

Revista
Española
de

FÍSICA

UNA PUBLICACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA
www.rsef.es Volumen 34 • Número 2 • 2020



Real
Sociedad
Española de
Física

R.S.E.F.



- Comunicado de los Presidentes de la RSEF, la RSEQ y la RSME
- Temas de Física
- Notas de clase

- Puntos de interés
- Hemos leído que
- Reseñas de libros de interés
- Noticias



FECYT
FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



RED DE UNIDADES DE
CULTURA CIENTÍFICA
Y DE LA INNOVACIÓN

REVISTA DE FÍSICA (REF)

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:

Augusto Beléndez Vázquez (UA)

Subdirectores:

Antonio Dobado González (UCM)

José María Ortiz de Zárate Leira (UCM)

Elena Pinilla Cienfuegos (UPV)

Editor General:

Miguel Ángel Fernández Sanjuán (URJC)

Secretaría de redacción:

Itziar Serrano

Consejo editorial:

Antonio Acín Dal Maschio (ICFO)

Ángel Ballesteros Castañeda (UBU)

Mariona Coll (ICMAB-CSIC)

Eva M.^a Fernández Sánchez (UNED)

Pascuala García Martínez (UV)

Maia García Vergniory (DIPC)

José Ignacio Iñiguez de la Torre Bayo (USAL)

M.^a del Carmen Lemos Fernández (US)

M.^a del Prado Martín Moruno (UCM)

Benjamín Montesinos Comino (CAB, CSIC-INTA)

Pablo Nacenta Torres (IES Alameda de Osuna, Madrid)

Jose M.^a Pastor Benavides (DEDF, RSEF)

Ramón Román Roldán (DEDF, RSEF)

Carlos Sabin Lestayo (IFF-CSIC)

Andrés Santos Reyes (UNEX)

Jesús Miguel Seoane Sepulveda (URJC)

Isabel Tanarro Onrubia (IEM-CSIC)

Mariam Tórtola Baixauli (IFIC, UV)

Composición y edición:

Disegraf Soluciones Gráficas, S. L.

<http://www.disegrafsl.es>

Entidades patrocinadoras de la Real Sociedad

Española de Física:

Universidad Complutense de Madrid

Fundación BBVA

Fundación Ramón Areces

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

ISSN: 0213-862X

Real Sociedad Española de Física

Facultad de Ciencias Físicas-UCM

Plaza de las Ciencias, 1

28040 Madrid

<http://rsef.es>

Para temas relacionados con la Rdf:

revista.de.fisica@rsef.es

Tel.: 91 394 4359/50

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 Comunicado (17-V-20) conjunto de los Presidentes de la RSEF, la RSEQ y la RSME sobre las Matemáticas en el Bachillerato, J. Adolfo de Azcárraga, Antonio M. Echavarren y Francisco J. Marcellán

Temas de Física

- 3 Entender una epidemia. El coronavirus en España, situación y escenarios, Antonio Guirao Piñera
- 11 Muerte por materia oscura, María Luisa Sarsa Sarsa
- 18 Sesgos cognitivos en la ciencia, Andrés Redondo Cubero
- 23 Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados, Alberto Saldaña López, Christian Maibohm, Oscar F. Silvestre y Jana B. Nieder
- 29 El papel de las energías renovables en la Transición Energética 2030 en España, J. M. Martínez-Duart y R. Gómez-Calvet

Notas de clase

- 34 Experimentos con un módulo fotovoltaico, Manuel Iván Rodríguez Martín
- 38 Efecto Doppler de focos extensos: una propuesta experimental, Eduardo Díaz-Miguel Bermúdez
- 41 La enseñanza de la Física: Una apasionante aventura a través del patrimonio de los institutos históricos, M.^a Matilde Ariza Montes

Robert May: un científico excepcional

- 47 Lord Robert May of Oxford: Un científico excepcional que buscó la sencillez de lo complejo, Miguel Ángel Fernández Sanjuán

Puntos de interés

Hemos leído que...

