasco (73 %) y Autónoma de Madrid (72 %); mientras que no superan el 50 % de los egresados con empleo las universidades de Oviedo (50 %), UNED (44 %) y Extremadura (38 %).

Cada universidad tiene una zona de influencia que se corresponde, principalmente, con una provincia o comunidad autónoma con unas características particulares. Parece interesante tratar de averiguar si puede haber algún tipo de asociación entre determinadas características socio-económicas y la tasa de empleo de los egresados. Así, la tasa de empleo de las universidades españolas presenta una correlación significativa con la tasa de actividad y aún mayor con el PIB per cápita, mientras que la correlación es negativa, significativa y elevada con la tasa de paro del territorio de influencia de la universidad. En el caso de la titulación de Física, la correlación de la tasa de afiliación de las diferentes universidades con esos indicadores es menor. Existe una pequeña correlación negativa con la tasa de paro (-0,155), una correlación mayor con la tasa de actividad (0,36) y la mayor correlación, además de ser significativa, se da entre la tasa de afiliación de los egresados y el PIB territorial (0,467).

El efecto territorio en la tasa de afiliación de las universidades presenta mayor correlación para el conjunto de los universitarios que para los egresados de Física.

Encuesta de seguimiento de egresados de la Universidad de Granada

Anualmente se lleva a cabo el estudio de seguimiento de los egresados de la Universidad de Granada mediante una encuesta *on line* a quienes terminaron sus estudios tres años antes, para que puedan tener y/o comentar alguna experiencia laboral (<http://marketing.ugr.es/encuesta/>). El cuestionario incluye preguntas sobre la experiencia de grado, experiencia de posgrado, experiencia laboral, adecuación trabajo-estudios realizados y características generales de quien responde. Además de preguntas cerradas, se proponen varias preguntas abiertas sobre la experiencia universitaria de grado, posgrado y la situación laboral, en las que el entrevistado tiene libertad para comentar lo que estime pertinente. Esto proporciona una información cualitativa muy valiosa con detalles y argumentos justificativos de gran interés.

La base de datos de las últimas cinco promociones analizadas, desde 2006 a 2010, contiene 15.568 encuestas, de las que 1.778 son egresados de Ciencias Experimentales y 90 lo son de Física.

De la comparación entre los egresados de Física, Ciencias Experimentales y resto de titulaciones se resaltan las siguientes características (con diferencias estadísticamente significativas para un nivel de significación inferior a 0,05):

- El principal motivo de elección en Física es la vocación (82,2 %), seguido a distancia del deseo de ampliar y completar conocimientos. Para esta titulación, los motivos de elección de los estudios universitarios tienen más que ver con la vocación y menos con una orientación a las salidas profesionales que para el resto de las titulaciones de Ciencias Experimentales y demás titulaciones.
- El porcentaje de participación en programas de intercambio de los estudiantes de Física es mayor que el del resto de titulaciones universitarias y, en particular, que la del resto de titulaciones de Experimentales (36,7 % frente al 14,8 %).
- Los estudiantes de Física ha disfrutado de algún tipo de beca en mayor proporción que los de otras titulaciones de Experimentales y que el resto de titulaciones. En concreto, en las becas de colaboración en departamentos de la universidad o en otro tipo de becas y ayudas diferentes a las ayudas al estudio por parte del Gobierno (Ministerio o Consejerías).
- La titulación presenta un menor porcentaje de estudiantes que han realizado prácticas coordinadas por la universidad, pero mayor porcentaje de quienes han realizado actividad laboral durante sus estudios, siempre en comparación con el resto de titulaciones de Experimentales e incluso con el resto de titulaciones universitarias.



- Respecto a las características de la oferta formativa y el desarrollo de capacidades, quienes estudiaron Física valoran más alto que los de otras titulaciones de Experimentales (en líneas generales también respecto al resto de titulaciones) la formación teórica recibida, el equipamiento y fondos bibliográficos disponibles, las habilidades desarrolladas relativas a informática y gestión de la información, al desarrollo de razonamiento crítico o de la capacidad de análisis y síntesis. Por el contrario, se muestran más críticos que el resto en el énfasis que se pone en la docencia práctica, en la calidad de la docencia, además de en el desarrollo de las capacidades de trabajo en equipo y de liderazgo.
- Como para el resto de egresados, los principales puntos débiles en la formación son los que tienen que ver con la orientación práctica de la formación, la preparación para la inserción laboral, la oferta de prácticas y la formación en emprendimiento.
- Los egresados de Física declaran tener un mayor conocimiento de inglés, continúan la formación de posgrado, en concreto mediante Máster Universitario y Doctorado y no mediante un segundo título de licenciatura o bien otro tipo de másteres, en un porcentaje mucho más alto que el resto de titulaciones de Experimentales y demás titulaciones universitarias.
- En el momento de realizar las diferentes encuestas de seguimiento presentan una tasa de empleo superior a las de titulaciones de Experimentales y del resto de titulaciones. En el caso de Física, destacan como vías de acceso al empleo la vía de becario y la de la oferta pública de empleo.
- Como tipo de relación contractual y en comparación con las titulaciones de Experimentales, para Física destaca la forma de becario y contrato a tiempo parcial y menos la contratación laboral (tanto indefinida como de tiempo parcial).
- Por sectores, hay una proporción mayor de egresados de Física, en comparación con el resto de titulaciones, trabajando en la enseñanza univer-

- sitaria y en otros servicios públicos y, claramente menor, en enseñanza no universitaria y sanidad.
- Los egresados de Física presentan una satisfacción moderadamente elevada con su empleo actual (en el momento de la encuesta) y con la adecuación trabajo-estudios realizados, mayor que la media de las titulaciones de Experimentales o de otras titulaciones. Así, consideran que su empleo responde mejor a sus expectativas, que en él desarrollan tareas que requieren formación universitaria y que su formación universitaria es imprescindible para el acceso a dicho trabajo.
 - El valor percibido de su formación universitaria es mayor para los de Física que para el resto, puesto que tal formación ha respondido razonablemente bien a los deseos y, en suma, consideran que el resultado de su paso por la universidad presenta un balance positivo.
 - Por otro lado, los egresados de Física están claramente más implicados con la universidad puesto que consideran que la función de la universidad es más importante, relevante, valiosa, útil e interesante que los del resto de titulaciones.
 - Finalmente, la presencia de mujeres en la titulación de Física es muy inferior a las del resto de titulaciones (23 % de mujeres frente al 68,6 % en Experimentales), en términos generales no hay diferencias en las respuesta de hombres y mujeres a los diferentes ítems.

De todo lo anterior cabe resaltar, a modo de conclusión, la conexión entre crecimiento económico, la generación de capital humano y la formación de la que se hace eco la Estrategia 2020 de la Unión Europea. También la importancia del seguimiento de los egresados para conocer sus motivaciones, su experiencia universitaria, así como en el proceso de inserción laboral puesto que son actores fundamentales en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

El número de titulaciones de Física apenas significa el 0,8 % del total de las titulaciones del sistema universitario español, y proporcionan un 0,38 % de los egresados totales. Para los titulados en Física, la tasa de afiliación a la Seguridad Social durante los 4 años de la serie (2011-2014) es superior a la de Ciencias Experimentales y, aunque comienza siendo inferior a la tasa media de todas las titulaciones, también es mayor la tasa general, superando en 1,4 puntos a la tasa general y en 2,2 a la de Ciencias Experimentales.

El estudiante de Física es claramente vocacional y no está especialmente orientado a la salida profesional en su elección de carrera. Mayoritariamente hombre, tiene un perfil más internacional que el resto, goza durante sus estudios en mayor porcentaje de becas y es más proclive a continuar con su formación de posgrado mediante máster oficial o doctorado. Son estudiantes con elevada implicación universitaria. Reconocen como puntos débiles en su formación la escasa orientación práctica,

la reducida oferta de prácticas o la preparación para la inserción laboral y el emprendimiento.

Además de tener una mayor tasa de empleo, los egresados de Física tienen mayor satisfacción con su empleo, que consideran más adecuado a la formación recibida, siempre en comparación con otras titulaciones. Aunque la vía de acceso más frecuente es la de becario y en el sector de la enseñanza universitaria.

Esta es la foto actual pero que hay que compaginar con las tendencias generales relativas al futuro del trabajo. El empleo y su calidad es un problema de primera magnitud en nuestro país en el presente y, lamentablemente, lo seguirá siendo por bastante tiempo. Los cambios que se vienen produciendo en el mercado laboral continuarán y nos referimos no tanto a los cambios normativos sino a las transformaciones de tipo social y económico en la estructura productiva. Las tendencias de futuro apuntan a una mayor flexibilidad y autonomía. Es decir, a formas de trabajar con criterios más flexibles en cuanto al tiempo de dedicación con más presencia de la dedicación parcial; en cuanto al lugar de trabajo, que no será exclusivamente en un sitio o una oficina fija y con más trabajo a distancia; incluso en cuanto al horario con franjas horarias más variables; en cuanto a la dedicación a una sola entidad. También habrá más tendencia al autoempleo, al emprendimiento como forma de buscar oportunidades de empleo que posibiliten la obtención de ventajas preferidas, por sus expectativas, a las que genere un empleo en una compañía. En fin, el empleo estará más internacionalizado por los lugares de trabajo, los contactos necesarios o las relaciones para llevarlo a cabo.

Todo ello da pistas para poner el énfasis en determinados aspectos de la formación y en la necesidad de adoptar medidas con decisión para responder a los posibles déficits y los seguros retos que el futuro depara.

En suma, la inserción laboral es un objetivo a tener en cuenta que no se puede ignorar pero que no puede ser el único criterio a considerar como obsesión. Puesto que la inserción laboral no depende solamente de la calidad de la docencia, sino que está condicionada por el contexto económico, como se ha comprobado, o por el nivel de saturación de titulados en el mercado. Por supuesto hay margen para mejorar la inserción laboral mediante la actuación decidida —acorde con el diagnóstico actual y las tendencias de futuro— en: orientación práctica de la formación, coordinación de formación teórica y práctica, preparación para la inserción laboral y el emprendimiento o logro de un perfil internacional

Teodoro Luque Martínez

es catedrático en el Departamento de Comercialización e Investigación de Mercados de la Universidad de Granada

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

En marzo de 2014, el equipo que trabajaba con el telescopio BICEP2 anunció que había encontrado un patrón característico en la polarización de la radiación de microondas procedente de una parte significativa del cielo. Tras tener en cuenta el efecto del polvo de nuestra propia galaxia, interpretaron sus observaciones como **ondas gravitacionales primigenias**, estiradas por la inflación cósmica y grabadas en la radiación de fondo. Algunos meses más tarde

datos de la colaboración *Planck* sugirieron que, tras todo el revuelo, el polvo de nuestra galaxia podría haber producido el resultado de BICEP2. Ahora, un artículo con-

junto de investigadores de BICEP2, *Planck*, y de la colaboración *Keck Array*, **no encuentra evidencia sólida de la existencia de ondas gravitacionales primordiales**. Sin embargo, aún existe la posibilidad de que los datos originales de BICEP2 contengan en algún lado evidencias de ondas gravitacionales; la investigación continúa. (physicstoday).

Madrid ha sido la comunidad española donde las universidades se han encarecido más para las familias durante los tres últimos años: un 51,65 %. La subida de las tasas por matrículas y la reducción de becas a que han conducido los recortes de gasto público han elevado la universidad también por

¹ Animamos a nuestros lectores a que nos hagan llegar noticias, suficientemente documentadas, que la redacción pueda considerar y editar para esta sección.

En el twitter de la RSEF, @RSEF_ESP (que se puede leer en https://twitter.com/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"!

encima de la media nacional del 30,84 % en otras tres comunidades: **Canarias (un 35 %, 4 %)** y **Cataluña y Cantabria (cerca del 33 % cada una)**. Por el contrario, **las autonomías con menores subidas** del precio total de la universidad para las familias han sido Asturias (12 %), País Vasco (12,2 %), Galicia (13,8 %) y Aragón (14,6 %). A pesar de que 2014 cerró con un Índice de Precios de Consumo negativo por primera vez desde 1962, **educación, sanidad y transportes públicos** (servicios públicos más afectados por los recortes de gasto) **acumulan desde principios del 2012 incrementos respectivos en ese índice del 32,2 % las universidades, 19,6 % medicamentos y material terapéutico, y 16 % transporte público urbano**. (Ibercampus).

La película *Interstellar*, dirigida por Christopher Nolan, ha presentado el que tal vez sea el **primer intento de mostrar un agujero negro en el cine de forma físicamente realista**. Para ello han con-

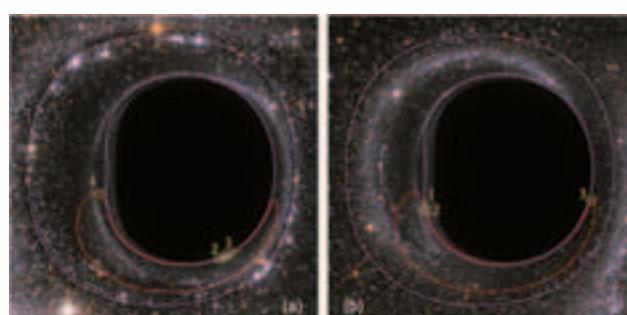


Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

mular la propagación de haces de luz a través del espacio-tiempo curvo de las inmediaciones de un agujero negro. Los vídeos que acompañan al artículo, de acceso abierto, son realmente espectaculares, y recomendamos efusivamente dedicar unos minutos a disfrutarlos. (<http://iopscience.iop.org/0264-9381/32/6/065001> DOI:10.1088/0264-9381/32/6/065001).

Las **magnitudes físicas** observables siempre aparecen al medirlas como **números reales**. Sin embargo, **los campos complejos son fundamentales en la teoría que subyace a multitud de fenómenos**, en particular la física estadística de las transiciones de fase. Por ejemplo, en 1952, C.

N. Yang y T. D. Lee desarrollaron una teoría que relaciona las transiciones de fase de diversos sistemas con las propiedades matemáticas de su función de partición. En particular, por encima de la temperatura crítica de la



tado con la colaboración del físico Kip S. Thorne, que alguno de nuestros lectores recordará como uno de los autores de *Gravitation*, uno de los libros de texto más populares sobre relatividad general. La colaboración ha sido de ida y vuelta, porque junto a miembros del equipo de efectos especiales de la película, Thorne acaba de publicar un **artículo en *Classical and Quantum Gravity* explicando las técnicas que han utilizado para si-**

transición, los ceros de la función de partición son complejos, acercándose al eje real según nos aproximamos a la temperatura crítica en el límite termodinámico. Las propiedades de estos llamados ceros de Yang-Lee proporcionan mucha información e intuición sobre el sistema, pero hasta ahora se pensaba que no eran físicos ni tenían manifestación en el mundo real. Sin embargo, Xinhua Peng y colegas acaban

de mostrar que los campos magnéticos complejos asociados con un baño de espines cerca de una transición de fase se pueden relacionar con la coherencia cuántica de un espín de prueba acoplado al baño. Usando esta relación han podido observar experimentalmente por primera vez el campo magnético imaginario y los ceros de Yang-Lee en el mundo real. Además de su valor desde el punto de vista fundamental, este descubrimiento podría conducir a nuevas formas de estudiar transiciones de fase en materiales complejos. (*Physical Review Letters*, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.010601).



En junio de 2014, el CERN anunció que el LHC se activará otra vez en 2015 para una nueva ronda de tres años de investigaciones. Lo que diferencia a esta segunda ronda de funcionamiento de la anterior es la energía a la que se producirán las colisiones. En los primeros tres años de operaciones del LHC, los protones chocaban a 7 teraelectronvoltios (TeV), solo la mitad de la capacidad de la máquina. En esta segunda fase las partículas colisionarán a 13 TeV, aún por debajo de la energía máxima del LHC pero a una escala hasta ahora desconocida que según el director general del CERN, Rolf Heuer, supone disponer de "una máquina nueva, preparada para situarnos en el camino hacia nuevos descubrimientos". Según el jefe de la Unidad de Teoría del Departamento de Física del CERN, Ignatios Antoniadis, a los niveles de energía que alcanzará el LHC se deja atrás el Modelo Estándar para entrar en un territorio desconocido. (<https://www.bbvaopenmind.com/el-lhc-despierta-de-nuevo/>).

La colaboración del experimento LHCb del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) ha anunciado el descubrimiento de dos nuevas partículas de la familia bariónica, las formadas por quarks. Conocidas como Ξ_b' y Ξ_b , las partículas habían sido predichas por el modelo de quarks, pero no se habían visto hasta ahora. Según informa el Laboratorio Europeo de Física de Partículas Elementales (CERN), al igual que los protones que acelera el LCH, las nuevas partículas están for-

madas por tres quarks unidos por la fuerza nuclear fuerte, una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza, pero, en este caso, son seis veces más masivas que un protón. El equipo de investigación, en el que participa el Instituto de Física Corpuscular (IFIC, Universitat de València-CSIC), ha estudiado la masa de las partículas, las tasas de producción y la anchura de desintegración (indicador que mide su estabilidad), entre otros detalles. Y los resultados encajan con las predicciones de la Cromodinámica Cuántica dentro del Modelo Estándar de la Física de Partículas, la teoría que describe las partículas elementales y sus interacciones. Estos resultados se desprenden de los datos obtenidos en el CERN hasta 2013, antes de que el LHC iniciase su parón temporal. (Ibercampus).

El 79,7 % sigue prefiriendo leer en papel a hacerlo en una pantalla digital. Lo refleja el barómetro de diciembre del CIS, donde solo el 11,1% se confiesa esclavo del libro electrónico. Es mayor la proporción, sin embargo, de consumidores de periódicos que los leen en formato digital. Concretamente, el 28,2% prefiere el kiosco online y el 63,9 el papel. (Ibercampus).

En la Edad Media los alquimistas trataron de convertir el plomo en oro. ¿Cuánto más maravilloso no sería sacar oro a partir de la... caca (con perdón)? En un estudio publicado en *Environmental Science & Technology*, un equipo de la Arizona State University usó espectrometría de plasmas para medir la cantidad de diferentes metales en el plasma súper caliente en el que convirtieron lodos procedentes de aguas residuales. ¿El resultado? En las aguas residuales producidas en un año por una ciudad de un millón de habitan-

tes puede llegar a haber 13 millones de dólares en metales, 2,6 millones en oro y plata. Los metales preciosos podrían haber encontrado el camino de las alcantarillas gracias a la minería, los procesos de galvanización, la fabricación de productos electrónicos y joyas, o el uso de catalizadores industriales y de automoción. Y los metales no son lo único de valor presente en las aguas residuales. Algunas depuradoras están separando fósforo y nitrógeno, que luego se vende como fertilizante. Una planta sueca está trabajando en la posibilidad de producir bioplásticos a partir de aguas residuales. Y la fundación Bill & Melinda Gates ha promovido un incinerador de lodos que genera electricidad y agua potable. (*Science* DOI: 10.1126/science.aaa6359).



La mayor parte del agua que sostiene la vida en la Tierra probablemente viniera de asteroides y no de cometas, como se suponía hasta ahora. Esa es la conclusión de los científicos que trabajan en la misión espacial Rosetta, que han medido los niveles de isótopos de hidrógeno en el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko. La proporción de deuterio e hidrógeno en el agua del cometa es mucho mayor que la relación que se encuentra en la Tierra, lo que sugiere que los cometas suministraron a la Tierra sólo una pequeña fracción de su agua. (physicsworld.com).

En los mercados financieros, comerciar con un activo induce una perturbación que cambia su precio. Los modelos económicos tradicionales asumen que el precio varía linealmente con el volumen de comercio: pequeñas perturbaciones inducen cambios pequeños. Sin

embargo los mercados reales pueden ser fuertemente no lineales: pequeñas transacciones pueden tener un impacto desproporcionado en los precios, y a veces pueden desencadenar respuestas dramáticas del mercado. Iacopo Mastromatteo y colegas de la École Polytechnique y de Capital Fund Management, en Francia, proponen en *Physical Review Letters* un nuevo modelo que describe los mercados como partículas



que interaccionan. Modelan el proceso de negociación como un sistema de dos partículas en que un tipo de partícula representa las órdenes de venta y el otro, las órdenes de compra. Cuando las órdenes de compra y venta se encuentran en el mismo nivel de precios, las partículas se aniquilan. **Los resultados sugieren que los mercados son críticos**, es decir, se comportan como un material al borde de una transición de fase, como por ejemplo una transición de paramagnético a ferromagnético, donde la respuesta del material a un pequeño campo magnético diverge. Este resultado podría explicar por qué los mercados financieros se comportan como sistemas turbulentos. (*Physics*, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.268701).