Reseñas de libros de interés

- 57 Advances in Neutron Optics
- 58 The Hunt for Vulcan: ... And How Albert Einstein Destroyed a Planet, Discovered Relativity, and Deciphered the Universe

In memoriam

- 59 Teresa Rodrigo Anoro (1956-2020)
- 60 Juan José Sáenz (1960-2020)
- 60 Manuel Carreira Vérez (1931-2020)

Noticias

- 62 Laura Lechuga lidera el proyecto CoNVat de la UE para la lucha contra la COVID-19
- 62 Javier Urchueguía, nuevo presidente del grupo europeo de Climatización Renovable
- 63 Augusto Beléndez reconocido en la Universidad de Alicante por su excelencia docente
- 63 Ante una nueva Ley Orgánica de Educación (la LOMLOE)
- 64 Pilar Hernández, miembro del Comité de Política Científica del CERN
- 64 María Moreno Llácer, Premio Científico-Técnico de Argemesí

Comunicado (17-V-20) conjunto de los Presidentes de la RSEF, la RSEQ y la RSME sobre las Matemáticas en el Bachillerato

A lo largo de sus más de cien años de historia, y pese a las diversas y a veces difíciles vicisitudes que han atravesado a lo largo de su existencia, las Reales Sociedades Españolas de Física (RSEF), Química (RSEQ) y Matemáticas (RSME) han dedicado sus esfuerzos al apoyo de la educación y la investigación en sus respectivas especialidades y, en conjunto, al avance científico y cultural de nuestro país; en suma, a su progreso económico y social. En sus orígenes, las sociedades contribuyeron de forma decisiva al despegue en España de nuestras respectivas ciencias durante lo que hoy se conoce como la Edad de Plata de la Ciencia Española, abruptamente concluida con la guerra civil. Más recientemente, esa actividad de fomento de la ciencia y de defensa de la cultura científica ha sido desarrollada por nuestras sociedades a través de iniciativas de alcance nacional e internacional que la RSEF, la RSEQ y la RSME realizan fundamentalmente gracias a las aportaciones de las cuotas anuales de sus miembros, pues las tres son completamente independientes y sin ánimo de lucro.

Sin embargo, el gran capital de conocimiento científico, educativo y cultural que almacenan nuestras sociedades ha sido tradicionalmente ignorado por Ministerios de todo tipo y color, incluso cuando se les han remitido Informes sobre alguna cuestión relevante. No obstante, eso no implica que en ocasiones especiales nuestras Sociedades, en cumplimiento de sus fines, no deban alzar su voz públicamente cuando se proyectan cambios legislativos de calado que pueden resultar muy lesivos para la ciencia y la sociedad española en su conjunto.

Este es el caso del “Proyecto de Ley Orgánica por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación”. No nos corresponde aquí analizar ese proyecto ni la *langue de bois* que domina el texto¹, aunque sí cabría resaltar el hecho de que las modificaciones que contiene ese proyecto ocupan 81 páginas. Solo queremos comentar aquí lo que concierne a las asignaturas comunes del Bachillerato. El nuevo Art. 34.1 de la ley establecería que éste tendría tres modalidades: 1) Ciencias y Tecnología; 2) Humanidades y Ciencias Sociales y 3) Artes.

A continuación, el Art. 34.2 dispone que “el bachillerato se organizará en materias comunes, en materias de modalidad y en materias optativas”. Y, seguidamente, el Art. 34.6 dictamina que “las materias comunes del bachillerato serán a) Educación Física; b) Filosofía; c) Historia de la Filosofía; d) Historia de España; e) Lengua Castellana y Literatura y, si la hubiere, Lengua Cooficial y Literatura y f) Lengua Extranjera. Como se comprueba, *las Matemáticas no figuran entre las asignaturas comunes*.

Creemos que esta omisión es un gravísimo error. Por supuesto, las matemáticas son esenciales en el estudio de la naturaleza: como ya observó Galileo ¡en 1623!, *il libro della natura è scritto in linguaggio matematico*. La Ciencia (y no solo ella) depende de las matemáticas y cada día lo hace en un mayor grado. Y es preciso asimilar una base general de las mismas cuanto antes: las matemáticas son un lenguaje y, como sucede con todas las lenguas, hay que aprenderlo cuando se es muy joven para poder utilizarlo bien. Omitir las matemáticas entre las asignaturas comunes erige una barrera que, además, dificultará mucho o incluso hará imposible que un alumno pueda cambiar si lo desea su trayectoria u orientación profesional en un futuro. La alfabetización científica requiere adquirir tempranamente unos mínimos conocimientos matemáticos.

Una de las características de nuestro tiempo es precisamente el alto contenido matemático que tiene buena parte de la información que recibimos y que afecta a nuestras vidas. El *anumerismo* de una fracción no desdeñable de la sociedad española deja indefensos a muchos ciudadanos ante buena parte de los datos numéricos que recibe y, lo que no es asunto menor, para detectar una posible tergiversación de esos datos, sea ésta casual o intencionada. Hay pues razones muy serias para evitar el *anumerismo*, incluso de defensa de la democracia: esta requiere una sociedad informada y no sumisa, por lo que la sociedad necesita un conocimiento elemental de las matemáticas. En estos terribles tiempos de la COVID-19 se procura, con razón, hacer el mayor número posible de pruebas para conocer su distribución en España. Pues bien, para medir la extensión del *anumerismo* en la sociedad española bastaría hacer esta pregunta elemental a una muestra suficientemente amplia de sus ciudadanos: ¿cuánto son los tres

¹ <https://www.educacionyfp.gob.es/dam/jcr:8c7d3863-aaa7-4bbd-91b2-4d05bcb80286/apl-lomloe-web2020-03-03.pdf>.

quintos de dos tercios? Estamos seguros de que los redactores/as de la nueva ley orgánica *de educación* responderían en dos segundos, pues así de sencilla es la pregunta. Pero, como ese no es universalmente el caso, resulta extraño observar que entre las materias *comunes* del Bachillerato se prevean *dos* asignaturas de filosofía y ninguna de matemáticas (ni tampoco de ciencias generales) pues, etimológicamente, filosofía es ‘amor a la sabiduría’.

Más aún: desde hace mucho tiempo ya no cabe hacer filosofía al margen de la ciencia, algo que no parecen apreciar los redactores/as de las modificaciones de Ley Orgánica de Educación. Sin embargo, cuando hoy se conoce el mecanismo —las mutaciones genéticas y la selección natural— de la aparición y evolución de las especies, cuando ya se ha descifrado el genoma humano y la ingeniería genética no hace más que avanzar, cuando aspectos del comportamiento pueden analizarse a la luz de la sociobiología, cuando se sabe que ciertas comunidades de primates y otros mamíferos poseen rudimentos de cultura, cuando la investigación sobre los procesos neuronales y de adquisición del conocimiento no hace sino progresar, cuando se conoce que el espacio-tiempo no es euclídeo pese a lo que afirmó Kant *a priori*, cuando la futura computación cuántica y la inteligencia artificial podrían cambiar completamente nuestras vidas, resulta obvio que hoy no cabe pensamiento filosófico al margen de la ciencia².

² Una adición (de J. A. de A.) sobre ciencia y filosofía al comunicado original. Vale la pena recordar una anécdota que concierne a Werner Heisenberg y a Carl Friedrich von Weizsäcker sobre física y filosofía. Recién graduado en 1929 en el *Gymnasium* en Berlín, von Weizsäcker escribió a Heisenberg, a quien conocía personalmente, expresándole su deseo de estudiar filosofía. Heisenberg, entonces profesor en Leipzig, le disuadió: “uno debería trabajar en física mientras es joven; en nuestro siglo es necesario explicar la naturaleza con las herramientas de la física. La filosofía, como sabes por Platón, requiere una persona madura, digamos de 50 años de edad”. Heisenberg, que estaba versado en los clásicos, sabía lo que decía; él mismo escribiría después *Physics and Philosophy* en 1958. El joven von Weizsäcker siguió su consejo y, tras unos meses en la universidad de Berlín, se trasladó enseguida a Leipzig en el invierno de 1929/30, donde estuvo adscrito al seminario de Heisenberg. Allí se doctoró —con Friedrich Hund— en 1933 con una tesis que Heisenberg consideró “muy buena”. Tras la guerra, von Weizsäcker acabó siendo el director de la división teórica del *Max Planck Institut für Physik* en Göttingen, del que el propio Heisenberg era director. Finalmente, en 1957 v. W. satisfizo su deseo juvenil, dejando Göttingen para hacerse cargo de la cátedra de Filosofía de la Universidad de Hamburgo. Pero entretanto (y al margen de su participación en el fallido programa nuclear alemán), v. W. había hecho contribuciones fundamentales a la física, como se puede apreciar en lo que le escribió el 27-V-2002 desde Cornell Hans A. Bethe, el primer Nobel por trabajos en astrofísica (1967), para felicitarle en su nonagésimo cumpleaños [las fechas son más]: “tu descubriste [1937] que la fusión protón-protón debía ser la primera reacción nuclear en una estrella; después, Critchfield