Un genetista, Bert Vogelstein, y un matemático aplicado, Cristian Tomasetti, de la universidad Johns Hopkins de Baltimore, han publicado en *Science* una fórmula matemática sencilla para explicar la génesis del cáncer. Su modelo funciona de la siguiente forma: se cuenta el número de células en un órgano, se identifica el porcentaje compuesto por células madre de vida larga, y se determina cuántas veces se dividen las células madre. Con cada

El físico Enrique Arribas se transmuta en Stephen Hawking a través del artículo “**El parpadeo de Hawking: el mundo terminará con hielo o fuego**”, en el que repasa las principales teorías del célebre científico británico con motivo de su reciente cumpleaños. El artículo está disponible en la web de ABC en este enlace: <http://www.abc.es/ciencia/20150117/abci-parpadeo-hawking-mundo-terminara-201501161640.html>



Desde que en la década de 1750 se descubriera en Herculano una biblioteca de **rollos de papiro**, convertidos en poco más que **bultos carbonizados por la erupción del Vesubio en el año 79**, los arqueólogos han intentado varias técnicas para desenrollarlos, pero siempre se corría el riesgo de destruir los rollos en el proceso. Ahora, una **nueva técnica que utiliza rayos X de alta energía ofrece una forma no destructiva de leer estos textos antiguos**. Al colocar un pergamo enrollado en la trayectoria de un haz de rayos X producidos por un acelerador de partículas, se puede medir una diferencia clave entre los papiros quemados y la tinta en su superficie: la rapidez con que los rayos X se mueven a través de cada sustancia. Esto permite diferenciar entre el pergamo y la escritura en él y, poco a poco, reconstruir el texto. De momento sólo se han reconstruido unas pocas palabras completas, según se refleja en un artículo de *Nature Communications*, que sin embargo han sido suficientes para comprar la caligrafía del manuscrito estudiado con otro del siglo I a. C. atribuido al filósofo Filodemo de Gadara. Se necesitan más estudios con rayos X de aún mayor energía para reconstruir todo el texto en éste y otros pergaminos, pero la técnica ofrece la posibilidad de leer obras que no se han visto desde hace casi 2.000 años. (*Science*, DOI: 10.1126/science.aaa6367).

Según datos del Instituto Nacional de Estadística, **el colectivo de investigadores en España representaba** a 123.224 personas con jornada completa en 2013, lo que supone **11.429 menos que en 2010 (un descenso del 8,5 %)**, cuando el sector de Investigación y Desarrollo (I+D) alcanzó el techo en cuanto a gasto y perso-

nal dedicado a estas actividades. **Las mujeres representaron un 40,2 % del personal de I+D a tiempo completo en 2013. El gasto total en I+D en 2013 ascendió a 13.012 millones de euros**, lo que significa **un descenso del 2,8 % respecto a los 13.392 millones del año anterior y la cifra más baja desde 2006**. El gasto de 2013 representó el 1,24 % del Producto Interior Bruto (PIB), frente al 1,30 % de 2012 y el 1,39 % de 2010. La media de la UE ronda el 2 %. (*El País*).

división, hay un riesgo de que la célula hija contenga una mutación causante de cáncer. Así, los tejidos en los que ocurre el mayor número de divisiones de células madre debieran ser los más vulnerables al cáncer. Tras comparar las predicciones de este modelo con las estadísticas reales de cánceres, los autores concluyen que esta teoría explica dos tercios de todos los cánceres. **Esto significaría que la causa de la mayoría de los casos de cáncer sería... pura mala suerte biológica.** (DOI: 10.1126/science.1260825).

En un artículo publicado en *Physical Review B*, los científicos de la Universidad de Granada Daniel Manzano y Pablo Hurtado han abierto las puertas para la construcción del **primer interruptor cuántico de corriente controlado por simetría**. En este trabajo, los científicos han descrito cómo la simetría, uno de los conceptos más profundos y poderosos de la física teórica, permite controlar y manipular el transporte de energía en sistemas cuánticos abiertos. El siguiente paso, explican, es que se pueda realizar experimentalmente un interruptor cuántico controlado por simetría usando como base este diseño. La fabricación de este dispositivo es todavía un gran reto para la comunidad científica internacional, y podría servir, por ejemplo, para construir materiales aislantes controlados, o diseñar placas solares más eficaces, que optimicen el transporte de energía y, por tanto, su rendimiento, usando la simetría como herramienta básica. El equipo actualmente trabaja en un diseño realista de un interruptor cuántico controlado por simetría, basado en átomos fríos en cavidades ópticas coherentes, y usando microrresonadores acoplados a sendos baños para conectar el sistema con fuentes térmicas a diferentes temperaturas. (SINC, DOI:10.1103/PhysRevB.90.125138).

Homero, ni en *La Ilíada* ni en *La Odisea*, describió el cielo como azul, y cuando se refiere al mar le atribuye el color del vino. Esta ausencia no es exclusiva del griego clásico. Como explica el lingüista Guy Deutscher, **si un idioma tiene una palabra para el color azul, tendrá una para el color rojo, pero no necesariamente sucederá lo contrario**. En la evolución de las lenguas el azul siempre aparece más tarde. Según Deutscher:



“La gente encuentra un nombre para el rojo antes que para el azul no porque puedan ver el primero y no el segundo, sino porque inventamos nombres para cosas de las que creemos que es importante hablar, y el rojo (el color de la sangre) es más importante que el azul para la vida de la gente en todas las culturas más simples”. Como sucede en el idioma, **el pigmento azul también tardó en llegar a la pintura: los primeros en sintetizarlo fueron los antiguos egipcios**. Para conseguirlo, aunque había algunas variantes, se utilizaba arena del Nilo, sal mineral, bronce como fuente de cobre y se cocía a temperaturas de entre 800 y 1.000 grados. En un trabajo recientemente publicado en la revista *Inorganic Chemistry*, Pablo García-Fernández, Miguel Moreno, y José Antonio Aramburu, de la Universidad de Cantabria, se preguntan **cómo es posible que el complejo CuO₄⁶⁻, formado por el ion Cu²⁺ y cuatro iones oxígeno, dé lugar al color azul intenso del compuesto Cu-CaSi₄O₁₀** (base del pigmento egipcio) mientras que el color de muchos otros materiales, que contienen el mismo complejo, es claramente distinto. Según el trabajo, aunque las moléculas CuO₄⁶⁻ son, en principio, las responsables del color, éste depende también de los campos eléctricos internos que generan el resto de iones del compuesto CuCaSi₄O₁₀ sobre esas moléculas. Así mismo, se demuestra que estos campos internos, cuya influencia no se suele tener en cuenta, son los causantes de las diferencias de coloración entre el pigmento egipcio y otros compuestos similares que contienen el mismo complejo de cobre. (*El País*, DOI: 10.1021/ic502420j).

Un estudio de Obra Social “la Caixa”, Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), y Everis, muestra que **las acciones de divulgación aumentan casi un 6% el número de jóvenes interesados en estudiar ciencia o tecnología**. El estudio ha expuesto a 2.500 alumnos de ESO, justo antes

de que tomaran su decisión de seguir unos estudios formativos STEM (por sus siglas en inglés: *Science, Technology, Engineering and Mathematics*) o no STEM, a dos actividades de divulgación organizadas por CosmoCaixa y FECYT en Madrid y Barcelona, un taller de experimentos y una conferencia-diálogo con un científico. En estos 2.500 alumnos se ha evaluado, cuantitativamente mediante encuesta, el impacto en el interés por estudiar STEM que tuvieron las actividades en los alumnos que las realizaron, comparativamente a aquellos que no las realizaron.

Algunas otras conclusiones del estudio demuestran que:

- **Las actividades tienen mayor impacto entre los estudiantes procedentes de entornos más desfavorecidos.** Entre este segmento, el interés por estudiar STEM aumenta un 9,5%.
- **Las acciones realizadas no consiguen impactar tanto en las chicas como en los chicos.**
- **En aquellos estudiantes con peor rendimiento académico las actividades les influyen más,** y como resultado un 12,8 % más de alumnos optarían por estudios STEM. (FECYT).

La manipulación de estados cuánticos, su preparación de acuerdo con especificaciones dadas, codificarlos en algoritmos cuánticos y, finalmente, medir observables, son algunas de las principales operaciones que deberá realizar cualquier prototipo de ordenador cuántico. Las puertas cuánticas que se utilicen para hacer estas tareas pueden ser **manipuladas mediante la modificación de sus condiciones de contorno**. Esto tiene la ventaja, frente a otros esquemas de computación cuántica, de que no se necesita interacción con todo el volumen del sistema. Matemáticamente, el problema de considerar diferentes condiciones de contorno es equivalente a resolver el problema de fijar diferentes extensiones autoadjuntas de los correspondientes operadores simétricos que describen la dinámica. Usando esta técnica, Alberto Ibort, Giuseppe Marmo y Juan Manuel Pérez-Pardo muestran en un reciente trabajo publicado en *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* cómo generar estados entrelazados a partir de otros que no lo están. Como ejemplo analizan el sistema híbrido compuesto por un rotor cuántico plano y un sistema de espín bajo una amplia clase de condiciones de contorno. A este sistema bipartito lo han bautizado como *brújula cuántica*. (*Europhysics News*, DOI: 10.1088/1751-8113/47/38/385301).

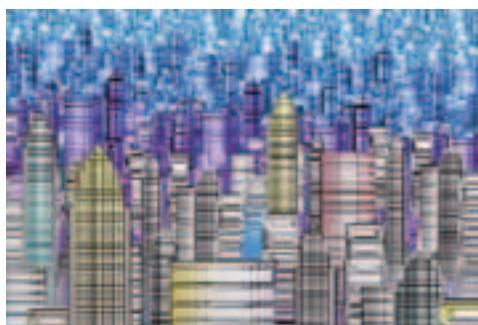
Un algoritmo informático se convierte en el mejor jugador de póquer del mundo, hasta el punto que se puede considerar que **el póquer está esencialmente resuelto**. Antes se había resuelto otros juegos más sencillos, como las damas o el conectar cuatro. Sin embargo, la diferencia principal entre el póker y estos otros juegos es que **en el póker el ordenador tiene información incompleta**, pues no sabe las cartas que tiene en la mano su adversario. El programa aprende de sus propios errores, y ha llegado a su capacidad actual tras jugar millones de partidas contra sí mismo. Ahora tiene una estrategia perfecta, en la que es capaz de marcarse faroles, y es virtualmente invencible, pues en cada mano usa siempre la mejor estrategia posible. La variedad de póker a la que juega el algoritmo es la *heads-up limit hold'em*, una variante del *Texas hold'em* en la que sólo hay dos jugadores y las apuestas están limitadas. Los autores del algoritmo trabajan en la universidad de Alberta, en Canadá, y han publicado su trabajo en la revista *Science*. Por cierto, para quien se sienta afortunado, **se puede jugar contra el algoritmo en la dirección <http://poker.srv.ualberta.ca>** (DOI: 10.1126/science.1259433).



El estereotipo del genio científico limita las carreras académicas de las mujeres. No es cierto que las mujeres sean incapaces de trabajar largas horas o que no puedan competir en campos altamente selectivos. Tampoco que sean menos analíticas que los hombres. A pesar de ello, **están subrepresentadas en aquellos campos académicos**

—como la física, las matemáticas y la filosofía— cuyos miembros en activo han puesto mucho énfasis en que poseer una mente brillante es inherente a la profesión, según un estudio sobre la brecha de género en el mundo académico que publica la revista *Science*. (SINC, DOI: 10.1126/science.1261375).

Un estudio realizado por Henry Lin y Abraham Loeb, del Centro de Astrofísica Harvard-Smithsonian (EE. UU.), con nuevos modelos matemáticos ha revelado que existe un **paralelismo notable entre la manera en que los humanos levantan sus ciudades y la manera en que se formaron las galaxias en el universo primitivo**. Ambos procesos, aseguran, son matemáticamente equivalentes, lo que implicaría que en ambos sistemas funciona un mismo principio unificador. Su conclusión es que las ciudades se forman por variaciones en la densidad de población similares a las variaciones en la densi-



dad de materia que dieron lugar a las galaxias en el universo primitivo. En otras palabras, que el **comportamiento humano a escala masiva sigue el mismo patrón que el crecimiento de las galaxias**. (Tendencias21).

Graphenano, compañía española productora de grafeno a escala industrial, se ha unido a la Universidad de Córdoba para elaborar las primeras **baterías de polímero de grafeno, que usadas en un coche eléctrico podrían permitir una autonomía de hasta mil kilómetros**. La empresa Grabat Energy será la encargada de poner en marcha una planta para producir las celdas de las baterías durante el primer semestre de 2015. Las baterías de grafeno triplican la potencia de la mejor tecnología actual del mercado. Asimismo, estas baterías pueden durar hasta cuatro veces más que las tradicionales de hidruro metálico y dos veces más que las de litio. Las

propiedades del grafeno también permiten reducir el peso de las baterías a la mitad de las convencionales, aumentando el rendimiento y la autonomía de las máquinas en las que se aplica. Otra de las ventajas de las baterías es el coste de las mismas. Se calcula que serán hasta un 77% más baratas que las baterías de litio. Además serán compatibles con los dispositivos o vehículos ya existentes, evitando una adaptación de infraestructura para su uso y favoreciendo su rápida implementación. Los prototipos de la tecnología ya se han fabricado con éxito en Córdoba, y dos de las cuatro grandes firmas de automóviles alemanas (sus nombres no han sido revelados) empezarán a probarla en sus vehículos con vistas a acelerar su implantación. (Spain Technology, *El Mundo*).



Más allá de Plutón podrían esconderse al menos dos planetas desconocidos, cuya influencia gravitacional determina las órbitas y la extraña distribución de objetos que se observan detrás de Neptuno. Así lo revelan los cálculos astronómicos efectuados por investigadores de la Universidad Complutense de Madrid Carlos de la Fuente Marcos y Raúl de la Fuente Marcos y su colega de la Universidad de Cambridge Sverre J. Aarseth. La confirmación de esta hipótesis supondría toda una revolución en los modelos sobre el sistema solar. Para realizar su estudio, que se publica en dos artículos de la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Letters*, los investigadores han analizado los efectos del denominado “mecanismo Kozai”, relacionado con la perturbación gravitacional que ejerce un cuerpo grande sobre la órbita de otro mucho más pequeño y lejano. Como referencia, han considerado cómo funciona este mecanismo en el caso del cometa 96P/Machholz1 por la influencia de Júpiter. (SINC, DOI: 10.1093/mnras/stu2230).

¿Cómo y en qué hábitats surgieron las primeras formas de vida sobre la Tierra? Una condición previa fundamental para el origen de la vida es que biomoléculas relativamente simples deben haber tenido la oportunidad de formar estructuras más complejas, capaces de reproducirse y almacenar información

genética en una forma químicamente estable. Pero este escenario requiere algún mecanismo por el cual las moléculas precursoras se puedan acumular en una solución concentrada. En los

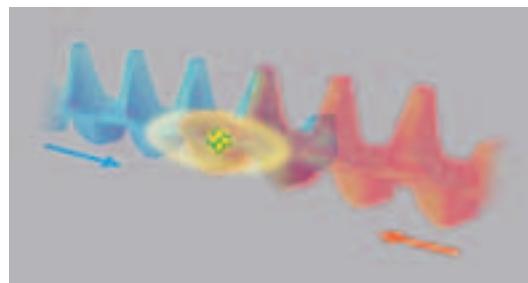


oceanos primitivos, tales compuestos han debido estar presentes en concentraciones infinitesimales. Un equipo de la Universidad Ludwig-Maximilian de Munich ha propuesto en *Nature Chemistry* un ambiente que podría proporcionar las condiciones necesarias: las **rocas porosas del fondo de océano cercanas a puntos de actividad volcánica**, tales como las fumarolas hidrotermales. Intentando reproducir este ambiente en el laboratorio, han estudiado experimentalmente la **difusión de moléculas de ARN** de distintos tamaños en poros en los que se había creado un **gradiente de temperaturas**: más calientes en el fondo, imitando las condiciones de las rocas porosas en el océano. En el fondo caliente del poro el ARN puede reaccionar para formar cadenas cada vez más largas. Esto, unido a que las moléculas más cortas tienen más probabilidad de escapar del poro, provoca que en el poro se vaya produciendo un enriquecimiento en moléculas largas de ARN. La idea va un paso más allá, pues propone que las moléculas largas que difundan hasta la parte más fría del poro tendrían ahí más posibilidades de formar complejos con ácidos nucleicos presentes en el medio, apareciendo así un **primitivo mecanismo de replicación** del ARN. (LMU, DOI: 10.1038/nchem.2155).

Se ha medido por primera vez la curvatura de un campo gravitacional a lo largo de una distancia de aproximadamente un metro, mediante el estudio de nubes de átomos ultrafríos interfiriendo entre ellos en la cercanía de grandes masas. La medición —hecha por físicos en Italia y los Países Bajos y publicada en *Physical Review*

Letters— se podría utilizar para construir mejores mapas del campo gravitatorio terrestre, para la búsqueda de petróleo, o para medir de una forma nueva la constante de Newton de la gravedad. La interferometría atómica se ha utilizado durante más de una década para estudiar la gravedad —la idea básica es disparar una serie de pulsos de láser hacia arriba y hacia abajo en una nube de átomos ultrafríos depositados en una columna vertical—. Los láseres dividen los átomos en dos nubes que se desplazan hacia arriba a un ritmo diferente y así alcanzan alturas diferentes en tiempos distintos. Gobernados como son por la mecánica cuántica, los átomos se comportan como ondas, y así las dos nubes se vuelven ligeramente fuera de fase entre ellas como resultado de tomar dos caminos diferentes. Usando más pulsos de láser, se hace a las nubes recombinarse en un cierto punto de la columna. Ahí las interferencias entre los átomos revelan la diferencia de fase entre las nubes. Este cambio de fase está relacionada con el campo gravitacional experimentada por los átomos, que por lo tanto puede ser calculado. **La novedad de los resultados recién publicados es que se utiliza el mismo aparato para medir la gravedad no en dos alturas distintas, sino en tres. Esto ha permitido medir el cambio en el gradiente gravitacional como función de la altura: su curvatura.** (*physicsworld*, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.013001).

La experiencia cotidiana nos dice que los objetos grandes —huevos y humanos, por ejemplo— no parecen existir en una superposición de estados como es posible para objetos cuánticos, como los electrones. ¿Significa esto que la física cuántica, fundamentalmente, no se aplica a los objetos más allá de un cierto tamaño? **Un nuevo experimento que permite el movimiento de un átomo grande en una red óptica podría ayudar en la búsqueda de la escala en la que el mundo macroscópico se convierte en cuántico.** En un trabajo

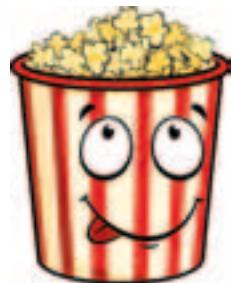


publicado en *Physical Review X*, físicos de la Universidad de Bonn demostraron que un átomo de cesio viaja de una manera verdaderamente no clásica, moviéndose como una superposición cuántica de estados y por lo tanto ocupando más de una ubicación distinta a la vez. Ya se habían hecho en el pasado observaciones de propiedades cuánticas en objetos incluso mayores que un átomo de cesio, pero la observación en este trabajo se basa en una prueba rigurosa, considerada como el estándar de oro para confirmar que existe una superposición. Como tal, este experimento constriñe la propiedades de las posibles teorías que pretendan sustituir la mecánica cuántica. La técnica también podría ser utilizada para buscar superposiciones incluso en escalas más macroscópicas. En el experimento un átomo grande (cesio) se mueve en uno de dos posibles campos ópticos —indicados en la figura en rojo y azul. Los campos tienen un potencial con forma de huevera. Se preparó el átomo en una superposición de dos estados atómicos, lo cual es equivalente a tener el **átomo simultáneamente sentado en la huevera roja y la huevera azul**, y se determinó la posición del átomo mediante la detección de su fluorescencia cuando las dos hueveras se deslizaron aparte una de la otra. (*Physics*, DOI: 10.1103/PhysRevX.5.011003).

El Gobierno ha cancelado por sorpresa la participación de España en un proyecto europeo de investigación en humanidades que repartirá 23 millones de euros y al que el país había decidido unirse. La convocatoria la gestiona Humanidades en el Espa-

cio de Investigación Europeo (HERA), una organización que agrupa a 24 países y cuyo objetivo es financiar proyectos internacionales en los que participen al menos cuatro de ellos. Tras una reunión con representantes del Ministerio de Economía y Competitividad, la organización informó de que, al contrario de lo planeado, ningún español podrá participar o coordinar un proyecto debido a “limitaciones imprevistas de la legislación nacional [española]”. La decisión ha dejado colgados a grupos españoles que ya estaban preseleccionados y a tan solo dos semanas de un congreso en Tallín (Estonia) al que debían asistir. (*El País*).

Desde hace tiempo se sabe porqué las **palomitas de maíz** se abren de golpe al calentarlas, pero **el origen del sonido que hacen al estallar era un misterio** sin resolver. Cuando las palomitas de maíz se calientan, la humedad en el interior se convierte en vapor de agua, produciendo un aumento de presión hasta que aparecen fracturas en la corteza y el maíz estalla, a menudo saltando por los aires en el proceso. Vídeos a cámara lenta revelan que el sonido “pop” ocurre fuera de sincronía con la rotura de la corteza y el salto del maíz por el aire, eliminando dos posibles explicaciones para el ruido. Eso deja una causa como principal sospechosa: **el sonido vendría de la liberación de vapor de agua al abrirse la semilla**, como han confirmado investigadores del CNRS francés en un artículo de la revista *Journal of the Royal Society Interface*. El cambio repentino de presión cuando se libera vapor de agua hace que cavidades dentro de la palomita de maíz vibren y produzcan sonido, **en un efecto parecido a descascarlar una botella de cava**. (*Science*, DOI: 10.1126/science.1247).



¿Gallina en corral ajeno?

Por Lourdes Vega

La Física es una ciencia en cambio permanente hacia una búsqueda de leyes con rangos de validez cada vez más amplios, y el físico es un científico inquieto, intuitivo, con gran grado de abstracción y ávido de conocimiento, de la búsqueda de respuestas y de demostrar su saber. Quizás por ese grado de abstracción y el tipo de problemas que nos interesan, a los físicos se nos identifica con personas que tendemos a "mirar al cielo", o alejados de la realidad, de los problemas normales de la gente de a pie. Sin embargo, esto no deja de ser una percepción, en algunos casos basada en hechos, y, en otras, en meras suposiciones o sensaciones, y que, ciertamente, no corresponde con la realidad. Para muestra, un botón, con la reciente concesión del Nobel de Física a los doctores Akasaki, Amano y Nakamura, creadores de la luz LED; este descubrimiento ha cambiado nuestras vidas, permitiendo un ahorro energético considerable y una mejor distribución geográfica de este recurso.

Soy física de formación y por convencimiento, y mi carrera profesional la he dedicado a profundizar en el conocimiento de los fenómenos físicos que rigen determinados sistemas y a su aplicación a posibles soluciones en distintos campos. Pasar de preguntarnos ¿qué ocurre? a preguntarnos ¿por qué ocurre así y qué implicaciones tiene?, dos preguntas naturales en un físico, puede ciertamente tener implicaciones reales en la vida de muchas personas. La Física me apasiona desde siempre, y su aplicación a resolver problemas tangibles también, ya que el valor aparentemente intangible de lo que empezamos a investigar se convierte en algo real para nosotros y para futuras generaciones: mejorar nuestra calidad de vida, el aire que respiramos, el agua que bebemos, la energía que consumimos o la manera de comunicarnos están íntimamente relacionados con la Física y su aplicación en todos estos campos.

Los físicos tendemos a opinar de casi todo, y a no coincidir en muchas cosas. Pues bien, la carrera de ciencias físicas suele ser una carrera vocacional y aquí coincidimos todos; cuando uno se decide a estudiar Física no piensa a priori en las posibles salidas profesionales, sino en que le gusta la Física, y las matemáticas, pues es el lenguaje de la Física. Sí sabe que se adentra en una ciencia que estudia sistemáticamente los fenómenos naturales, tratando de encontrar las leyes básicas

En esta sección, personas notables, no necesariamente físicos, son invitadas a hablar (a través de una entrevista) o a escribir acerca de aspectos de su profesión o de su actividad, o en relación con sus experiencias que pueden interesar a los físicos. Animamos al lector a debatir temas que aquí se presentan enviando sus comentarios para la sección "Pulsos e impulsos".

que los rigen, que contribuirá en el desarrollo de modelos y llevará a cabo experimentos para comprobar sus leyes. Y también sabe que estará rodeado de compañeros con inquietudes muy similares a las suyas, aunque no sepa qué hará al acabar los estudios.

Habitualmente se piensa en el físico como en alguien que desarrolla su carrera profesional en la docencia o en la investigación dentro del mundo académico, con escasas posibilidades de aplicar su conocimiento en otros campos, sobre todo si tiene un expediente académico brillante. En ese caso casi la única opción posible es hacer el doctorado y desarrollar una carrera investigadora en el mundo académico. Esta visión está muy unida a las posibles salidas profesionales que uno percibe cuando empieza estos estudios (sus profesores de secundaria, la propia universidad en la que está estudiando, o la mayoría de la gente que conoce de su entorno cercano que ha estudiado esta carrera). Pero la Física no es sólo una ciencia, es también una forma de ver y estar en el mundo, una manera de afrontar hechos y fenómenos concretos. Las posibles salidas profesionales, entre ellas la carrera investigadora y otras, son un camino abierto que cada uno recorre de una manera diferente, de acuerdo con sus posibilidades, preferencias y ofertas disponibles. A veces se trata de estar en el momento adecuado en el sitio adecuado, pero en la mayoría de los casos el futuro se lo labra uno mismo con su trabajo diario.

Habilidad matemática, conocimientos de informática, una mente inquisitiva, imaginación, intuición y la capacidad de trabajar de forma independiente son rasgos importantes que se desarrollan y ejercitan en los estudios de ciencias físicas y que capacitan al físico para afrontar distintos retos en el mundo profesional.

De acuerdo con un informe publicado por la ANECA en 2005, las salidas más comunes al acabar los estudios de físicas en España se reflejan en siete perfiles profesionales, distribuidos por sectores. Teniendo en cuenta las advertencias de la propia ANECA en cuanto a la parcialidad de los datos, pueden extraerse unas conclusiones generales, que también coinciden, cualitativamente, con las publicadas por el Colegio Oficial de Físicos en su página web: aproximadamente el 52 % de los egresados (datos hasta 5 años después de egresarse) se dedican a la docencia (universitaria o no), mientras que el 33 % están en el sector industrial (fundamentalmente informática y telecomunicaciones, y otros), el 4 % se incorpora a la administración pública, el 2 % se dedica a la banca y relacionados y el 9 % aproximadamente, a otros. Esta distribución varía ligeramente



con los años y es un perfil propio de España, ya que en Estados Unidos, por ejemplo, se invierte, siendo el 53 % de los egresados en Físicas los que trabajan en el sector privado y sólo el 23 % se decanta por la docencia (universitaria o no), dedicándose el resto a Laboratorios Nacionales (10 %), al Ejército y relacionados (8 %) y a otros sectores (5 %), según datos extraídos de la American Physical Society correspondientes a los años 2009 y 2010.

De hecho, en la mayor parte de las industrias y en gran número de empresas existen actividades que dependen del conocimiento científico, en las que, por lo tanto, un físico ayuda a su desarrollo. Así, el físico en la empresa puede desempeñar un trabajo técnico de desarrollo de un producto, control de calidad o gestión medioambiental, aplicación de nuevas tecnologías de la información, desarrollo de proyectos y gestión avanzada de laboratorios y ensayos. Así mismo, los físicos desarrollan tareas de marketing, por el conocimiento profundo de un producto y su comportamiento, y otras tareas de gestión, siendo considerable también el número de físicos que ejercen su carrera investigadora en el seno de la empresa, liderando o contribuyendo en el desarrollo de nuevos productos.

Así pues, aunque los profesionales de la docencia en Física muchas veces no sean conscientes de ello, están formando a un colectivo en el que algunos de sus miembros se decantarán por el mundo docente que ellos conocen, y otros, por un mundo empresarial desconocido para muchos de estos profesores. Sería conveniente, pues, aprender el lenguaje del mundo empresarial, saber cuáles son los valores que un físico puede aportar ahí y prepararlo para ello. Esto ayudará, en un mundo cambiante y con necesidades de adaptabilidad, a que los físicos encuentren en la sociedad el papel que les corresponde, y sepan adaptarse a ello de manera natural. También ayudará a que la sociedad reconozca los valores que éstos puedan aportarle.

Cabe decir, sin embargo, que hasta ahora, la conexión entre el mundo académico de los físicos y el mundo empresarial en el que los físicos y otros

científicos desarrollan su carrera profesional no es muy habitual, en términos generales. Quizás porque la propia elección de hacer investigación en el mundo académico nos lleva a buscar temas más fundamentales, o, quizás, por mero desconocimiento. Sin embargo, está demostrado que esa conexión entre los dos mundos, o esa percolación de la física al mundo empresarial (expresión que tomo prestada de Joaquín Marro), es algo de mutuo beneficio.

Quizás pensemos que la decisión más importante sobre nuestro futuro profesional la tomamos al acabar los estudios de físicas (con doctorado o no), y que a partir de ahí el camino no tiene retorno. Ciertamente es una decisión importante, y que marcará nuestro futuro, pero lógicamente no tiene por qué ser una decisión de no retorno. En determinados sectores o áreas siempre debería ser posible pasarse del mundo académico al empresarial y viceversa. De hecho, hay experiencias que demuestran que el cruce de fronteras entre estos dos mundos es el que multiplica la riqueza en cuanto a nuevas ideas, nuevos conceptos y nuevas maneras de trabajar para la consecución de objetivos. Ese cruce puede llevarse a cabo entre personas (que cambian su carrera profesional en un sentido u otro, bien adentrados ya en uno de ellos) o simplemente por la relación o manera de trabajar en proyectos comunes.

Para hablar de aquello que conozco, me centraré en mi experiencia personal, y compartiré con vosotros los éxitos y fracasos al intentar tender puentes, y cruzarlos, entre la investigación en el mundo académico y la investigación en el mundo de la empresa, y viceversa. Mi experiencia abarca los dos lados del puente y el cruce del mismo en los dos sentidos: he llevado a cabo investigación en la Universidad y en el CSIC, en proyectos competitivos de carácter fundamental; por otra parte, desde el mundo académico colaboré activamente con empresas en proyectos comunes, financiados por ellos. Desde la empresa he trabajado y estamos trabajando con investigadores del mundo académico, y estoy llevando a cabo investigación dentro de la empresa, como antes la llevé a cabo dentro del mundo académico. Ni que decir tiene que, como ocurre cuando uno cruza cualquier otro puente, no todo es fácil, ni el camino está claro, a veces el puente se tambalea, y muchas veces tienes ganas de volver atrás, a tu zona de confort, en lugar de cruzar hacia lo desconocido. De hecho, ponerse en esta situación genera inseguridad en muchas ocasiones, y es un reto constante, que uno tiene que estar dispuesto a asumir. Muchas veces me he sentido como "gallina en corral ajeno" (expresión castiza de mi tierra), escuchando frases como: "¿qué hace una física fundamental metida en temas de ingeniería y aplicaciones?" o bien: "en el mundo empresarial nos preocupamos de los resultados a muy corto plazo...", o, al recoger a los niños en el colegio, al decir lo que hacía, alguna madre comentaba con un suspiro "... ay, Dios, si parecías normal". Hoy se ve que en realidad tender puentes

entre esos mundos de investigación es un valor añadido y que vale la pena realizar el esfuerzo.

Con respecto a las primeras colaboraciones con empresas desde el mundo académico, debo reconocer que lo que más me costó fue, en primer lugar, comunicarme con ellos, es decir, a pesar de que al hablar de las líneas de investigación que llevaba en curso y en las publicaciones a menudo se reflejaba su posible aplicación industrial, concretar cómo y cuándo lo que nosotros hacíamos podía ser de utilidad en una situación o producto específico, y que a la empresa le interesara hasta el punto de financiarlo, no fue directo. Eran grandes empresas. Afortunadamente, en estas empresas existen investigadores con la misma formación que los investigadores académicos (primera lección aprendida), por lo que, una vez decidido en qué podíamos trabajar en común (en mi caso, cómo el modelado molecular podía ayudar a resolver un problema concreto), la discusión pasaba a ser puramente técnica y en el mismo lenguaje. Encontrar ese punto de contacto y mutuo interés suele ser una de las barreras más grandes a salvar para la colaboración en investigación de académicos y empresarios. Es preciso comunicarse mejor. Esto pasa por escuchar activamente, intentar entender el problema del otro y buscar una solución conjunta (segunda lección aprendida). Los académicos tendemos a hablar con demasiados tecnicismos, por lo que perdemos al interlocutor en cuanto no entiende uno de ellos y piensa que no nos van a preocupar sus problemas reales. Los empresarios tendemos a ser prácticos y pragmáticos, por lo que “perdemos” a los académicos en cuanto nos “abandonamos” a las necesidades del trimestre o mes en curso, cuando ellos están pensando a un año vista, al menos, o en una investigación de toda una vida.

Para que la colaboración fructifique y la relación sea un éxito es preciso que sea una relación de igual a igual, donde los dos deben ganar (tercera lección aprendida). Lógicamente, lo que busca o gana el profesor de esa relación no es ni debería ser lo mismo que lo que busca o gana la empresa, y esto también debe quedar claro a las dos partes. Es importante que el académico explique las ventajas de lo que propone, pero que también sea consciente de sus limitaciones, y que las exprese abiertamente, no sobreestimemos nuestras posibilidades. La empresa no pretende resolver todos los problemas con un proyecto académico, aportar algo de luz nueva sobre un problema existente o el desarrollo de un producto en marcha, puede ser más que suficiente para dar pasos de gigante dentro del desarrollo de dicho producto, o para parar una investigación en curso en favor de otra dirección con más posibilidades de éxito empresarial.

La investigación en una empresa (dependiendo del tamaño de la empresa y su orientación) se hace de manera similar a la I+D en centros públicos, es decir, se hace una investigación de calidad (que po-

dría medirse con los mismos baremos, pero habitualmente no se hace, dado que los incentivos son diferentes). Sin embargo, existe una gran diferencia que conviene tener en cuenta si se trabaja en proyectos comunes, y es la mayor urgencia en la consecución de resultados de la empresa frente a la I+D pública, lo que lleva asociada la posibilidad de parar el proyecto en un plazo de tiempo muy breve. Investigar así requiere definir a priori el objetivo concreto, los resultados esperados, con qué recursos se cuenta y con qué periodicidad se va a revisar la evolución. En definitiva, marcar objetivos a mucho más corto plazo de los que se suelen marcar en el mundo académico. La investigación es menos profunda, dado el plazo de tiempo de que hablamos. Esta es otra de las barreras encontradas para cruzar ese puente, se precisa cambiar el ritmo de manera drástica. Aunque al principio se presente como un reto insalvable (¡tener unos primeros resultados en tres meses!), al final es una gran oportunidad, ya que, aplicando esta manera de hacer a otros proyectos de investigación, en la medida de lo posible, los convierte en algo mucho más dinámico, requiere que el investigador y todo el equipo sean más críticos y más ágiles. Una bonita manera de hacer investigación en un proyecto a largo plazo, donde se pueden explorar muchos más caminos (cuarta lección aprendida).

Cabe señalar que esta relación profesional entre el académico y el empresario es una relación de conveniencia (quinta lección aprendida), la empresa no se compromete a largo plazo con un investigador o una línea de investigación, por lo que la relación acabará cuando acabe el proyecto, a no ser que surja otra oportunidad en ese campo, o en otro. Las empresas trabajan con objetivos concretos, a corto plazo, y son muy cambiantes. Se pueden llegar a realizar inversiones muy importantes en una línea de investigación durante un tiempo que de repente se cortan y se dirigen hacia otra, si la anterior no dio el fruto esperado en el tiempo previsto, o, simplemente, porque cambió la estrategia de la empresa. Esto a veces deja a los investigadores del mundo académico en una situación de indefensión si no están preparados. Conviene, pues, saber desde el principio que esto puede ocurrir y que ocurre. No tiene sentido intentar alargar esa relación si ya no hay objetivos comunes. Siempre quedará el buen trabajo hecho en común y la posible colaboración futura, si surge otra oportunidad.

Por último, al realizar o dirigir investigación desde el mundo de la empresa se aplican los mismos criterios y métodos científicos que en el mundo académico, pero sin olvidar que el objetivo final de conseguir un producto o mejorar un proceso es que sean rentables para la empresa. Así pues, para que un proceso o producto lleguen al mercado es necesario, en primer lugar, que sea técnicamente viable, para lo que se requiere un conocimiento profundo del mismo y sus fundamentos, investigación que puede llevar a cabo un físico desde el

mundo empresarial de manera similar a como la llevaría en el mundo académico. Para ello se requieren personas preparadas y con el perfil adecuado. Sin embargo, e igualmente importante, es que dicho proceso o producto sean económicamente viables, que presenten ventajas frente a lo que hoy mismo está en el mercado, que exista un mercado potencial para el mismo y, si es posible, que haya subproductos que se valoricen. Estos mismos criterios pueden ser aplicados de manera similar en el desarrollo de muchas investigaciones que se llevan a cabo en el mundo académico. No todo lo que se investiga tiene que llegar al mercado, sólo una pequeña parte de ello lo hará, sin embargo, tener una visión más completa de qué es lo que investigamos, y por qué, puede ayudarnos a orientar la investigación en un sentido o en otro.

A modo de resumen, la Física es una disciplina rica y multidisciplinar, el físico es un científico ver-

sátil y con unas habilidades valoradas no sólo en el mundo académico, sino también en el mundo empresarial. Hacer investigación desde una empresa es una opción cada vez más viable en nuestro país y en el mundo, que da salidas alternativas y atractivas a doctores con o sin experiencia, y que deben estar dispuestos a ello. De hecho, para avanzar en innovación se requiere gente preparada tanto en el sector académico como en el industrial, se requieren colaboraciones más activas entre los dos mundos, rompiendo mitos y trabajando en objetivos comunes; ni los físicos están siempre en las nubes, ni a los empresarios no les interesa la ciencia. A todos nos interesa aportar nuestro granito de arena a la sociedad.

Lourdes Vega es directora de I+D en Carburos Metálicos
y directora general de MATGAS

SUSCRÍBETE A LA REVISTA

40% DTO

NATIONAL GEOGRAPHIC

auroras boreales

12 REVISTAS
por solo 24,95€/año

+ GRATIS

EINSTEIN

FÍSICA CUÁNTICA

PACK ESPECIAL CIENCIA 2 EDICIONES ESPECIALES

BENEFICIOS SUSCRITOR

NATIONAL GEOGRAPHIC

Si, deseo suscribirme a National Geographic al precio especial de 24,95€ -40% descuento- por el periodo de un año (12 números) en lugar de 42€ y con renovación automática hasta nuevo aviso, en condiciones especiales. Además, recibiré totalmente GRATIS las 2 ediciones especiales*.

*Recibiré el regalo a lo largo de la suscripción, en la estafeta de correos correspondiente a la dirección indicada. En caso de agotarse este regalo, se sustituirá por otro de características similares o valor equivalente. Oferta válida para nuevas suscripciones y para península. La suscripción no incluye las promociones de quiosco. Para el extranjero solicitar tarifas suscripciones@rba.es

Nombre/Empresa * Apellido 1 * Apellido 2 *

Teléfono Fijo * Teléfono Móvil *

DNI / NIE * ver formato

¿Por qué necesitamos su DNI?

P. Nacimiento (dd/mm/aaaa) *

Sexo *

Hombre Mujer Empresa

Indique primero su código postal

C. Postal * Población *

Dirección * Tipo Vía *

Nºm. * Plz. Pta. Esc.

E-mail *

Confirmación E-mail *

He leído y acepto las condiciones generales de contratación, y me doy por informado de todo lo que en ellas se dispone y consiento el tratamiento de mis datos con las finalidades descritas.

Enviar >>

Recuerde que sus datos se enviarán a través de un servidor seguro que garantiza la confidencialidad e integridad de los datos que se transmiten.

Una entrevista informal con ENRIC BANDA

Director del Área de Ciencia y Medio Ambiente
de la Obra Social “la Caixa”



Entrevista realizada por Rocío Ranchal

Las oficinas centrales de la Fundación Bancaria “la Caixa”, en plena avenida Diagonal de Barcelona, albergan, como parte de su Obra Social, el Área de Ciencia y Medio Ambiente. Allí me encuentro con unas dependencias abiertas donde varias decenas de empleados están, codo con codo, en plena actividad. Las únicas dependencias cerradas son las salas de reunión y el despacho de su director, Enric Banda i Tarradellas (Gerona, 1948). Es aquí, en su despacho, discreto para lo que yo me esperaba, donde me recibe y disfruto de una charla animada en la que no duda en mostrarse sincero y directo.

El Prof. Banda ha sido Director del Instituto de Ciencias de la Tierra en Barcelona (1988), Secretario General del Plan Nacional de I+D (1994), Secretario de Estado de Universidades e Investigación (1995-1996) y Secretario General de la Fundación Europea de la Ciencia situada en Estrasburgo (1998-2003). Desde su campo científico, la geofísica centrada en el estudio de la estructura y evolución de la litosfera, pasó a ocupar puestos de liderazgo en política científica hace casi tres décadas. Nos interesa conocer por tanto su opinión sobre la situación actual de la investigación en España y sobre el papel que deben jugar las entidades públicas y privadas al respecto.

Rocío Ranchal (R. R.): Nos gustaría saber primero un poco más sobre la Obra Social “la Caixa” y, en concreto, sobre su área de Ciencia y Medio Ambiente.

Enric Banda (E. B.): La Obra Social “la Caixa” es conocida por su acción asistencial al conjunto de personas vulnerables, realizamos un esfuerzo mayor hacia la comunidad de inmigrantes, sectores con pobreza infantil, campañas de vacunación infantil en países en desarrollo, a las personas de

avanzada edad... Pero, esta Obra Social también reserva parte de su esfuerzo hacia el conocimiento; a mí me gusta decir para el futuro. Así, financiamos ciencia, su divulgación, el talento mediante las becas “la Caixa” y, como no, ayudamos a preservar el Medio Ambiente. Por ejemplo, tenemos diversos centros de ciencia y cultura como CosmoCaixa y CaixaForum, además de diferentes exposiciones itinerantes para la divulgación de la ciencia, y para aumentar, así, la cultura científica de este país. También realizamos algo, que personalmente me parece muy importante, que es la educación científica a través de talleres en escuelas para explicar la ciencia. Cualquiera que asista a alguno de estos talleres, constata que la idea de que es difícil motivar a los más jóvenes en el ámbito de las ciencias no es cierta.