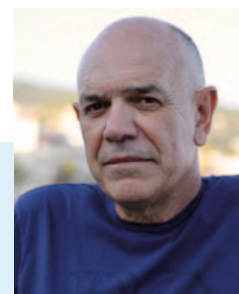
Todo esto resulta evidente ahora mismo, cuando la COVID-19 requiere de la urgente invención de nuevos fármacos y vacunas que detengan esta y futuras pandemias. Y no puede haber ciencia sin matemáticas, palabra que, por cierto y también etimológicamente, significa conocimiento. Por ello, el mencionado proyecto de ley orgánica debe ser modificado para no privar de esa mínima formación matemática a *ninguno* de nuestros futuros bachilleres. Sencillamente, ni ellos ni el país se lo merecen.

Finalmente, queremos resaltar que la UNESCO ha declarado el 14 de marzo (rememorando el número π —*pi*— al estilo del calendario anglosajón 3/14 que escribe el mes antes del día) como Día Internacional de las Matemáticas³. En su primera celebración (2020), el mensaje *Mathematics is everywhere* pone de manifiesto esa presencia de las matemáticas en nuestra vida cotidiana, que debe reflejarse también en el ámbito educativo.

J. Adolfo de Azcárraga
RSEF



Antonio M. Echavarren
RSEQ



Francisco J. Marcellán
RSME



y yo lo mostramos [1938] cuantitativamente. Pocos meses después encontramos independientemente el ciclo carbono-nitrógeno que generalmente se acepta como la fuente más importante de energía de las estrellas”. ¿Cabe dudar de lo acertado del consejo de Heisenberg?

3 <https://en.unesco.org/commemorations/mathematics>.

Entender una epidemia

El coronavirus en España, situación y escenarios

Antonio Guirao Piñera

El estudio de la dinámica de las epidemias permite comprender su crecimiento, en buena parte exponencial. La ciencia ofrece la base para diseñar las medidas de contención adecuadas frente a estos fenómenos de avalancha que sin control adquieren enormes dimensiones.

Las epidemias crecen de forma exponencial en gran parte de su desarrollo, y si no se controlan pueden alcanzar dimensiones enormes. Conocer la dinámica de una epidemia permite anticipar su evolución y diseñar adecuadamente las medidas de contención. Se estudian los parámetros de crecimiento exponencial y la fase de saturación, y se explica el número reproductivo como parámetro de control. El modelo matemático Susceptibles-Infectados-Recuperados (SIR) permite obtener las curvas epidemiológicas y cuantificar el tamaño de la epidemia. Se presenta la situación de la epidemia de coronavirus en España y se aplica el modelo para hacer predicciones.

1. Introducción

La epidemia del nuevo virus SARS-CoV-2, que produce la enfermedad llamada COVID-19, nos ha traído un nuevo repertorio de conceptos y términos: pico, aplanar la curva, número reproductivo, crecimiento exponencial, infectados, inmunidad, vacunas, medidas de contención... El objetivo de este artículo es presentar de forma divulgativa algunas nociones sobre los mecanismos de propagación y contención de una epidemia. En particular, nos acercamos a la situación de la epidemia de coronavirus en España a partir de los datos reales y de algunas simulaciones.