R. R.: Muy relacionado con este punto, ha trascendido a principios de febrero que en la Obra Social “la Caixa” estáis realizando un estudio, en colaboración con la Fundación FECYT y la empresa Everis, sobre si las actividades de divulgación incrementan las vocaciones en carreras científicas y técnicas. En la noticia se menciona que el estudio está motivado por la observación en el descenso de estudiantes en estas carreras.

E. B.: El estudio lo hicimos por varias razones, entre ellas, la que comentas. Por otro lado, la empresa Everis se dio cuenta de que en Europa falta personal cualificado en STEM —Science, Technology, Engineering, Mathematics—,

Nos encontramos en una situación difícil debido a que los recortes presupuestarios de los últimos años han provocado problemas en el funcionamiento de la I+D española

y, sin embargo, es fundamental para el progreso, que se debe a la ciencia y a la tecnología. También hemos participado en este estudio ya que nos gusta dar cuenta de nuestras actividades y, además, queríamos cuantificar tanto el impacto de las actividades que realizamos, como cuáles son las que tienen más efecto a la hora de promover vocaciones científicas. Sin entrar en los detalles de este estudio, hay que destacar los resultados positivos del mismo, que indican que los talleres y las actividades de divulgación sirven para fomentar este tipo de vocaciones.

R. R.: Continuando con la Obra Social, ¿cuáles son las actividades que lleva a cabo más relacionadas con la ciencia?

El diagnóstico que hago de la situación no es bueno, pero no soy pesimista

que se debe, sobre todo, al rigor en la selección de quienes van a gozar de ellas. Primero se hace una preselección con evaluaciones cruzadas para, posteriormente, realizar una entrevista personal con la ayuda de reconocidos evaluadores. Debido a la gran calidad de los candidatos, los evaluadores se lamentan de no poder conceder beca a todos los preseleccionados. Por otro lado, tenemos las becas de doctorado, tanto para universidades españolas como para centros de investigación con la acreditación "Severo Ochoa". Esto último se realiza a través de un acuerdo en vigor hasta 2016 con el Ministerio de Economía y Competitividad. Concedemos bastantes becas y, aunque nos gustaría conceder más, también hay que tener en cuenta que no somos el gobierno.

R. R.: Me parece muy interesante ese último comentario, pero ya volveremos a él al comentar la situación económica española y la inversión pública y privada en I+D.

E. B.: Dentro del ámbito científico, invertimos en investigación biomédica, y también en ciencias sociales. El motivo de investigar en biomedicina se debe a que una fundación filantrópica busca incidir en campos en los que los beneficiarios directos sean las personas. Es verdad que esto es así con respecto a la ciencia en general pero los avances en biomedicina revierten en las personas de una manera más directa. En 2014 hemos invertido un total de 20 M€ en esta área. En ciencias sociales financiamos proyectos a través de un acuerdo con la Asociación Catalana de Universidades Públicas mediante una convocatoria abierta y pública para proyectos. Sin embargo, en biomedicina, elegimos desde la Obra Social los proyectos que nos interesa más financiar.

R. R.: Teniendo en cuenta toda esta financiación que hacen desde esta Fundación y conside-

rando el comentario anterior de que "no sois el gobierno", ¿cómo debería ser la relación entre financiación pública y privada para I+D?

E. B.: En la actualidad formo parte del Consejo de Gobierno y del Comité Ejecutivo del European Foundation Centre, situado en Bruselas, que reúne a unas 300 fundaciones europeas, y la opinión al respecto es unánime. Los objetivos de las fundaciones y de las organizaciones filantrópicas son diferentes de los de los gobiernos, aunque pueden ser complementarios. Las fundaciones investigamos dónde se encuentran las necesidades sociales, y elegimos aquellas que resultan más afines a nuestros mandatos fundacionales. Por ejemplo, la Obra Social "la Caixa" surgió hace más de 100 años con el objetivo fundamental de ayudar a las personas de avanzada edad y, por tanto, nuestras acciones van sobretodo encaminadas a ese objetivo. Es verdad que las fundaciones decimos que no somos el gobierno, aunque tenemos en cuenta sus actividades y en algunos casos podemos actuar de manera conjunta.

Ahora nos encontramos en una situación difícil debido a que los recortes presupuestarios de los últimos años han provocado problemas en el funcionamiento de la I+D española. Sobre todo, el daño se ha hecho en el talento. Habíamos atraído a España a buenos investigadores extranjeros que venían para establecerse, pero actualmente existe una tendencia a que el talento se vaya, y lo que no sabemos, y más daño produce, es el número de buenos investigadores que han dejado de venir por la situación económica en la que nos encontramos. Me preocupa también la disminución en la capacidad e infraestructura de muchos centros de investigación a causa de la reducción de presupuesto. El diagnóstico que hago de la situación no es bueno, pero no soy pesimista. Existe una resiliencia en la I+D española y podremos revivir.

R. R.: ¿Cuánto tiempo necesitaremos para superar esta situación?

E. B.: En el mundo de la I+D es muy difícil construir y muy fácil destruir. Ahora, se ha destruido bastante pero hay que considerar que también se ha afinado. Esto lo digo en el sentido de que, al haber pocos fondos, se ha tenido que afinar más en la concesión de financiación y nos hemos tenido que volver más eficientes. A pesar de lo que digo hay que tener presente a la persona investigadora que está en el laboratorio y a la que le faltan fondos. En mi opinión tardaremos en recuperarnos un tiempo equivalente al que se han estado aplicando recortes. Además de esto, insisto en que la situación de la I+D es mala, ya que se ha visto muy perjudicada, y tendría que darse una reacción extraordinaria también por parte del gobierno para recuperarla. No sirve con subir el presupuesto un 2 % por año, hay que reforzar el sistema con medidas imaginativas por parte de un gobierno atrevido. Soy partidario de una acción de choque.

R. R.: ¿Y cuál, si es que lo hay, sería el papel de la financiación privada?

E. B.: Hoy en día, el sector privado en España invierte más que el público en I+D, y esto se debe, desafortunadamente, a la reducción experimentada en el sector público. Las organizaciones filantrópicas y fundaciones tendrían un papel secundario pues nuestra aportación es pequeña a pesar del esfuerzo que hacemos y a pesar de que esperemos crecer en los próximos años. Es el gobierno el que tiene que realizar una acción de choque.

R. R.: Desde el gobierno se nos requiere el mejorar nuestras relaciones con el sector privado para mejorar la situación de la I+D.

E. B.: El gobierno tiene que dar estímulos para que esto suceda, y éstos tendrían que ser para las empresas. Los científicos hemos sido suficientemente estimulados sobre la necesidad de patentar, de crear spin-offs... El sector académico ya está haciendo suficiente. Sin embargo, faltan estímulos para el sector privado. La I+D tiene riesgo, y el proceso tiene que ser facilitado por el gobierno. Es más, el gobierno tiene que posibilitar esta relación ya que la situación económica sólo mejorará gracias a la ciencia y a la tecnología. Esto es algo conocido en foros internacionales y sólo hay que mirar lo que hacen otros gobiernos como Estados Unidos y China.

R. R.: La Comisaría Europea de investigación se ha referido explícitamente a España al pedir nuevos esfuerzos para aumentar la inversión en investigación. El Gobierno parece que no sigue estas recomendaciones, aunque parece que sigue otras muchas que le hacen desde la Comisión Europea. ¿Se debe a la falta de interés de nuestra sociedad por la I+D, a falta de interés por parte del Gobierno, o es consecuencia de ambas?

E. B.: Creo que es una cuestión de prioridades. Al igual que la Comisión Europea dice que no invertimos suficiente en investigación, también dice que España tiene que reducir su déficit. Por tanto, hay que reducir presupuesto de algún lado. La Unión Europea debería ayudar con fondos específicos a aquellos países que no invierten suficiente en I+D. También se podría hacer que la partida en I+D no contara como gasto. Los gobiernos entienden que el motor de la economía se encuentra en la ciencia y en la innovación, pero faltan los hechos y los estímulos. Habría que estimular la I+D por un lado, y por otro, la innovación.

R. R.: ¿No hay que mezclarlos?

E. B.: Yo creo que no. Es verdad que en el mundo más cercano a la tecnología, la innovación casi sigue a la ciencia pero hay muchos ámbitos en los que la innovación no tiene nada que ver con la ciencia.

R. R.: ¿Cómo nos ven desde Europa?

E. B.: Si nos miran en comparación con el momento de nuestra entrada en la Comunidad Eu-

ropea, ven que nuestro sistema investigador ha mejorado apreciablemente. Si nos miran sólo centrándose en estos tiempos de crisis, desde 2008, ven una situación bastante mala. Hay grupos muy potentes, con una gran resiliencia, que están aguantando bastante bien la crisis, compitiendo fantásticamente en convocatorias competitivas. Casi todos los países, salvo Alemania, han puesto freno a la I+D, pero no lo han hecho al nivel de lo que ha sucedido en España, Grecia o Italia. En España, ha habido individuos muy buenos a lo largo de la historia y han surgido grupos muy buenos también, pero no terminamos de conseguir que el país en su conjunto tenga un nivel de excelencia. Estamos en un nivel aceptable pero tenemos que seguir trabajando para mejorar

R. R.: ¿Nos falta liderazgo en Europa?

E. B.: Desde la Unión Europea nos ven como colegas, y están esperando a que esta crisis se acabe. Hay grupos españoles que están liderando proyectos en Europa. Aquí, me gustaría hablar del proyecto en RRI (Responsible, Research and Innovation) que lidera la Obra Social "la Caixa" con un presupuesto de 7 M€. Su objetivo es trabajar en la relación entre ciencia y sociedad, considerando que la ciencia tiene que hacerse para y con la sociedad. Si la sociedad no participa de los procesos científicos, habrá un divorcio y hay que tener en cuenta que la investigación pública se hace con los impuestos que pagan los ciudadanos. En esta RRI también se consideran aspectos éticos y de género que tanta relevancia tienen en nuestra sociedad y también la educación científica de la que hablábamos al inicio.

R. R.: Acerca de la separación entre sociedad y científicos, ¿no es este un problema que existe en España y que no acabamos de resolver?

E. B.: Hay organizaciones, universidades, centros y grupos de investigación que realizan actividades para mejorar este aspecto, pero no lo hacemos de manera ordenada.

R. R.: La Secretaría de Estado de I+D+i en una entrevista a esta Revista nos comentaba que una de las tareas de los investigadores era la divulgación.

E. B.: No sólo los científicos tienen que hacer labores de divulgación. En cualquier caso habría que estimular a científicos y científicas para que estas actividades tengan beneficios y que los aspectos de divulgación se consideren en sus currículos. Creo que a los científicos hay que pedirles que hagan su trabajo, y que éste sea ético, que se planteen aspectos de género, y que consigan darle un valor social al conjunto de la investigación e innovación. Por ejemplo, hay que eliminar las desviaciones de género que aparecen en la investigación e innova-

La situación económica sólo mejorará gracias a la ciencia y a la tecnología



ción para tratar de acercar las tareas de investigación a las jóvenes.

R. R.: ¿Qué quedó por hacer durante tu etapa de Secretario de Estado de Universidades e Investigación?

E. B.: Quedó mucho por hacer. Como Secretario General del Plan Nacional de I+D (un puesto que ya no existe) podías hacer cosas de verdad, ya que tenías presupuesto, y pudimos diseñar (durante 1994) un nuevo Plan Nacional en el que, por primera vez, se hablaba explícitamente de trabajar con empresas. En aquella época hubo una pequeña crisis económica, pero pudimos poner algunos elementos nuevos, como el ente que controla las infraestructuras tecnológicas

En España hay un nivel científico aceptable, pero hay que seguir mejorando

en España, y, sobre todo, continuar con la línea que ya se había iniciado. Desde la Secretaría de Estado pudimos iniciar el proceso de relación con el sector privado. La Ley de la Ciencia de 1986 fue

el pistoletazo de salida, y estábamos todavía en los inicios. No estoy insatisfecho aunque me hubiera gustado que hubiéramos tenido más presupuesto. Me gustó más mi trabajo en la Secretaría General del Plan Nacional ya que el puesto de Secretario de Estado es más político y más alejado de los que componen la base científica

R. R.: Nuestra revista tiene una sección denominada "Mi clásico favorito" en la que los autores nos dan su imagen subjetiva de una figura científica que en algún sentido ha marcado su carrera, ¿quién sería un "clásico favorito" para Enric Banda?

E. B.: No tengo un "mi clásico favorito" ya que me suelo quedar con los últimos autores que he leído y me han gustado. Me acabo de leer la versión inglesa del nuevo libro de Neil Turok titulado *El Universo está dentro de nosotros*, publicado recientemente en castellano, que me ha parecido realmente interesante. Es prácticamente una historia de la Física que recomiendo a cualquier físico.

¿Te gusta investigar?

$$E=mc^2$$

tenemos la solución
suministro de equipamiento
para investigación física
info@atlisistemas.com

ATI
SISTEMAS

* alimentación HV-LV * racks de alimentación * racks * electrónica de control y adquisición * espectroscopía
* detectores (silicio, HPGe, centríleadores, Cd/Zn/TiW,...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

Mi clásico favorito

Subramanyan Chandrasekhar por Eduardo Battaner

La elección de Chandrasekhar como “mi clásico favorito” se debe a que tuve una relación de amistad con él. Fue a raíz de su viaje a Granada invitado por la Universidad de esta ciudad. Hubo tiempo para el arte y hubo tiempo para la ciencia. Debo a Chandrasekhar mucho de mi formación, tanto con sus libros como con su viva palabra. Aún así, no he podido más que escarbar en la montaña de sabiduría de este admirable científico. En realidad, unos científicos conocen tal parte de la montaña; otros conocen tal otra. Pero nadie ha podido conocerla en su totalidad.



Introducción

El Salón de Grados de la Facultad de Ciencias de Granada se preparaba para un acontecimiento algo inusual. El premio Nobel Subramanyan Chandrasekhar iba a dar una conferencia con el título de *The intellectual achievement that the Principia is*. Aunque el orador y el tema podrían tener interés para algunos profesores y alumnos curiosos, nada hacía prever una afluencia masiva. Como si de una estrella de cine se tratara acudieron cientos de admiradores, convencidos de que las explicaciones del sabio habrían de ser inolvidables. El Salón de Grados, con un aforo de 100 personas, se quedaba pequeño. Se le dijo al Professor Chandrasekhar que había que acudir al Aula Magna, con una capacidad de unas 1.000 personas. Pero él, asombrado y molesto por aquella concurrencia desmesurada, se negó:

—Lo que voy a decir no puede ser entendido por tanta gente.

Empezó la conferencia. No sólo las butacas sino los pasillos, cualquier metro cuadrado del Salón de Grados estaban a rebosar. Aún así, muchos tuvieron que quedarse fuera, frustrados y molestos. Empezaron a protestar con creciente vocerío y hubo que interrumpir la conferencia en algunos momentos. Por fin llegó la paz y Chandrasekhar pudo desarrollar el tema con voz pausada y profunda. ¡Sublime!

Fue una pena que no todos pudieran escuchar aquella memorable conferencia. La lección de aquel día fue Newton y su *Principia*, pero también lo fue el

gran interés que desperta la ciencia en la gente.

Chandrasekhar fue en esta ocasión algo cortante al rechazar una sala más grande. Y ciertamente, aquel hombre podía ser inesperadamente cortante. Acudió una periodista e, ingenuamente, le empezó preguntando lo que lógicamente parecía que había que preguntarle: “¿Se alegró mucho cuando recibió el premio Nobel?” La respuesta fue seca: “This is on the records” (algo así como “eso ya está en los registros”). No contestó más. Y a la siguiente pregunta de la periodista, respondió también con el mismo lacónico desaire. La buena periodista se despidió con los ojos llorosos.

No sabía esa periodista, por otra parte excelente profesional, que Chandrasekhar fue el único Nobel a quien tal premio había disgustado. Pensaba que este premio sacaba al científico de su investigación, que a partir de entonces tendría que dedicarse a interminables actos sociales de etiqueta, que ni él ni su investigación podían ser objeto de veleidades “glamourosas” y que su sitio estaba en el silencio de su despacho, acompañado de papeles con interminables ecuaciones diferenciales y la misma pluma estilográfica de siempre. Le disgustó realmente que le dieran el premio Nobel. Era, en su personal apreciación, una invitación a la futilidad.

Le habían dado este codiciado premio por un trabajo que había hecho con 19 o 20 años y se lo dieron 53 años más tarde, en 1983. ¿Por qué tardaron tanto en reconocer su mérito? Él se alegraba de este

retraso. Si se lo hubieran dado pronto no podría haberse dedicado a la ciencia como lo hizo durante toda su vida.

Pero aunque podía ser cortante y desabrido con algunos, era exquisitamente amable con otros. Por ejemplo, otro periodista de IDEAL —bien merece que digamos su nombre, el señor Enrique Seijas— supo ganarse la confianza del sabio, quien sintiéndose a gusto con él, escuchó todas sus preguntas rebuscando en su memoria las respuestas precisas y sinceras, sin límite de tiempo. En el artículo que IDEAL hizo de Chandrasekhar se hizo un retrato escrito que bien vale para una introducción a la sección de “Mi clásico favorito”.

Tampoco fue muy amable con su antiguo doctorando, Guido Much. Precisamente en honor de éste se celebraba en Granada un congreso, y precisamente la Universidad de Granada había invitado a Chandrasekhar para que asistiera al homenaje que se ofrecía a su antiguo pupilo. Pero Chandrasekhar no apareció por el congreso y sólo se entendió con sus colegas de la Universidad.

Con Estrella y conmigo, en cambio, fue la amabilidad personificada, tanto él como su encantadora Lalitha. Visitaron La Alhambra y tantas otras joyas artísticas de esta ciudad. Tenía Chandrasekhar una sensibilidad penetrante por el arte y se detenía en la observación de cualquier minúsculo detalle mucho más tiempo que cualquier otro hombre.

También hablaba de ciencia. Puedo decir que aprendí más en una semana



con él que el resto de mi vida; y eso que mucho de lo que había aprendido antes había sido con sus libros.

¿Quién era aquel hindú que cautivó a media Granada con su modestia y defraudó a lo otra media con su arrogancia? ¿Por qué despertó tal interés en la sociedad granadina más propio de un cantante o un actor? ¿Quién era? ¿Qué había hecho? ¿Por qué su mirada podía infundir o bien respeto o bien confianza?

S. Chandrasekhar (Lahore, 1910- Chicago, 1995)

Subramanyan Chandrasekhar nació en Lahore. Esta ciudad al noroeste de la India, de mayoría musulmana, pertenece hoy a Pakistán. Pero ni él ni su familia eran de allí. Procedían de Madrás, al sur, de tradición tamil. Hoy esta ciudad ha cambiado su nombre por el de Chennai. Si nació tan lejos de su casa fue porque su padre, Ayyar, fue un alto funcionario del ferrocarril hindú, lo que le obligaba a numerosas mudanzas. Pero a Madrás volvió el niño Subramanyan cuando sólo tenía 8 años.

Nació el 19 de octubre de 1910 o, como él decía con humor, nació el 19101910. Fue educado en primer lugar por su padre Ayyar y por su madre Sitalakshmi, porque de niño, la educación de sus padres era mejor que la que podían ofrecer los colegios. Su padre le enseñaba matemáticas; su madre, tamil. Pero su educación, aunque radicalmente hindú, se vio beneficiada por el interés de los ingleses en introducir la cultura británica en la compleja trama de religiones, castas y sectas de la India. Téngase presente que la India fue una colonia británica hasta 1947. Aunque si los ingleses no lograron "britanizar" la cultura india, consiguieron arañarla superficialmente. En uno de esos arañazos se crió Chandrasekhar, quien fue estrictamente hindú toda su vida, pero hablaba inglés tan bien como su tamil nativo, leyó literatura inglesa y, especialmente, se inició en la ciencia inglesa.

Ya adolescente se formó en el *Presidency College* de Madrás, donde estudió física. Allí destacó por su destreza matemática y su capacidad para la física. Los profesores no tenían nada que enseñarle

porque él se enseñaba sólo y tuvieron una mentalidad abierta como para permitir que aquel chaval aprendiera por su cuenta. Tanto apreciaron su valía y su amor al trabajo que crearon una beca para que él se fuera a estudiar a Inglaterra y para que cuando volviera, ocupara una cátedra a su medida. Eso sí; si no volvía, tendría que devolver el dinero. Chandrasekhar se fue a doctorarse a Cambridge, efectivamente, y no volvió, pero quedó liberado de la devolución del dinero porque aquella prometida cátedra no llegó a crearse.

En todo caso, se aprecia también el interés de los hindúes cultos por la penetración en su país de una ideología occidental. Simultánea y paradógicamente, querían independizarse y dejar de ser una colonia británica. Eran los tiempos de Gandhi y Nehru, con sus métodos tan admirables de revolución pacífica.

Y el joven Chandra, con 20 años, se marchó a Cambridge. Salieron a despedirle toda su familia (tenía 9 hermanos) y muchos de sus profesores. Chandrasekhar partía ilusionado aunque también temeroso. En la India era tenido por un genio pero, ¿en Cambridge? Había allí nombres tan míticos como Rutherford, Dirac, Eddington, Milne, Hoyle, Fowler... Iba a la ciudad cuna de la ciencia, allí donde su admirado Newton había cambiado el rumbo de la historia sólo con el poder de su extrahumano pensamiento. ¿A dónde se atrevía a ir?

Dejaba a dos mujeres llorando su partida. Una era su madre, que entonces estaba enferma próxima a la muerte. A punto estuvo el joven Chandrasekhar de renunciar a su viaje, pero fue ella misma quien le animó: "él estaba hecho para el mundo, no para ella".

La otra era Lalitha, su vecina y su compañera de estudios en el *Presidency College*, también física como él. No habían establecido ningún compromiso formal ni les ataba ningún vínculo acordado. ¿Por qué no se iba Lalitha con Chandra? Su madre le había dicho que no se iría sin antes casarse. Y Chandra no quería casarse porque el matrimonio podría perjudicar su carrera científica. Chandra se lo había planteado bien: O Lalitha o la física. Y había elegido: la física.

El viaje a Cambridge

El viaje entre Bombay y Venecia en un vapor fue decisivo tanto para Chandrasekhar como para la humanidad. Duró 19 días de los cuales los primeros diez Chandra los pasó vomitando debido a la mar arbolada. Los otros nueve, con mar más tranquila, los aprovechó para realizar un trabajo por el que mucho después obtuvo el premio Nobel. Demostró que las estrellas enanas blancas no podían tener una masa mayor de lo que hoy se llama límite de Chandrasekhar de 1,4 masas solares, aproximadamente.

Si pretendiéramos decir en poquísimas palabras en qué consiste dicho límite, lo haríamos de una forma imprecisa y poco entendible a fuer de breve:

Una estrella enana blanca, habiendo cesado ya las reacciones de fusión, es una estrella prácticamente de electrones, al estar ionizada y formada por elementos bastante pesados que vierten una gran cantidad de electrones. Los electrones son fermiones y a tan altas densidades forman un sistema degenerado. La Estadística de Fermi- Dirac ha de contemplar el Principio de Exclusión de Pauli. Por tanto, no podemos meter más de un electrón en una celdilla cuántica. Pero el número de celdillas en una estrella enana blanca no es infinito. Abarán poblándose los niveles más energéticos. Los electrones se harían relativistas. Por tanto la propia velocidad finita de la luz hará que el número de celdillas sea finito. Por tanto el número de electrones que “caben” en una enana blanca es finito.

Y para hacer números hemos de abandonar la estadística de un sistema degenerado de electrones por la de un sistema degenerado relativista de electrones. La ecuación de estado es diferente. Esos números no son excesivamente complicados, pero aquí ni yo tengo espacio ni el lector tiempo. Véase la bibliografía.

Pero por muy genial que sea un científico debe tener unos estudios previos para que se le ocurran ideas geniales. Del cerebro nada sale si nada entra. Analicemos la situación de su entorno con respecto a la Física en Madrás. Comprenderemos así por qué Chandra eligió este tema para amenizar su viaje en barco.

La física en la India no estaba mal, al menos contaba con cuatro distinguidos físicos. El primero era Chandrasekhara Venkataraman, más conocido por su nombre abreviado, Raman, premio Nobel por la investigación sobre lo que hoy se llama "el espectro Raman". Era tío carnal de Chandra, hermano de su padre. Pudiera pensarse que teniendo un premio Nobel en la familia, el joven Chandra pudo beneficiarse de su enseñanza, su ejemplo y su experiencia. Pero no fue así. El tío Raman tenía un carácter egocéntrico y repetía constante y jactanciosamente su condición de laureado Nobel. Puede decirse incluso que no se llevaban nada bien. El segundo era Krishnan, hoy poco conocido, descubridor... también del espectro Raman. Raman y Krishnan hicieron el descubrimiento en colaboración, pero su mérito fue escamoteado por Raman.

Estaban también Saha, muy conocido hoy por la llamada ecuación de Saha, que determina el grado de ionización en el equilibrio termodinámico, y Bose, el iniciador de la estadística de Bose-Einstein y el que ha dado nombre a las partículas que se ajustan a esta estadística, los "bosones".

Pero más influyentes en Chandra fueron dos científicos visitantes: A. Sommerfeld y su discípulo W. Heisenberg. Con lo grande que es el mundo, con lo grande que es la India y con lo grande que era Madrás, el prestigioso Sommerfeld dio una conferencia en el *Presidency College*, precisamente. Chandra, osadamente, fue a verle al hotel donde el célebre

físico le recibió con cordialidad y le informó de la nueva estadística de Fermi-Dirac. Más decisiva aún fue para Chandra la visita de Heisenberg, pues fue su cicerone para mostrarle su ciudad durante algo más de una semana. Esta situación recuerda la relación de Chandra con el autor de estas líneas cuando le mostró Granada (salvando las incommensurables distancias). Heisenberg tenía mucho prestigio ya, aunque sólo tenía 28 años, por lo que la mutua juventud favoreció su entendimiento. Además, Chandra hablaba alemán, probablemente mejor que Heisenberg inglés. (¿Por qué había estudiado alemán un hindú en la India?).



Un astrofísico brillante
en su perenne traje
oscuro

¿Quién le iba a decir al joven Chandra que tanto Dirac como Fermi acabarían siendo sus mejores amigos, uno en Cambridge, otro en Chicago?

Supo entonces que Ralph H. Fowler en Cambridge había aplicado la estadística de Fermi-Dirac al sistema densísimo de electrones en una enana blanca (no confundir este Ralph Howard Fowler con William Fowler, con quien compartió Chandra el premio Nobel). Para mejor entenderlo, empezó estudiando de cabo a rabo el libro de Eddington *The internal constitution of stars*.

Con estos antecedentes y con una preparación excelente en matemáticas, gracias a los escritos del matemático Srinivassa Ramanujan, ídolo de Chandra, muerto ya por entonces, Chandra estaba en disposición de abordar el problema de las enanas blancas relativistas. Era imposible que una enana blanca tuviera una masa superior a lo que hoy se llama el *límite de Chandrasekhar*.

Figura cortesía de los
archivos del periódico
IDEAL



La controversia Eddington-Chandrasekhar

Cambridge fue frustrante para Chandra. Sus admirados sabios parecían escucharle con cortesía pero realmente no le hacían mucho caso. Trabajaba mucho y obtenía muchos resultados, pero a sus insignes colegas no les importaba demasiado. Milne estaba en Oxford. Fowler, que era teóricamente su

director de tesis, era cada vez más inabordable; parecía huir de Chandra y de su torrente de ocurrencias. A Rutherford no le gustaba la astronomía. En un coloquio clamó: "¡Aquí no se habla del Universo!". A Dirac tampoco le importaba la astronomía, aunque más adelante contribuyó a la cosmología.

Aquí conviene hablar de cómo entonces se entendían las relaciones entre física, astronomía y astrofísica. Los astrónomos americanos eran básicamente observadores, más preocupados por disponer de telescopios más y más grandes, e ignoraban deliberadamente la física. A los físicos no les importaba el Universo, incluyendo en esta actitud nombres tan prestigiosos como Rutherford, Bohr, Dirac, etc. Quizá estas afirmaciones son exageradas pero son representativas de la disociación entre astronomía y física existente allá por el año 1930. Había una nueva vía que pretendía unir ambas ramas de conocimiento: la astrofísica. Pero contaba con pocos representantes, entre los cuales hay que distinguir a Eddington, a Milne e, incluso, habría pronto que incluir al mismo Chandrasekhar. Pero hay que decir que, aunque el curso de sus pensamientos le llevó a éste por los derroteros de la astrofísica, él no quería hacer astrofísica; él quería hacer física. Paradojas biográficas: ¡el mejor astrofísico de la historia no quería ser astrofísico!

Llegó el día de la lectura de su tesis que fue digna de un esperpento. ¿Cuál habría de ser el tema de su tesis? Por entonces ya el infatigable Chandra había trabajado en tantas cosas que podía tener muchos posibles temas. No se lo podía preguntar a Fowler pues ya era completamente inabordable. El tribunal estaría formado por dos profesores. El propio Fowler y Eddington. Eligió un tema que había de ser del agrado de Eddington: *polítopos* estelares. Se presentó Chandra bien vestido y bien preparado para su defensa. Pero en la sala no había nadie; ni compañeros, ni público curioso, ni tribunal... nadie. Al cabo de más de media hora se presentó Fowler. Como no estaba Eddington, propuso que se fueran los dos a leer la tesis a las habitaciones particulares de Eddington en el Trinity College. Eddington les recibió en bata y en zapatillas. Allí tuvo lugar la tesis. El hogareño tribunal no estaba muy interesado. En medio del

turmo de preguntas, dijo Fowler que se tenía que ir; y se fue. Entonces dijo Eddington que la sesión había terminado. Chandra se fue, sin ni siquiera saber si había sido aprobado.

Pero a Eddington no le gustaba el trabajo sobre las enanas blancas relativistas. Por una parte, le molestaba y ofendía a su intuición. Antes del cálculo de Chandra se pensaba que todas las estrellas morían como enanas blancas. Si Chandra estaba en lo cierto, ¿cómo demonios morían las estrellas masivas? Pero sobre todo, negaba el principio mismo. No había tal ecuación de estado de un sistema degenerado relativista. Él decía que Chandra no había entendido ni el Principio de Incertidumbre de Heisenberg ni el Principio de Exclusión de Pauli y todo aquello era un cálculo teórico sin sentido ni pies ni cabeza.

No solamente lo pensaba, sino que así lo expuso públicamente, despreciando y ridiculizando el cálculo de Chandra. La controversia se prolongó mucho tiempo, hasta la muerte de Eddington, durante la Segunda Guerra Mundial. Por parte de Eddington, no fue ni correcta científicamente ni correcta caballerosamente. Tuvo episodios que rondaron lo grotesco. Chandra sufrió mucho. Eddington, ídolo suyo que tanto le había enseñado, ahora le negaba la verdad.

Es posible que Chandra, en algún momento de debilidad, temiera que Eddington tuviera razón. Por ello y por zanjar la controversia, si Eddington creía que Chandra no había entendido la nueva física, ¿por qué no preguntar a los físicos? Chandra pidió ayuda a Bohr, a Dirac, a Fermi... Todos dijeron lo mismo: Chandra tenía razón. El cálculo era correcto. Pero nadie quería ponerlo por escrito ni mediar personalmente en el conflicto.

El problema era que Eddington tenía "demasiado" prestigio entre los astrónomos. Lo que él decía era dogma y nadie se preguntaba si su palabra y su verdad pudieran ser cosas distintas. Además de ser desmoralizador para un joven verse despreciado de aquella forma por el mismísimo Eddington y, por tanto, por todos los demás, no podría publicar su trabajo sobre el límite hoy llamado de Chandrasekhar. La estrategia que siguió fue así: publicó un libro, *An introduction to the study of stellar structure*, que incluía su límite. Un libro estaría a salvo de la censura de los artículos. Cambió radicalmente de tema y no se enfangó en una discusión eterna que le hubiera quitado tiempo y paz. Y poco a poco... Eddington y él se hicieron buenos amigos. "Eddington era así —pensaba Chandra— estaba acostumbrado a tener razón, pero era un gran científico y... una buena persona". Al final de su vida Chandra publicó *Eddington: The Most distinguished Astrophysicist of His Time*.

Cómo mueren las estrellas

El límite de Chandrasekhar establecía que no podía haber enanas blancas mayores que 1,4 masas solares. Pero había estrellas con más de 1,4 masas

solares. ¿Cuál era su muerte? Chandra no respondía a esta pregunta, en parte, porque ya se dedicaba a otros temas y, en parte, porque todavía era prematuro, hacían falta más observaciones que se habrían de realizar en el futuro. Pero pensó que las estrellas más masivas, al final de su vida, podían desprenderse de parte de su masa (mediante inestabilidades que él estudió) para alcanzar una masa inferior a su límite. Las estrellas desprovistas así de su envoltura podían ser las estrellas Wolf-Rayet y el material expulsado podía identificarse con las "nebulosas planetarias".

Pero quizás la estrella, si era aún más masiva, no podía desprenderse de tanta masa sobrante. Chandra era poco amigo de proponer hipótesis cualitativas sin demostrarlas analíticamente. Pero aquí hizo una excepción y dejó libre su imaginación. Destaco aquí un párrafo suyo, poco conocido, en un congreso en París en 1939 porque, aunque especulativo, marcó las directrices de la subsiguiente investigación sobre evolución estelar.

Para estrellas de mayor masa existen otras posibilidades. Durante la fase de contracción, estas estrellas pudieran desarrollar núcleos degenerados. Si estos núcleos degenerados alcanzan una densidad suficientemente alta (como es posible para estas estrellas) los protones y electrones se combinarían para formar neutrones. Esto causaría una brusca disminución de presión resultando el colapso de la estrella en un núcleo de neutrones y dando lugar a una enorme liberación de energía gravitacional. Este podría ser el origen del fenómeno de supernova.

Así trazaba en pocas palabras la teoría de la evolución estelar. Unía nebulosas planetarias, estrellas de neutrones y supernovas en un esquema revelador. Para apreciar su mérito, digamos que los "púlsares", identificados hoy como las estrellas de neutrones, se descubrieron en 1967 por la becaria J. Bell y su director A. Hewish, 27 años después.

Como los neutrones también son fermiones, las estrellas de neutrones también tienen su masa límite, lo que fue establecido por Oppenheimer y Volkov, aunque Chandra y su amigo John von Neumann ya habían encontrado las ecuaciones de las estrellas de neutrones, escritas en un artículo que no llegó a publicarse.

Lalitha

Cuando se le acabó la beca, adquirió la condición de fellow del Trinity College y, finalmente, tenía que acabar su estancia en Cambridge. Por consejo de Eddington se fue a Estados Unidos, concretamente al Observatorio de Yerkes, junto al lago de Geneva en el poblado de Williams Bay. El observatorio de Yerkes pertenecía a la Universidad de Chicago, aunque distaba unos 200 kilómetros del campus. El director del Observatorio, Otto

Struve, tenía la intención de compaginar el poder teórico de Chandra, con el de observación de astrónomos de la categoría de Strömgren, Kuiper y otros.

Pero antes de incorporarse a Yerkes, Chandra viajó a la India. Avisó a Lalitha quien, inmediatamente, se trasladó desde Calcuta a Madrás. Lalitha estaba trabajando entonces en el Instituto del tío Raman, en Calcuta. Tenía que ver a su impenetrable amor.

La costumbre en la India era que las mujeres se casaran con menos de 16 años. ¿Qué hacía soltera Lalitha a los 26 años? ¿No se sentía presionada por la aplastante tradición hindú? Pues no; Lalitha se había criado en una ambiente de liberación de la tradición, realmente despiadada con las mujeres, especialmente con las viudas. ¿Cómo se había logrado desembarazar de ella? Si Chandra tenía un tío famoso, Lalitha tenía una tía famosa: la hermana Subbalakshmi. Esta mujer había sido casada con 11 años y a esa misma edad quedó viuda. Ser viuda y virgen era lo peor que le podía pasar a una niña hindú. Nunca más podría casarse y debía vivir austera y pobemente. Pero Subbalakshmi se rebeló, creó una residencia para viudas donde también vivió Lalitha inicialmente, con su madre viuda y sus abuelos.

La India entera se dividía entre quienes odiaban rabiosamente a la hermana Subbalakshmi y quienes la admiraban valientemente. Así pues Lalitha se había criado en un ambiente de feminismo intrépido y caritativo y estaba liberada y al margen de las imposiciones fanáticas religiosas.

Más presión tenía Chandra para que se casase, pues era el primogénito de sus hermanos. Aunque su familia también era liberal, si no se casaba Chandra, sus hermanas habrían de tener grandes dificultades para casarse. Aunque él no quería someterse a estas arcaicas costumbres y quería dedicarse a la ciencia por encima de lo que fuese, al fin se casó con Lalitha, a quien siempre había amado y la que le había esperado enamorada sin tener compromiso alguno para hacerlo. Y fueron ciertamente un matrimonio ejemplar y sin fisura alguna. Lalitha renunció a su carrera pues pensó que su mejor contribución a la física podía consistir en cuidar a un físico tan singular. No tuvieron hijos.

Primero fueron a Cambridge una breve temporada antes de irse a Williams Bay. Allí tenían que conseguir el visado para inmigrar a Estados Unidos. Pero surgieron problemas burocráticos. Los hindúes no podían inmigrar salvo un pequeño cupo que ya estaba saturado. Pero la burocracia encuentra caminos sinuosos para resolver los





Chandra con el autor en La Alhambra.

Chandra recibiendo el premio Nobel. problemas que ella misma crea. Los hindúes no podían inmigrar salvo si eran misioneros. Y así pudo viajar Chandra a Estados Unidos: ¡Como misionero!

Pero entonces surgieron problemas para Lalitha. Para acompañar a su marido tenía que probar que estaban casados, pero como se habían casado por el rito hindú, no tenían comprobante alguno. De nuevo la burocracia supo sortear sus propias zancadillas. Es muy notorio el hecho de que fuera el mismo Eddington quien avivó la imaginación de los funcionarios americanos de inmigración.

Tuvieron que sufrir numerosos desprecios racistas. Según Chandra los habían sufrido por parte de los ingleses colonos en la India y los sufrieron después en América, pero no en Cambridge, curiosamente. Su misma integración en la Universidad de Chicago estuvo dificultada hasta extremos hoy increíbles por el color oscuro de su piel.

Mucho después, abandonaron el Observatorio de Yerkes para vivir en Chicago definitivamente. Con aquel cambio, también mudaron los intereses científicos de Chandra: de astronomía desde el punto de vista físico, a física con implicaciones astronómicas. Entre sus amistades en Chicago hay que destacar a Fermi. Fermi le animó a que se dedicase a la física pura, intención que, en realidad, siempre había él mantenido. Pero, a su vez, Fermi se contagió de las ideas de Chandra y llevó a cabo importantes descubrimientos puramente astrofísicos.

Desde el punto de vista biográfico, la estancia tanto en Williams Bay como en Chicago, transcurrió pacífica y ordenadamente, con pocas anécdotas que contar. En cambio, sus grandes contribuciones científicas llevan la afiliación de la Universidad de Chicago. Su aventura fue interior.

El carácter de Chandra

Su vestimenta era siempre la misma: un traje gris oscuro, camisa blanca y corbata negra. Nadie le vio nunca con una indumentaria distinta, salvo cuan-

do se puso el frac para recibir el premio Nobel. Era absolutamente abstemio y absolutamente vegetariano, no por cuestiones religiosas, ya que se consideraba ateo, sino por seguir la tradición tamil a rajatabla. Lalitha también era abstemia y vegetariana, vestía shari y tocaba un instrumento hindú con el que se acompañaba para emocionar a Chandra con canciones de su tierra. Ambos fueron siempre hindúes con ciertas maneras inglesas y nunca se adaptaron a la forma de vida americana. Nunca levantó la voz, ni para enfadarse ni para celebrar sus éxitos.

Chandra fue un trabajador infatigable con unos horarios imposibles de sobrellevar de no poseer una tenacidad, una disciplina y un control de su tiempo casi inhumanos. Especialmente cuando tuvo que compaginar su investigación con la dirección de la revista *The Astrophysical Journal*. Él leía todos los artículos y aunque impuso la norma de que todos debían pasar por un referee, era él y sólo él quien decidía si un artículo se publicaba o no. Esto fue especialmente extenuante cuando creó *The Astrophysical Journal Letters*, donde él era el referee de absolutamente todos los artículos. La Astronomía americana estuvo en sus manos durante más de 40 años. Finalmente, Lalitha le dijo que ella quería más tiempo para ella y él, conmovido, abandonó la dirección de esta revista. Naturalmente, esta forma tan autocrática de su gestión le creó muchos enemigos.

En cambio, la relación con los empleados de la editorial de la Universidad de Chicago fue siempre humana y cordial. Contaba él la siguiente anécdota: Marteen Schmidt encontró un cuásar con un desplazamiento al rojo de $z=0,2$, lo que probaba que los cuásares eran objetos extragalácticos. Entonces era un descubrimiento sensacional y quiso enviarlo a *Astrophysical Journal letters* para su pronta publicación. Chandra, consciente de tan trascendental contribución, quiso sacarlo en el inminente próximo número, para lo cual, los empleados tenían que trabajar en domingo. Se negaron en principio pero, al ver la tristeza de Chandra, cambiaron su actitud, aceptando, eso sí, con la condición socarrona de que tenía que explicarles por qué aquel artículo era tan importante. Así fue, Chandra se lo explicó; de tal modo que los empleados de la editorial fueron los primeros en el mundo en saber que los cuásares eran objetos extragalácticos.

Cuando abandonó la dirección de la revista, los empleados le hicieron una pequeña fiesta de despedida. Una empleada fue la encargada de dirigirle unas breves palabras: "Cuando compongo los artículos, sin comprender su contenido, veo que muchas veces se habla del 'límite de Chandrasekhar', pero yo no creo que el Profesor Chandrasekhar tenga ningún límite".

Su forma de plantear la investigación fue completamente extraña. Elegía un tema, lo desarrollaba en numerosos artículos, lo compendiaba en

un libro, lo llevaba a un estado de perfección, lo abandonaba, se desentendía de él, elegía otro tema y así sucesivamente, con casi una periodicidad regular de unos 8-10 años. Los temas elegidos en tan singular sucesión fueron:

- Evolución estelar
- Dinámica galáctica
- Transporte radiativo
- Estabilidad hidrodinámica y magnetohidrodinámica
- Figuras elipsoidales en equilibrio
- Agujeros negros
- El Principio de Newton

En todos estos temas partía de la nada, de casi nada, o de ideas inconexas. Aún hoy, alguno de sus libros está en plena vigencia. Debido a esta sucesión de temas diversos, no llegó a crear escuela propiamente dicha, o más bien creó muchas escuelas menores. Tuvo una intensa actividad formativa de doctorado, siendo 51 las tesis que dirigió.

Sus estudiantes de doctorado, tras la lectura de la tesis, dejaban de llamarle "Profesor Chandrasekhar" y adquirían el privilegio de llamarle "Chandra". Así le llamaban sus colegas y amigos, incluso Lalitha. Fue un magnífico docente, según testimonio de muchos de sus estudiantes. Empleaba tres pizarras que llenaba de fórmulas inacabables sin ayuda de guión y con una pronunciación precisa, quizás algo monótona.

En una ocasión un alumno le dijo que se había equivocado en un signo. Chandra continuó sin hacerle caso. "Profesor: ¿no piensa contestar a este alumno?" Y él, sin volver la cara fija en la pizarra: "No fue una pregunta sino una afirmación... Más bien, una afirmación equivocada". Y continuó.

Para él, la docencia y la investigación eran la misma cosa. Explicaba lo que investigaba. Y como lo que lo que investigaba era impredecible, nadie podía saber de antemano cuál sería el contenido del próximo curso.

En la Segunda Guerra Mundial colaboró con la armada americana, como hicieron muchos otros científicos, tales como Hubble, Hoyle, Schwarzschild, Oppenheimer, Bethe, Teller y, especialmente, su amigo John von Neuman. Alternó su trabajo en la Universidad de Chicago con su participación en el Aberdeen Proving Grounds, contribuyendo con diversas tareas científico-militares en beneficio de "su país", aunque la adquisición de la na-

cionalidad estadounidense fue posterior. En cambio, no quiso participar en el Proyecto Manhattan.

Entonces los científicos no tenían ningún pudor en manifestar abiertamente sus ideas religiosas. Chandra se consideraba ateo. Paradógicamente, era sumamente respetuoso y cumplidor con la religión hindú. Y es que esta religión es tan abierta a la interpretación de sus fieles, que ¡es incluso compatible con el ateísmo! Así lo concebía Chandra. Probablemente, esta concepción de la vida le ayudó a mantener una actitud serena ante la muerte, cuando empezó a tener ataques al corazón que acabarían llevándole a esparcir sus cenizas por diversos rincones de la Universidad de Chicago.

Curiosamente, este científico admirado y aclamado, el mejor astrónomo que no quería ser astrónomo, el astrónomo que vivió junto al telescopio que había sido el mayor del mundo (pero que jamás usó), el astrónomo sin telescopio, el astrónomo sin ordenador, al final de su vida, pensaba que... ¡no la había aprovechado bien!



Bibliografía recomendada

K. C. Wali es el mejor biógrafo de Chandrasekhar:

- [1] KAMESHWAR C. WALI, *Chandra. A biography of S. Chandrasekhar* (University of Chicago Press, 1991).
- [2] KAMESHWAR C. WALI (ed.), *S. Chandrasekhar. The Man Behind the Legend* (Imperial College Press, 1997).

El autor tiene algunos libros que pueden acercar al lector a su vida y su obra:

- [3] EDUARDO BATTANER, *Chandrasekhar* (RBA, Grandes ideas de la ciencia. 2005). Este libro está actualmente en proceso de producción. Según el propósito de esta colección, se trata de una biografía donde se destacan más los logros científicos.
- [4] EDUARDO BATTANER, *Astrophysical Fluid Dynamics* (Cambridge Univ. Press., 1996).
- [5] EDUARDO BATTANER, *Introducción a la astrofísica* (Alianza Editorial, 1999).

La Física según nuestros autores



Los jesuitas y la ciencia. Una tradición en la Iglesia

Agustín Udías Vallina

Ediciones Mensajero, 2014

376 páginas

El profesor Agustín Udías, autor de este libro, es catedrático de geofísica de la Universidad Complutense e investigador con prestigio internacional. Durante ocho años fue editor de la mejor revista europea de geofísica, el *Journal of Seismology*, de gran impacto por todo el mundo de la ciencia. Es además miembro de la Academia Europea y autor, entre otros escritos, del libro *Principles of seismology* (Cambridge, 1999). Este libro que nos ocupa se ha traducido recientemente al inglés por la editorial Springer.

La presencia de jesuitas en diversos campos científicos es algo que siempre ha llamado la atención. Ya en tiempos de su fundador, San Ignacio de Loyola (1491-1556), los colegios jesuitas empezaron a dedicar una fuerte atención a las matemáticas y la astronomía. Era un tiempo propicio pues estaba naciendo la Primera Revolución Científica que anunciable un mundo nuevo y muy distinto, bajo el impulso de Copérnico, Tycho Brahe, Galileo, Kepler y Newton entre otros. En esa situación, los jesuitas, preocupados por desarrollar misiones en varios países, llevaron la astronomía y las matemáticas a China y la India, dibujaron mapas de territorios desconocidos, estudiando además su fauna y su flora. Su trabajo entre los siglos XVI y XVIII, hasta la supresión de la orden en 1773 es bien conocido. Menos lo son sus contribuciones en los siglos XIX y XX en geofísica, astrofísica y meteorología.

En la actualidad, los jesuitas regentan 133 universidades y más de 300 colegios de segunda enseñanza distribuidos por todo el mundo. A lo largo del libro aparecen 361 jesuitas científicos entre matemáticos, físicos, astrónomos, geofísicos, geólogos, meteorólogos, químicos, biólogos, naturalistas y exploradores. Cabe mencionar que en el famoso *Dictionary of Scientific Biography* de Gillespie se incluyen 29 científicos jesuitas¹.

El autor nos dice que, más que explicar este fenómeno sobre el que se ha escrito mucho, aunque poco en español en comparación con otros países, lo que él quiere es dar una versión lo más completa posible de su historia. El libro comienza con la notable figura del alemán Christopher Clavius (1537-1612) que fue el iniciador de esa tradición desde su puesto como profesor de matemáticas entre 1567 y 1995 en el Colegio Romano, donde creó una escuela matemática que tuvo mucha influencia. Su obra científica fue muy importante, con 23 libros en su haber sobre aritmética, geometría y álgebra, varios comentarios a las obras de geometría de Euclides y de astronomía de John Hollywood (un inglés que adoptó el nombre latino de Johannes Sacrobosco) y otros varios sobre la reforma del calendario. Un año antes de su muerte se publicaron sus obras completas en cinco volúmenes con el título de *Opera Mathematica*.

Es significativo que Clavius animase a los jesuitas a tener una buena relación con Galileo, como muestra que éste lo visitase durante su primer viaje a Roma en 1587 y que, desde entonces, mantuvieran los dos un intercambio epistolar sobre problemas matemáticos. Curiosamente, aunque Clavius permaneció siempre fiel al geocentrismo, valoraba a Copérnico, al que llegó a calificar en su *Opera Mathematica* como "egre-gio restaurador de la astronomía de nuestro siglo a quien la posterioridad celebrará y admirará siempre como un segundo Tolomeo". El libro sobre astronomía más importante de Clavius son sus comentarios al *Tratado de la esfera*

de Sacrobosco (*In sphaeram Joannis de Sacrobosco commentarius*), del que se publicaron 18 ediciones, cifra sorprendente en aquella época. Estos comentarios son mucho más detallados y profundos que en el texto original de Sacrobosco. En esa obra presenta la astronomía geocéntrica de Tolomeo y sigue defendiendo la realidad física de las esferas celestes girando en torno a la Tierra. De hecho Clavius no abandonó nunca la doctrina entonces tradicional de la inmovilidad de la Tierra.

Mas la publicación en 1610 del *Sidereus Nuncius* de Galileo, con sus descubrimientos gracias al telescopio, satélites de Júpiter, fases de Venus, montañas en la Luna etc., planteó un serio problema para los defensores del geocentrismo. Clavius fue escéptico al principio pero, a finales de 1610, él mismo y otros matemáticos del Colegio Romano habían podido confirmar la existencia de los satélites de Júpiter y estudiado las fases de Venus. En la última edición de su vida de su *Opera Mathematica*, Clavius reexamina sus ideas sobre los descubrimientos de Galileo con el telescopio, diciendo por ejemplo²:

"Este instrumento [el telescopio] muestra muchas más estrellas en el cielo que las que se pueden ver sin él, especialmente alrededor de las Pléyades..." Las fases de Venus le hicieron interesarse por cómo reciben y emiten los planetas la luz del Sol que llega a la Tierra. Ello lo llevó a decir:

"Ya que las cosas son así, los astrónomos deben considerar cómo se pueden arreglar las órbitas para poder salvar esos fenómenos."

Mientras Clavius escribía estas frases y estudiaba el *Sidereus Nuncius* tenía 74 años, edad muy avanzada en aquella época. Su salud empeoraba y murió a principios de 1612. "Aunque, como dije más arriba, Clavius fue siempre fiel a Tolomeo, es inevitable la tentación de preguntarse qué habría pasado si el hubiera sido más joven en aquellos momentos, con la fuerza necesaria para explicar los nuevos fenómenos. ¿Habría

1 Ch. C. Gillespie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography* (Ch. Scribner and Sons, Nueva York, 1970-80, 16 vol.).

2 James M. Lattis, *Between Copernicus and Galileo. Christopher Clavius and the Collapse of the Ptolemaic Astronomy* (University of Chicago Press, 1994).

llegado a aceptar que es la Tierra la que gira alrededor del Sol y no al revés? imposible saberlo pero quizás la Sociedad Occidental se hubiera librado de tantos enfrentamientos absurdos. Es inevitable la tentación de preguntarse qué hubiera pasado si él hubiera sido más joven en aquellos momentos y hubiese podido explicar los nuevos fenómenos. Parece probable que habría aceptado que es la Tierra la que gira alrededor del Sol y no al revés. Quizás la sociedad occidental se hubiera librado de tantos enfrentamientos absurdos.

Vayamos ahora a otros aspectos de la relación de los jesuitas con la ciencia, que fue muy variada. La más curiosa y sorprendente es su trabajo en Asia, muy especialmente en el Imperio Chino. Este capítulo se inicia con el jesuita italiano Matteo Ricci (1552-1610) quien con 26 años solicita a sus superiores que le enviaran a sus misiones en Oriente, embarcándose así en Lisboa camino de la India. En 1582 empezó a estudiar el chino, que llegó a dominar gracias a su prodigiosa memoria. Más tarde escribió un catecismo en chino, titulado *La verdadera doctrina del señor del cielo*, adoptando la frase "señor del cielo" como sinónimo de Dios. En 1595 adopta el traje azul de los intelectuales chinos, toma el nombre de Li Madou y se presenta como un letrado de Occidente que desea conocer la sabiduría china. Poco después escribe un *Tratado sobre la amistad* (*Jiaoyou lun*) que se inspiraba en obras de autores clásicos griegos y latinos y que alcanzó un gran

éxito, mostrando que las ideas de Confucio y el cristianismo no se oponen sino que son notablemente similares en puntos importantes. También tradujo al chino los *Elementos de Geometría* de Euclides, desconocidos allí hasta ese momento, y la obra de Clavius *Epitome Arithmetica Practicae*. Mateo Ricci es considerado todavía hoy como uno de los occidentales mejor conocidos en China.

Los astrónomos chinos no habían llegado a dominar con exactitud los movimientos de los cuerpos celestes, lo que afectaba a su calendario. Ello era muy importante para aquella sociedad por la enorme influencia que tenía la obra de Confucio (c. 551-479 a. C.). Según este maestro, el ideal de vida es la armonía entre los hombres y con la naturaleza. Por eso consideraban necesario conocer bien los ritmos de esta última, en especial el movimiento de los astros, pues desde los aspectos de la vida de cada familia hasta las fiestas civiles y religiosas, debían ajustarse a las situaciones de los cuerpos celestes. En eso coincidían con el Occidente aunque la importancia dada a la armonía era mucho mayor en China.

A pesar de ello, las tablas astronómicas y el calendario chino eran muy defectuosos. Estaba claro que necesitaban una reforma. Ricci fue invitado a participar en una comisión que iba a modificar el calendario. En 1610 los astrónomos chinos cometieron un notable error en la predicción de un eclipse de Sol que, por el contrario, fue

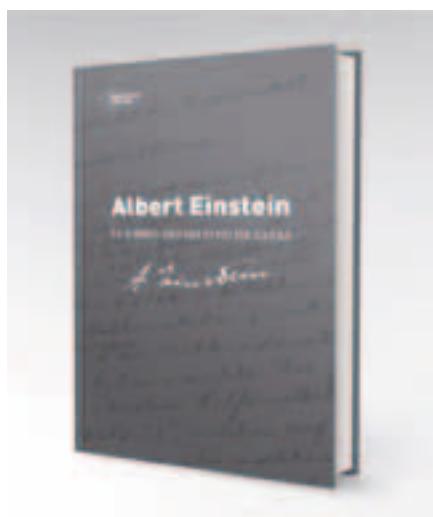
correctamente predicho por Sabatino de Ursis (1575-1620), un astrónomo jesuita. Impresionado por esta proeza, el Ministerio de Ritos decidió encargar a los jesuitas la reforma del calendario. Por todo ello, a los gobernantes chinos les gustó la ciencia y la técnica europea, tanto que nombraron a un jesuita alemán, Johann Schall (1592-1666), Director del Observatorio Imperial y también *Mandarín de Quinta Clase*. Más tarde, fue ascendido a *Mandarín de Primera Clase*, un honor muy grande, reservado a ministros y príncipes, recibiendo el hermoso título de *Maestro Investigador de los Misterios del Cielo*.

Tras la aventura china, los jesuitas siguieron desarrollando su tradición. Se ocuparon mucho de las tierras de América, elaborando mapas, dedicándose a la Meteorología, estudiando los ciclones tropicales e investigando los terremotos y el magnetismo terrestre. Debemos subrayar también la importante labor que desarrollaron en la construcción de nuevos observatorios.

En resumen este es un libro interesante, ameno y de fácil lectura. Es muy recomendable para aquellos que se interesan en la ciencia en general, no sólo en sus resultados sino también en los procesos sociales que la hacen progresar. Otro aspecto notable de este libro es lo que nos puede enseñar sobre las relaciones entre Oriente y Occidente.

Antonio Fernández-Rañada
Catedrático Emérito de la Universidad Complutense de Madrid

Reseñas de libros de interés



Albert Einstein. El libro definitivo de citas

Compilación y edición a cargo de Alice Calaprice.
Con prólogo de Freeman Dyson
Traducción de Francisco García Lorenzana
Plataforma Editorial, 2014
492 páginas

The Collected Papers of Albert Einstein.

El *Einstein Papers Project* (cuya sede en Pasadena se muestra en la primera fotografía) inició su andadura en 1986, bajo los auspicios de Princeton University Press y de la Universidad Hebrea de Jerusalén. Su objetivo consistía en seleccionar, preservar y difundir los escritos y documentos que se conservan de y sobre Albert Einstein (1879-1955), así como los que vayan apareciendo durante el desarrollo del proyecto. Ante el abundantísimo material existente, un comité editorial de especialistas se encarga de seleccionar el que se considere relevante para su publicación.

Así nació la serie *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE), cuyo primer volumen apareció en 1987. Acaba de publicarse el número 14 (abril, 1923-junio, 1925) que, entre otros tópicos, trata la formulación de la estadística de Bo-

se-Einstein y la exitosa gira que Einstein realizó por Sudamérica en mayo y junio de 1925. La serie completa CPAE contendrá unos 15.000 documentos, científicos y de diversa naturaleza, agrupados en cerca de 30 volúmenes. Cada uno de éstos, como hasta ahora, irá acompañado de un suplemento con la traducción inglesa de los documentos originales.

Una buenísima noticia, tanto para especialistas como para interesados esporádicos: desde el 4 de diciembre de 2014, es posible el acceso gratuito a la serie CPAE —incluidos los suplementos con la traducción inglesa— a través de la versión digitalizada en <http://einsteinpapers.princeton.edu>.

Einstein y Neinstein. Es un hecho innegable que la autoridad de Einstein en física se ha trasladado, de forma un tanto sorprendente, a campos tan diversos como, por ejemplo, la filosofía, la historia, la política, la religión, el militarismo y distintas facetas de la condición humana. Oí contar a un cínico que, con cierta frecuencia, recurría en sus discusiones a un “como dijo Einstein...”; aunque la cita no fuera fiel, eran muy pocos los que a partir de entonces osaban contradecirle.

A veces se emplea el término “Neinstein” para referirse a las múltiples citas y opiniones que se atribuyen falsamente a Einstein. Algunas de éstas son simplemente inventadas y luego difundidas. Otras fueron empleadas por Einstein, pero no eran originales. Finalmente hay citas textuales tan sacadas de contexto que, en el fondo, pierden su sentido original, como ha ocurrido frecuentemente con opiniones suyas, por ejemplo, sobre la religión. Y aunque han aparecido varias notas y estudios parciales para deshacer algunos de estos entuertos, hacía tiempo que se echaba en falta una obra amplia —y, sobre todo, documentada— que ayudara a separar Einstein de Neinstein.

Alice Calaprice trabaja desde 1978 en el Einstein Archive, localizado en el Institute for Advanced Study, en Princeton, trasladándose poco después a los despachos de la Princeton University Press para supervisar la edición de los primeros volúmenes de los CPAE y de su correspondiente traducción. Calaprice se ha encontrado así, durante más de treinta años, en una inmejorable posición para escribir sobre dis-

tintas facetas de Einstein. En particular, es autora de una saga de publicaciones dedicadas a exponer citas y opiniones documentadas del personaje: *The quotable Einstein* (1996), *The expanded quotable Einstein* (2000), *The new quotable Einstein* (2005) y *The ultimate quotable Einstein* (2011). La presente reseña se refiere a la traducción española de este último libro.



Contenido de la recopilación. Como los volúmenes anteriores, contiene un prólogo de Freeman Dyson, quien, a pesar de coincidir durante dos años con Einstein en el Institute for Advanced Study, nunca trató personalmente con él. El prólogo resulta un tanto insulto, pues Dyson se limita a poco más que a insistir en que su decidido apoyo a la publicación de Calaprice le hace sentir una cierta traición hacia su antigua amiga Helen Dukas —secretaria, archivera y albacea de Einstein—, que no habría visto con buenos ojos la exhibición pública de ciertos documentos íntimos.

Para mantener el libro dentro de unas dimensiones razonables, se han eliminado algunos elementos de versiones anteriores. Es el caso de los extractos del dossier del FBI sobre Einstein. Un lamentable recorte, dado el interés y la escasa divulgación del tema. Desde su llegada a Estados Unidos en 1933, hasta su muerte en 1955, Einstein estuvo permanentemente vigilado por el FBI, que es poseedor de un informe de unas 1.800 páginas sobre el personaje. Esta documentación fue puesta a disposición de los historiadores en el año 2000. Al respecto, puede consultarse el libro de Fred Jerome *El expediente Einstein*, Planeta, 2002.

Las citas aparecen agrupadas en estos apartados: Einstein sobre sí mismo; sobre y a su familia; sobre la vejez; sobre América y los americanos; sobre y a los niños; sobre la muerte; sobre la educación, los estudiantes y la libertad académica; sobre y a amigos, científicos concretos y otras personas; sobre los alemanes y Alemania; sobre la humanidad; sobre los judíos, Israel, el judaísmo y el sionismo; sobre la vida; sobre la música; sobre el pacifismo, el desarme

y el gobierno mundial; sobre la paz, la guerra, la bomba y los militares; sobre la política, el patriotismo y el gobierno; sobre la raza y los prejuicios; sobre la religión, Dios y la filosofía; sobre la ciencia y los científicos, las matemáticas y la tecnología.

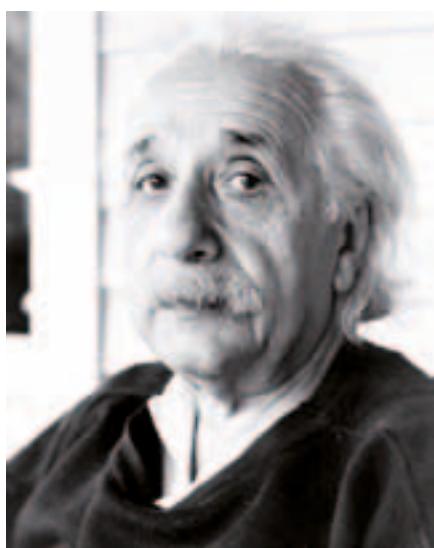
Calaprice ha incluido un popurrí final que ilustra sobre opiniones del personaje en torno a temas tan variopintos como el aborto, la homosexualidad, la astrología, el psicoanálisis, los platillos volantes o el vegetarianismo; por citar tan sólo algunos ejemplos.

Un pequeño muestrario. Veamos algunos ejemplos que muestran el estilo de la recopilación, huyendo de citas sobre física, que han sido más difundidas. En concreto, he escogido opiniones sobre cuatro de sus temas manidos: la religión, la mujer, el pacifismo y el conocimiento científico.

Einstein se refería con frecuencia a su “sentimiento religioso cósmico”, que puede quedar plasmado con claridad en la siguiente afirmación:

Creo en el Dios de Spinoza, que se revela en la armonía del mundo regido por sus leyes, y no en un Dios que se ocupa personalmente del destino y las acciones de la humanidad.
(Pág. 327).

Una muestra de su misoginia, por decirlo suavemente, aparece en el humillante memorándum que, en julio de 1914, Einstein escribió a su todavía esposa Mileva, planteándole las condiciones que él estimaba imprescindibles para seguir viviendo bajo el mismo techo, en Berlín. Aunque parece que ella, en principio, estuvo dispuesta a aceptarlas, pronto se desdijo y abandonó para



siempre la capital alemana, en compañía de los dos hijos del matrimonio. Estas son una parte de las exigencias:

A) Te ocuparás de que (1) mi ropa y mi colada se mantengan en orden; (2) me sirvan regularmente tres comidas en mi habitación. [...] (B) Te abstendrás de cualquier relación personal conmigo a menos que sea completamente necesaria por razones sociales. [...] (C) Obedecerás los siguientes puntos en tus relaciones conmigo: (1) no esperarás que muestre ninguna amabilidad contigo, ni me ofrecerás ninguna sugerencia; (2) dejarás de hablarme en cuanto te lo pida; (3) abandonarás mi dormitorio o estudio en cuanto te lo pida. (D) No intentarás menospreciarme de palabra o acto delante de nuestros hijos. (Págs. 66-67).

Einstein defendió largamente la libertad y la abolición del servicio militar obligatorio, al que consideraba un instrumento poderoso en contra de la paz. Su antimilitarismo activo, como ha sido denominado a veces, se manifestaba así cuando Hitler llegó al poder:

Siento una gran admiración por Gandhi, pero creo que existen dos debilidades en su programa. La no resistencia es la manera más inteligente de enfrentarse a las dificultades, pero sólo se puede practicar en condiciones ideales. [...] Hoy en día [agosto de 1935] no se puede aplicar contra el Partido Nazi. Además,

Gandhi comete un error al intentar abolir la máquina en la civilización moderna. Está aquí y hay que tratar con ella. (Pág. 142).

En su autobiografía científica, Einstein se refiere a la negación —a principios del siglo xx— de la realidad de los átomos por parte de algunos físicos ilustres del momento (Mach y Ostwald, especialmente):

Incluso los estudiosos de espíritu más audaz e instinto perspicaz pueden verse obstaculizados en la interpretación de los hechos por prejuicios filosóficos. El prejuicio [...] consiste en la fe en que los hechos por ellos mismos pueden y deben proporcionar conocimiento científico sin una construcción conceptual independiente. (Págs. 390-391. Se ha traducido *free*, de la edición original, por independiente. Pienso que no es la mejor elección, dentro del contexto al que se refiere la cita).

Y como último ejemplo, uno para ilustrar el tono irónico que preside muchas de sus citas:

Como los matemáticos han invadido la teoría de la relatividad, ahora tampoco la entiendo yo. (Pág. 399).

Sobre la edición española. En general, está bastante cuidada y bien traducida. Dado el amplio público al que va dirigida, no cabe ser demasiado exigente con el uso, a veces, de un lenguaje que, aunque correcto en lo literal, resulta ajeno al de los físicos. Tan sólo unos ejemplos del penúltimo apartado, que es el único dedicado explícitamente a las citas sobre la ciencia. En la página 354 aparecen los “sistemas de coordenadas” y, poco más abajo, los sistemas de coordenadas “en descanso”. En la 363 se hace referencia al “enrojecimiento de las líneas espectrales” y en la página 392 a los “sistemas [de referencia] inertes”. Los editores de obras que contienen aspectos científicos harían bien en contar no sólo con buenos traductores, sino con adecuados revisores de la jerga correspondiente.

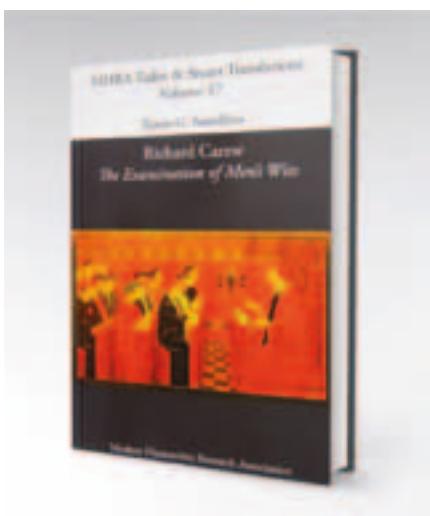
La edición española no recoge los versos y poemas escritos por Einstein

que figuran en la edición inglesa, de entre los cerca de 500 que se encuentran en los archivos; todos ellos originalmente en alemán. Tampoco ha incorporado la sección que Calaprice dedica en su original a citas atribuidas al personaje. Así, el lector español se queda sin saber, por ejemplo, de dónde surge la atribución a Einstein de frases como “la educación es lo que queda cuando uno olvida todo lo que aprendió en el colegio” o “dos cosas son infinitas: el universo y la estupidez humana; y no estoy seguro sobre lo del universo”. Para comprobar el origen de tal atribución, así como la posible paternidad de la cita, es necesario recurrir a la versión original inglesa.

En la bibliografía final se ha incluido la traducción al español de una obra cuando existe, lo que es de agradecer. La sorpresa viene cuando un lector curioso, que desea contrastar la fidelidad de alguna cita, comprueba que los responsables de la edición no se hayan “molestando” en convertir las citas de la versión original en las correspondientes de la versión española, con lo que una hipotética comprobación se convierte en una tarea excesivamente laboriosa. ¡Lástima!

En cualquier caso, no hay duda de que esta recopilación ayuda a poner de manifiesto algo que, por obvio que resulte, siempre hay que tener presente: incluso los mayores genios de todos los tiempos han sido, ante todo, seres humanos. (Se muestra adjunto un retrato en sus últimos días por John D. Schiff). Alice Calaprice, ya jubilada, afirmaba en su despedida: “Esta cuarta edición es la última que voy a compilar. [...] Quizá dentro de unos años un editor nuevo y emprendedor tendrá la energía necesaria para continuar con el proyecto, porque parece que existe un pozo sin fondo de citas preciosas que se pueden extraer del enorme archivo de Einstein”. Seguro —añado yo— que muy pronto aparecerá ese nuevo editor, dado el interés del proyecto, la cantidad de material inédito disponible y, por supuesto, el previsible éxito editorial de su publicación.

Luis Navarro Veguillas
Profesor Emérito.
Universitat de Barcelona



Richard Carew. The examination of men's wits

Rocío G. Sumillera

Modern Humanities Research Association, 2014

375 páginas

El examen de ingenios para las conciencias de Huarte de San Juan, médico y filósofo, se imprimió en Baeza en 1575. Su autor nacido en San Juan de Pie de Puerto, Navarra, en 1529 vivió en Baeza, Linares, Alcalá de Henares, Tarancón, Sigüenza y se especula con su estancia en Granada y en la Universidad de Huesca. Murió en 1588 y su obra fue precursora de estudios de pedagogía y psicología. El libro de Huarte de San Juan constituyó un superventas en la época y tuvo una expansión, hoy diríamos un nivel de impacto, de gran alcance nacional e internacional en los siglos XVI y XVII. De ahí que se hicieran diversas reimpresiones y traducciones: 15 veces en español, 25 en francés, 6 en italiano, 5 en inglés, 3 en latín, y una en neerlandés. Su influencia se extendió desde el área de la medicina, al de la literatura y la filosofía. De todo esto nos informa cumplida y detalladamente el libro recién publicado de Rocío G. Sumillera.

El libro es un estudio sobre el autor y su obra, y una edición cuidada de la traducción que de la obra del médico español hizo Richard Carew en 1594 a partir de una traducción italiana. El libro se divide en dos partes: una, la introducción, que es un detenidísimo y concienzudo ensayo sobre el autor y la traducción inglesa; aquí encontrará el lector todo tipo de datos sobre Huarte y su obra, sus ediciones y traducciones y las influencias sobre otros autores; la otra parte es la edición de la traducción de Richard Carew, una edición crítica y

anotada. Para Huarte de San Juan el ingenio es la totalidad de la capacidad del individuo unido a los cuatro elementos (tierra, aire, agua y fuego) y conectado orgánicamente con el cerebro. Huarte se fundamenta en los humores y su relación con el alma racional, siempre dentro de parámetros médicos. Esto lo explica muy bien Rocío G. Sumillera al exponer la formación médica de Huarte de San Juan en Alcalá, donde había una fuerte tradición en la traducción de las obras de Galeno y las del *Corpus Hippocraticum*, lo que indica los niveles de experiencia clínica y de aventura intelectual en esa Universidad en la que Huarte estudió medicina y se licenció y doctoró, tras haberse licenciado en letras en Baeza. La obra de Huarte de San Juan no escapó a la Inquisición y tuvo un devenir de mutilaciones y expurgaciones editoriales notable, llegando a estar en el índice de libros prohibidos, aunque se autorizó su edición bajo la condición de que se corrigiese lo censurado.

La importancia de la traducción de Carew se basa en que, sin ser una versión del original, se trata de una traducción de la versión italiana de Camillo Camilli. Carew era un estudioso de la época, con interés en la antigüedad y un sentido de innovación de la lengua inglesa, partidario de los préstamos de otras lenguas, frente a los filólogos en ciernes de la época, defensores a ultranza de lo anglo-sajón como base etimológica. Para Carew, la idea del 'ingenio' fue fundamental y lo incluyó en su inventario conceptual sobre el hombre, traduciendo *ingegni* de Camilli por *wit*. Hay otro hecho lingüístico de interés y es el paralelismo entre Carew y su decisión por utilizar la lengua vernácula, el inglés, en su desarrollo e innovación, y la preferencia de Huarte por el castellano frente al latín, lengua de la ciencia hasta mediado el siglo XVIII. La razón de Huarte parece ser que fue afortunada pues los cirujanos eran unos profesionales que no tenían grandes conocimientos de latín y eso supuso una extensión considerable del público lector.

La edición de Rocío G. Sumillera es una aventura filológica valiente y compleja al poner al día el texto inglés de Richard Carew y anotarlo detalladamente. El lector se enterará de la relación de los humores con el conocimiento (págs. 83-120), o sobre los argumentos del poder instrumental de la memoria (págs. 132-146). Resulta curioso ver la forma en que

Carew recoge las ideas de Huarte y habla de "commonwealth of imagination", para comentar lo relativo a la memoria, al juicio y al entendimiento (pág. 191 y ss.) y a los niveles de comunicación intersubjetiva. Huarte insiste en que el entendimiento, la imaginación y la memoria llevan a conformar a un buen lector, un buen argumentador y un buen gobernante aunque advierte que la naturaleza hace pocos de éstos, y no puede considerarse una regla general. Al hablar del antiguo Egipto y sus bondades, menciona al pueblo de Israel y su huida: como curiosidad, casi mítica comenta Huarte su consideración del maná del desierto, su origen material como "rocío", *dewey*, o "miel etérea", *air honey*, blanco como la semilla del cilantro (págs. 219-212).

El elogio de la calvicie en el hombre como signo de inteligencia resulta gracioso, en especial al comentar tal carencia en relación con Julio César (pág. 237-238). Las ideas de Huarte se extienden hasta la reproducción humana y dedica unas cuantas consideraciones a la misma y a peculiares observaciones filosóficas, de Platón y Aristóteles, fisiológicas siguiendo a Galeno y a Hipócrates, y entrando en detalles sobre la formación del semen y la condición del útero, y teológicas sobre la condición de la mujer según la Iglesia (págs. 275-286). Concluye Carew su traducción de Huarte con las consideraciones sobre el talento del hombre y de la mujer, y el del niño en su educación, y la necesidad de una buena alimentación. También hace la distinción entre los hijos legítimos y los bastardos, en función de su sentido del valor y la prudencia (págs. 302 y ss.). Concluye el tratado con una reflexión sobre el cerebro, su sustancia, la influencia del conocimiento y la elección del bien frente al mal.

En resumen, se trata de un libro de interés por revelar, en primer lugar, el estudio de Huarte de San Juan sobre el talento, el comportamiento individual y social y la aplicación de ideas de la filosofía y de la fisiología, de la tradición clásica y de la teología. Y en segundo lugar por poner al día una traducción inglesa del siglo XVI que pertenece a una tradición de expansión de las ideas de un científico español y supone la representación del conocimiento especializado en la Europa de la época.

J. L. Martínez-Dueñas
Universidad de Granada

Noticias

Bodas de plata de la Olimpiada Española de Física

Estamos cumpliendo los 25 años desde que la RSEF inició la Olimpiada Española de Física y desde que venimos participando en la Olimpiada Internacional de Física y en la Olimpiada Iberoamericana de Física. Es, pues, una buena ocasión para hacer una pausa y revisar lo que ello significa para los alumnos participantes y su entorno social y académico, para los profesores intervenientes y para la propia RSEF.

El principio que inspira las olimpiadas científicas es que los estudiantes, los que estudian y los que valen, merecen toda nuestra atención y dedicación desinteresadas. Y no sólo como destinatarios finalistas de las olimpiadas, sino también como intermediarios de otros objetivos no menos importantes. La actividad que se despliega con ocasión de las olimpiadas repercute en el ambiente de los centros, en la apreciación del trabajo intelectual, en la promoción de las disciplinas científicas, en particular de la Física, y en la valoración de los resultados conseguidos. No hay que olvidar la repercusión social, empezando por sus familias, consistente en la difusión y apreciación de la ciencia y en el fomento de la titulación en Física como una excelente opción para el acceso inminente a los estudios universitarios. Por algo es ésta una actividad educativa que la RSEF destaca con mención especial en sus estatutos.

Los estudiantes que participan en la Olimpiada de Física son, lógicamente, los más destacados en sus centros en esta disciplina, siendo realmente extraordinarios todos los seleccionados para la fase nacional, dándose casos de auténticas excepciones geniales a este nivel. Bien vale la pena el esfuerzo que se hace por parte de todos para estimular esta participación, en la que ellos adquieren una experiencia de magníficos recuerdos para toda su vida. Por un lado, en sus relaciones con compañeros de todas las regiones de España (sí, de todas) y de todos los distritos universitarios. Por otro lado, en las pruebas a las que son sometidos, por el reto que supone su dificultad, y porque son pruebas especialmente preparadas para que resulten ilustrativas y atractivas.

Las dos palabras *Olimpiadas y Física*, encierran un significado más profundo



Acto de clausura de la XVII Olimpiada Iberoamericana de Física, presidido por el Rector de la Universidad de Granada.

que el de unas simples pruebas. Porque, a diferencia de los exámenes a los que están acostumbrados, ahora se enfrentan a sus propios compañeros, que por unas horas son sus competidores. Las olimpiadas de la antigüedad clásica tuvieron la virtud de extraer, de la competencia feroz por la subsistencia y por el poder, una versión sublimada, compitiendo exclusivamente por el honor de ser los mejores. Nuestros chicos olímpicos tienen en las olimpiadas un ensayo suavizado de lo que será una vida de competencia más dura, pero con la responsabilidad, el respeto y la racionalidad propios de su edad y formación. Esta participación, no obstante su brevedad, puede tener una influencia beneficiosa en su trayectoria estudiantil y profesional y en todos los aspectos de su vida. En cuanto a la segunda palabra, estamos convencidos de que la Física es vista por los participantes de otra manera más natural, más como la física es, por estar apartada de las rigideces de sus clases, donde la colectividad diaria, los programas obligados, la preparación expresa para el acceso a la universidad, les presenta la física como un producto elaborado, empaquetado y rutinario. Aquí se les ofrece una muestra mucho más atractiva y valiosa, racional y rigurosa de esta disciplina. En resumen, las Olimpiadas de Física son algo más, mucho más, que unas pruebas selectivas.

Es una pena que venimos lamentando los que nos dedicamos a este menester, el

hecho de que a las Fases Locales se presenten bastantes menos alumnos de los que podrían hacerlo y, cabe decir, debieran hacerlo. Las proporciones son variadas según centros, sectores sociales, regiones... Viene al caso el papel que desempeñan, y el que podrían desempeñar, las Comunidades Autónomas, sus Consejerías de Educación y sus Delegaciones Provinciales. Por una razón de origen histórico, las Fases Locales han venido organizándose por los coordinadores o armonizadores para las pruebas de acceso a la universidad. También por ello, vienen siendo los rectores de las universidades los que, principalmente, ofrecen la organización de las Fases Nacionales. La Comisión de Olimpiadas de la RSEF hace todo lo que está en su mano para difundir las convocatorias oportunas y estimular la participación. Y es en este punto en el que se echa de menos, en general, una mayor intervención de apoyo por parte de la autoridad educativa de los estudios de bachillerato. Bien es verdad que, afortunadamente, se producen actuaciones oficiales alentadoras en cuanto a la organización previa y al reconocimiento posterior de los estudiantes galardonados. Pero la situación general es que la RSEF actúa impulsada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, por un lado, y apoyada en las Universidades por el otro. Sería muy de desear un estímulo directo dirigido a los centros, profesores y alumnos de física, por parte de las autoridades educativas

de su propio nivel, donde la capacidad de influencia y promoción sería máxima con un coste mínimo.

¿Qué decir de los profesores que nos dedicamos a esta actividad? Con ella no hacemos docencia ni investigación ni actividad empresarial, tampoco es del todo divulgación de la física. ¿Qué nos anima a una docena de profesores, de universidad, de bachillerato, de investigación en el CSIC, a dedicar horas y días, entresacados de nuestra actividad diaria, para realizar y para organizar estas olimpiadas, en todas sus fases, y muchas más horas (difícil de calcular y hasta de creer) para preparar minuciosamente las pruebas? Sin duda que lo arriba expuesto en relación con los estudiantes constituye el motivo de nuestra dedicación, porque estamos convencidos de su importancia y lo afrontamos con satisfacción altruista. Esos días y horas no están retribuidos materialmente, aunque sí intelectual y

moralmente. A veces, cuando hablamos con algunos compañeros, se nos mira con extrañeza, porque ¿para qué nos sirve, qué nos va en ello? Bueno, si nos entretenemos en estas menudencias, será que no tienen otra cosa mejor que hacer, a veces se dice (o se piensa). Desde luego que este no es el caso. Como se suele admitir e incluso comprobar, las olimpiadas y demás actividades con los jóvenes aprendices de la física y con la sociedad en general, complementan y ennoblecen la investigación y la docencia de un modo compatible y simbiótico. Los profesores que hemos colaborado en las Olimpiadas de Física, especialmente los miembros de la Comisión correspondiente, nos sentimos muy satisfechos y activos en un clima de buena amistad y entendimiento. Disposición que es compartida por la propia Real Sociedad Española de Física, que las organiza por delegación convenida del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Aunque este artículo no es un reportaje, pues esa función corre a cargo de los responsables directos de las diversas fases de la Olimpiada, no puedo dejar de mencionar las importantes novedades acaecidas en los últimos años. Además del cambio ministerial de 2012, del cambio de Junta Directiva de la RSEF en 2013, en 2014 se han renovado las personas directamente responsables en estos mismos años: el Prof. J. Alberto Carrión dejó la dirección de la Olimpiada Española de Física, y el que suscribe dejó la presidencia de la Comisión de Olimpiadas. Ambas funciones, fundidas, han pasado a ser desempeñadas por el Prof. José Tornos, de la Universidad de Zaragoza, cuya larga experiencia y buen hacer aseguran una continuidad exitosa de nuestras Olimpiadas de Física.

Ramón Román Roldán

Catedrático Jubilado
de la Universidad de Granada

Premios de Física Real Sociedad Española de Física-Fundación BBVA

Los *Premios de Física*, creados por la RSEF en 1958, y fruto de la colaboración con la Fundación BBVA desde 2008, reconocen la creatividad, el esfuerzo y el logro en el campo de la física para así servir de estímulo a los profesionales de la investigación, la enseñanza en todos los ámbitos, la innovación, la tecnología y la divulgación. La convocatoria 2014, estructurada en ocho categorías, ha contado con 70 candidatos. Los jurados nombrados al efecto, constatando una elevada calidad, buscaron la excelencia científica y docente entre aquellos que, formando parte notable de la comunidad de físicos españoles, se distingiesen por las contribuciones más sobresalientes en física y por haber generado vocaciones en ciencia. Así, en las reuniones del 27 de noviembre de 2014 en la sede de la Fundación BBVA de Madrid, se hicieron las propuestas a la RSEF, cuya Junta de Gobierno resolvió el 9 de enero 2015 lo siguiente:

Medalla de la RSEF a María Josefa Yzuel Giménez. El Jurado menciona "la trayectoria científica y académica que ha impulsado notablemente el campo de la Óptica a ni-

vel nacional además de estar presente de forma destacada en foros internacionales".

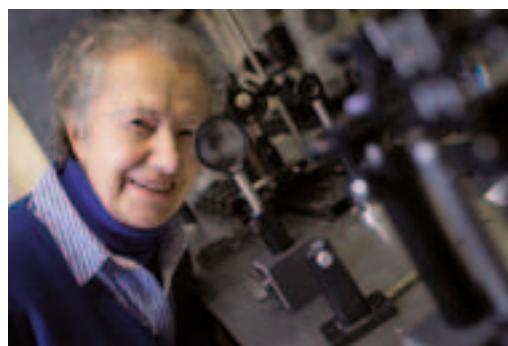


Foto cedida por la Fundación BBVA.

María Josefa Yzuel fue, en 1971, la primera mujer española con plaza estable de profesor universitario en el área de física. Su investigación en procesado de imágenes y cristales líquidos es reconocida a escala mundial, lo que se complementa con un notable peso en importantes organizaciones científicas internacionales. Ha sido profesora en las Universidades de Zaragoza, Granada y Autónoma de Barcelona, vocal en la Junta de Gobierno de la RSEF entre 1999 y 2007, y vicepresidenta de 2007 a 2011. Presidenta en 2009 de SPIE-The International Society of Optics and Photonics, actualmente es

vicepresidenta en el Bureau de la International Commission for Optics.

Investigador Novel en Física Teórica, a Vicent Mateu Barreda. El Jurado menciona "sus sobresalientes contribuciones en la obtención de predicciones precisas en Cromodinámica Cuántica, que es la teoría que describe las fuerzas entre quarks"

Vicent Mateu se licenció en la Universidad de Valencia y se doctoró allí en el Instituto de Física Corpuscular en 2008, siendo luego contratado como investigador post-doctoral en el Max-Planck-Institute de Múnich hasta diciembre de 2010. En 2009 se le concedió un proyecto Marie Curie cuyos dos pri-



meros años fueron de estancia en el MIT y el tercero en el CSIC. Desde diciembre de 2013 trabaja, como Profesor Asistente en la Universidad de Viena, en el campo de las interacciones fuertes a energías altas, estudiando procesos en los que se producen jets. Destacan sus determinaciones de gran precisión de la constante de acoplamiento fuerte, así como de las masas de los quarks *charm* y *bottom*.

Investigado Novel en Física Experimental, a

Pablo Alonso González. El Jurado menciona “sus trabajos focalizados al estudio de la interacción entre la luz y la materia a nivel de la nanoscala, habiéndose convertido en un experto a nivel mundial. Sus trabajos en el campo de la nanoscopía de campo cercano han permitido visualizar por primera vez los campos eléctricos locales en configuracio-



nes complejos de nanoantenas metálicas. En particular, ha visualizado por primera vez tanto la excitación como el control de la propagación de plasmones de grafeno”.

Pablo Alonso-González se licenció en la Universidad de Oviedo y se doctoró por la Universidad Autónoma de Madrid, en el Instituto de Microelectrónica, con un estudio experimental sobre el crecimiento ordenado y epitaxial de nanoestructuras semiconductoras. Desde 2009, es investigador post-doctoral del CIC nanoGUNE en San Sebastián, donde ha realizado estudios pioneros sobre las propiedades ópticas en la nanoscala de materiales bidimensionales y nanoestructuras metálicas. Actualmente es también científico visitante en Pekín, el Instituto de Física de la Academia de Ciencias China.

Física, Innovación y Tecnología, a Susana Marcos Celestino. El Jurado menciona “su investigación de primer nivel en el campo de la física de la visión que ha generado innovaciones de gran repercusión en

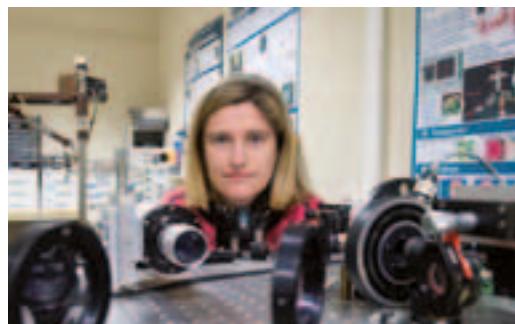


Foto cedida por la Fundación BBVA.

empresas del sector oftálmico nacional e internacional, y una mejora en el diagnóstico y tratamiento de condiciones oculares con un alcance potencial a millones de pacientes en todo el mundo”.

Susana Marcos recibió licenciatura (1992) y doctorado (1996) por la Universidad de Salamanca, e hizo un post-doc (1997-2000) en el Schepens Eye Research Institute, Universidad de Harvard, como Fulbright y financiada por Human Frontier Science. Actualmente es Profesora de Investigación del CSIC en el Instituto de Óptica (que dirigió entre 2008 y 2012), donde ahora dirige el Laboratorio de Óptica Visual y Biofotónica. Lidera un ERC Advanced Grant y otros proyectos de investigación en el campo de la física y la óptica aplicada a las ciencias de la visión, y es Director-at-Large de la Optical Society of America y Miembro del Comité Editorial de su revista. Su trabajo ha sido reconocido con numerosos premios internacionales entre los que destacan la Adolph Lomb Medal, European Young Investigator Award, ICO Prize, Doctorado Honoris Causa por la Academia de Ciencias y Tecnología de Ucrania y fellowships de la European Optical Society, Optical Society of America y Association for Research in Vision and Ophthalmology.

Enseñanza y Divulgación de la Física, modalidad Enseñanza Universitaria, a Agustín Sánchez Lavega. El Jurado menciona: “por combinar sus investigaciones en ciencias planetarias al más alto nivel con la comunicación de experiencias docentes en revistas de impacto que han tenido amplia repercusión internacional, así como por su excelente labor divulgadora que se ha plasmado, entre otras, en la creación del Aula EspaZio”.

Entre 1980 y 1987 trabajó en el Centro Astronómico Hispano Alemán- Max Planck Institut fur Astronomie (Observatorio de Calar Alto) en Almería. En 1986 se doctoró por la UPV/EHU,

incorporándose en 1987 a la Escuela T. Superior de Ingeniería de Bilbao donde es Catedrático de Física Aplicada. Dirige el Grupo de Ciencias Planetarias, el Aula Espacio-Observatorio, y el Máster de Ciencia, Tecnología y Observación Espacial, y Director del Departamento de Física Aplicada I. Ha participado en numerosas actividades de divulgación científica, y es autor de *An Introduction to Planetary Atmospheres* (CRC Press, Taylor & Francis, EE. UU.). Ha sido miembro del consejo asesor para la Exploración del Sistema Solar de la Agencia Espacial Europea y participa-



do en misiones espaciales de la NASA y ESA. Entre sus publicaciones destacan 10 publicados en revistas *Nature* (donde ha aparecido cuatro veces en portada) y *Science*.

Enseñanza y Divulgación de la Física, modalidad Enseñanza Media, a Alejandro del Mazo Vivar. El Jurado menciona “su extraordinario trabajo en el diseño o producción de experimentos, vídeos, fotografías, cursos, etc. Especialmente ha mostrado una capacidad excepcional para el diseño y para la preparación de la prueba experimental de las Olimpiadas de Física, ajustándose a las condiciones prácticas impuestas por el número de alumnos y por la escasez de medios”.

Catedrático de Física y Química en el IES Francisco Salinas de Salamanca, participa

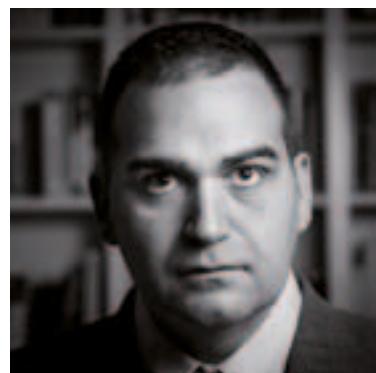


con asiduidad desde 2000 en el programa Ciencia en Acción, donde ha obtenido tres premios y tres menciones en diversas convocatorias. Formó parte del Comité Académico de la XXXVI Olimpiada Internacional de Física en 2005, y en 2007 y desde 2011 hasta la actualidad ha pertenecido a la Comisión de la Olimpiada de Física. En el curso 2008-2009 puso en marcha en su instituto la iniciativa "Jornadas Científicas", donde los alumnos desarrollan actividades experimentales para fomentar el interés por la ciencia. Ha intervenido en conferencias, exhibiciones científicas, cursos de enseñanza de la física para profesores y puesto en la red una veintena de vídeos de experimentos físicos. Ha participado en certámenes de fotografía científica con varios premios, y cuenta con diversos artículos y publicaciones relacionados con la física experimental.

Mejor Artículo de Enseñanza en las publicaciones de la RSEF, a "Guía básica para fotografiar estrellas con una cámara réflex digital", por Rafael Vida y Javier Galeano.

El Jurado menciona "el acercamiento de la astronomía a los lectores de la revista mediante una técnica sencilla y de fácil acceso, a través de la fotografía del cielo estrellado, resultando así sugerente para los docentes en física, óptica y astronomía".

Rafael Vida es licenciado por la UNED, estudiante de doctorado en la Universidad Politécnica de Madrid y profesor asociado en ICAI, Universidad Pontificia de Comillas. Además, es



responsable de Seguridad Telco en Telefónica de España y formador con más de 20 años de experiencia.

Javier Galeano es licenciado (1991) por la Universidad Complutense de Madrid y doctor (1997) por la UNED. Cuenta con una experiencia de más de 20 años como profesor universitario en la Universidad Politécnica de Madrid. Su campo de investigación es la Física Estadística con más de 20 publicaciones entre libros y artículos. También cuen-

ta con experiencia como divulgador de ciencia básica.

Mejor Artículo de Investigación en las publicaciones de la RSEF, a "La ciencia de la luz. En la frontera entre la física y la química", por Juan José Serrano Pérez. El Jurado señala "que, utilizando como hilo conductor la naturaleza de la luz, abarca un gran número de campos de la ciencia. Este artículo, de una gran calidad expositiva, supone una valiosa aportación al campo de los estudios interdisciplinares".

Obituario: M.^a del Mar Artigao

El pasado 24 de diciembre falleció, tras una larga y penosa enfermedad, nuestra compañera María del Mar Artigao Castillo, vicepresidenta de la sección local de la RSEF en Castilla-La Mancha. Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad de Valencia, María del Mar era profesora titular de universidad de la Escuela de Ingenieros Industriales de Albacete, en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Castilla-La Mancha. Pertenecía al claustro de profesores de nuestra universidad desde 1990, muy pocos años después de la creación de nuestra universidad, en que se incorporó como profesora ayudante. Hasta que la enfermedad imposibilitó su dedicación a la actividad investigadora, fue responsa-



ble del Grupo de Investigación Interdisciplinar en Sistemas Dinámicos (GI2SD). Deja entre sus compañeros del departamento y de la sección local un recuerdo imborrable. Durante los últimos cuatro

años hemos asistido con admiración a la entereza con que ha afrontado la lucha contra la enfermedad. Personalmente, jamás olvidaré que, conociendo ella las similares circunstancias que padecíamos en mi familia, nos animaba a mantener siempre el ánimo elevado como medio fundamental para soportar la dureza de los tratamientos contra el cáncer. Sirvan estas palabras con motivo de su prematura muerte como homenaje y recuerdo de sus amigos y compañeros de la sección local.

Descanse en paz.

Marco Antonio López
de la Torre Hidalgo
Presidente de la sección local de Castilla-La Mancha

Nuevo co-Editor Jefe de la revista *European Physical Journal-Applied Physics*

A propuesta del Presidente de la RSEF, miembro del Scientific Advisory Committee de los *European Physics Journals*, el profesor Luis Viña, catedrático de física de la materia condensada de la Universidad Autónoma de Madrid y reconocido investigador en el campo, ha sido nombrado co-Editor Jefe de la revista *EPJ-Applied Physics* junto con la profesora Virginie Serin de la Universidad de Toulouse. Se espera que estos nombramientos permitan tener un equipo multidisciplinar para liderar esta revista. Tanto desde la RSEF como desde la RdF, le transmitimos



la enhorabuena y le deseamos mucho éxito en su labor. El Prof. Luis Viña, que en la actualidad también es director del Departamento de Física de Materiales

de la (UAM), ha desarrollado su carrera investigadora en el campo de las propiedades electrónicas de nanoestructuras semiconductoras. Realizó su Tesis Doctoral en el reconocido Max-Planck-Institut für Festkörperforschung de Stuttgart y trabajó posteriormente en los Institutos de Ciencia de Materiales del CSIC en Zaragoza y Madrid, además de haber realizado estancias en diferentes centros, entre los que destacan los laboratorios de IBM (Yorktown Heights), A&TT-Bell Labs. y el MIT (EE. UU.), École Normale Supérieure (Francia), y la École Polytechnique Federal de Lausanne (Suiza).

XIII Olimpiada Científica de la Unión Europea

Durante los pasados días 18-20 de enero se celebró en la Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas de Ciudad Real la fase nacional de la European Union Science Olympiad (EUSO).

Es el segundo año que este centro de la UCLM acoge el evento diseñado para servir de preámbulo a las olimpiadas internacionales y de estímulo a los jóvenes estudiantes a la vez que fomentan sus inquietudes científicas y el gusto por el trabajo en equipo.

Como se sabe, la EUSO es una competición científica multidisciplinar y por equipos de estudiantes de 16 años de edad en la que España viene participando desde su primera convocatoria en 2003 con la única excepción de 2013.

Ala fase previa se inscribieron 156 equipos que hubieron de realizar, en su propio centro y bajo la tutela de sus profesores, las tareas experimentales propuestas. Los 10 equipos que a juicio de los responsables nacionales realizaron un mejor trabajo se reunieron en Ciudad Real y, ahora sin sus profesores, acometieron durante toda la mañana del día 19 las pruebas preparadas por los departamentos de física, química y biología de Ciudad Real y que, así como el año pasado versaron sobre el vino, esta vez tuvieron como hilo conductor el aceite de oliva.

No todo fue laboratorio. También hubo tiempo para visitar las Tablas de



Daimiel y Almagro mientras el comité evaluador cumplía su labor que culminó con la selección de los dos equipos que representarán a España (si el MEC financia) en la final europea a celebrar en Klagenfurt (Austria) entre los días 26 de mayo y 3 de abril. Estos fueron los equipos compuestos por los estudiantes: Josué Eduardo Calderón Yépez, Julio Campos Parrilla y Daniel Vidal Jiménez del instituto María Zambrano de Alcázar de San Juan (Ciudad Real), y Óscar Franch Mezquita, Andrea Moreno Pitarch e Inmaculada Benet Ebro del instituto Francesc Tàrrega de Vila-real (Castellón) todos ellos estudiantes de 1.º de bachillerato. Felicidades y nuestros mejores deseos de éxito en Klagenfurt.

La ceremonia de clausura y proclamación de ganadores fue presidida por la vicerrectora de estudiantes Beatriz Cabañas acompañada del Sr. Decano Don Ángel Ríos y de los representantes de las Reales Sociedades de Física, Química y de la Asociación Nacional de Químicos. No hubo representación de MEC.

Previamente al acto anterior, todos los asistentes disfrutamos de la motivadora conferencia que, con el título: *Desafíos tecnológicos de nuestra era*, nos ofreció el Dr. Don Amador Menéndez Velázquez, premio europeo de divulgación científica 2009.

Destacamos la difusión mediática que ha tenido la realización este año y que puede constatarse con el gran número de enlaces accesibles desde la página: <http://euso.es/resultados.php>.



Real Sociedad Española de Física

R.S.E.F.



Facultad de Ciencias Físicas Universidad Complutense	Tel. 91 394 43 59 91 394 43 50 Fax: 91 394 41 62	Si deseas afiliarte, éstos son los datos que debes aportarnos								
Avda. Complutense, s/n Madrid 28040		Nombre:								
Para más información: www.rsef.es administracion@rsef.es http://twitter.com/RSEF_ESP https://www.facebook.com/RealSociedadEspanolaDeFisica		Dirección:								
		Provincia: Teléfono/Fax: E-mail: NIF:								
		Datos bancarios para domiciliación <table><tr><td>Entidad</td><td>Oficina</td><td>DC</td><td>Cuenta</td></tr><tr><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/></td><td><input type="text"/><input type="text"/><input type="text"/><input type="text"/><input type="text"/><input type="text"/></td></tr></table>	Entidad	Oficina	DC	Cuenta	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
Entidad	Oficina	DC	Cuenta							
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>							

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

VOCALES

E. Arribas Garde, A. Beléndez Vázquez,
F. Castejón Magaña, J. Fernández Rossier,
M. A. Fernández Sanjuán, A. Gil Gil, I. Guerra
Plasencia, M.R. Heras Celemín, M.I. Hernández
Hernández, B. Méndez Martín, A. Moro Martín,
E. Moya Valgañón, R. Ranchal Sánchez,
L. F. Rull Fernández, C. Untiedt Lecuona,
G. J. De Valcárcel Gonzalvo, L. Viña Liste.

EDITOR GENERAL

Joaquín Marro Borau

PRESIDENTES DE SECCIONES LOCALES

S. Gallego Rico (Alicante)
A. Carrión Sanjuán (Aragón)
A. Alija Bayón (Asturias)
A. Ruiz Jimeno (Cantabria)
M.A. López de la Torre (Castilla La-Mancha)
J. Jesús Ruiz Lorenzo (Extremadura)
M.I. Paz Andrade (Galicia)
M.ª Carmen Carrión Pérez (Granada)
T. Albaízar 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)
M.ª V. Fonseca González (Altas Energías)
J. M.ª Rodríguez Espinosa (Astrofísica)
L. Gimeno Presa (Atmósfera y Océanos)
A. García Vela (Atómica y Molecular)
F. Cortina Gil (Nuclear)
J. San Román del Barrio (Polímeros)
M.ª D. Calzada Canalejo (Física de Plasmas)
P. A. Santamaría Ibarburu (Reología)
J. R. Solana Quirós (Termología)
F. Cornet Sánchez del Águila (Teórica)
J. Luis Muñiz Gutiérrez (Física-Médica)

3B Scientific®

a la Vanguardia en la

Divulgación de la Física

...going one step further



1000540
NETlog para adquisición de datos



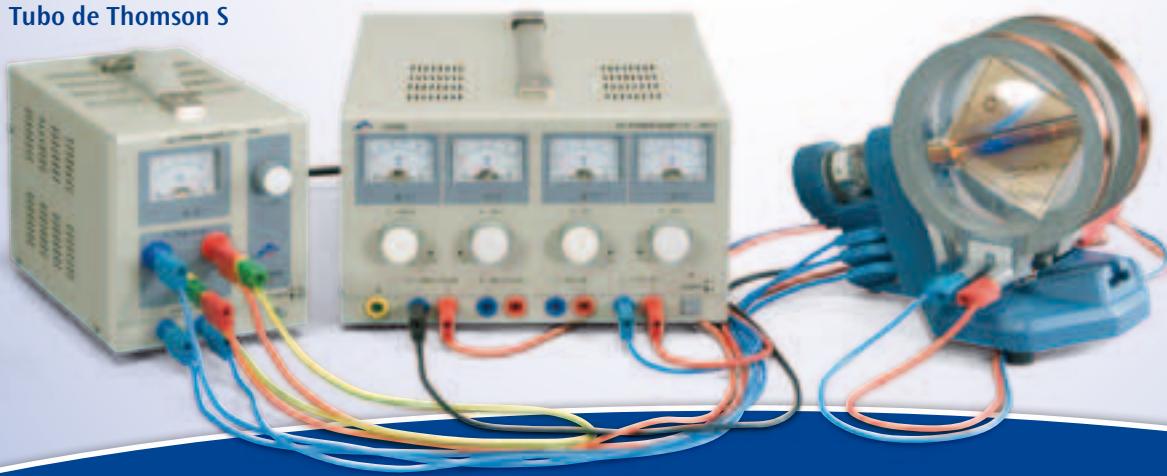
1012782
Microscopio efecto tunel

1000657
Aparato de Rayos X



1008699
H-Racer con pila de H₂

1000617
Tubo de Thomson S



Catálogos y más información en:

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

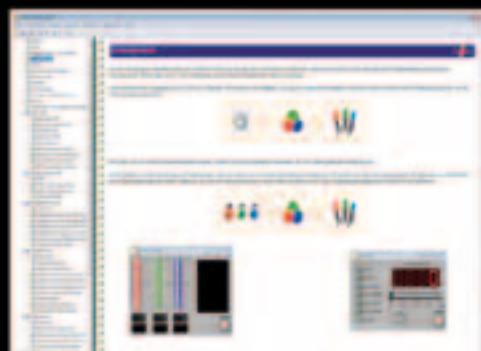
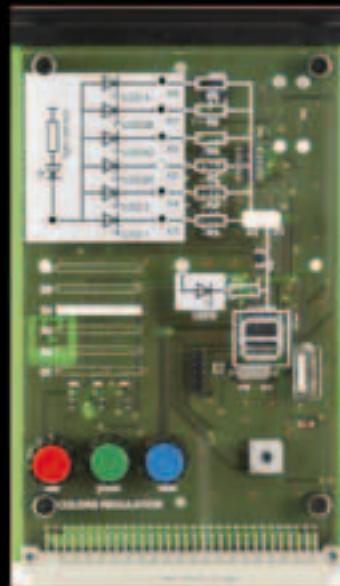


UNITRAIN I

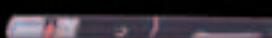
Iluminación por LED y reconocimiento de colores



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