Una epidemia es un fenómeno de avalancha, que se autoamplifica pudiendo llegar a dimensiones exageradas. Hay muchos fenómenos similares, como la propagación de un incendio voraz por el bosque, que también crecen de forma exponencial, al menos en sus inicios. Esto ayudará a entender, sobre una base científica, los límites en los cuales se desarrolla una epidemia o una pandemia a nivel global.

Una epidemia puede controlarse, pero hay que entender sus mecanismos para poder hacerlo de forma efectiva. El crecimiento es una cuestión de ganancias y pérdidas. Para extinguir la epidemia conviene reducir sus ganancias y aumentar sus pérdidas, lo que se consigue actuando de forma combinada con medidas de distanciamiento social, higiene, rastreo y detección rápida de enfermos. Cuantitativamente, ello se traduce en reducir por debajo de la unidad el “número reproductivo”, que definiremos después.

Un gran problema frente a una epidemia es que la estudiamos con datos en diferido. Nunca sabemos el número real de enfermos que hay en la población en un cierto instante, porque muchos aún están incubando el virus. Además, se desconoce el número de enfermos asintomáticos, y por ello los casos confirmados podrían ser sólo la punta del iceberg.

Los modelos permiten realizar predicciones en posibles escenarios. Para ello es muy útil el conocimiento de cómo se ha comportado la epidemia en otros países donde ha brotado antes. Las estrategias de otros países también ayudan al diseño de medidas de control más eficaces. Lógicamente, las medidas que cada país adopta también tienen en cuenta su idiosincrasia de acuerdo a las consecuencias sociales y económicas derivadas de dichas medidas.

2. Crecimientos exponenciales y epidemias

Crecimiento lineal y exponencial

Cuando una magnitud crece de forma lineal se suma algo en cada paso. En un crecimiento exponencial la magnitud se multiplica por algo en cada paso, lo que implica que crece cada vez más rápido. Por ejemplo, si cada mes guardo en la hucha 100 € mis ahorros crecen de forma lineal y al cabo de un año tendré 1.200 €. Sin embargo, si una empresa, partiendo de 1 €, obtiene un beneficio mensual del 100 %, sus ganancias al final de cada mes (2 €, 4 €, 8 €... y 4.096 € al final del

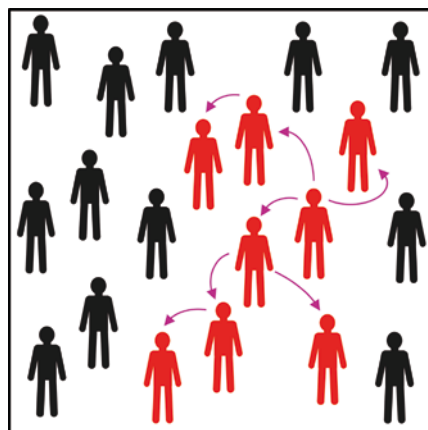


Fig. 1. Crecimiento de los contagios en una población.

año) habrán crecido exponencialmente. El crecimiento lineal sigue una progresión aritmética y el exponencial sigue una progresión geométrica. El tipo de crecimiento que se produce en las epidemias como la del coronavirus es de tipo exponencial.

En la naturaleza y en la sociedad encontramos muchos fenómenos donde las magnitudes crecen con el tiempo de forma exponencial. En biología son exponenciales: el crecimiento del número de bacterias en un cultivo, la división celular a partir del embrión o el crecimiento de un tumor. En física: las reacciones nucleares en cadena y la amplificación de la luz en un láser. En ciencias sociales, ejemplos clásicos son: el aumento de la población humana y el crecimiento económico de un país.

Fase exponencial. Tasa de crecimiento y tiempo de duplicación

Supongamos que cada persona infectada por un patógeno contagia a otra persona cada día. La progresión diaria de infectados sería: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... Cada día se duplicaría el número de infectados. A partir de un solo enfermo (*paciente 0*), tras n días habría 2^n contagiados. A ese ritmo, los 47 millones de españoles habríamos caído enfermos en 25 días, y el planeta entero en poco más de un mes.

Si el día n hay una población de P_n individuos y cada uno genera otros α individuos diarios, al día siguiente habrá $P_{n+1} = P_n + \alpha P_n$. En general, si partimos de P_0 individuos, el día n hay

$$P_n = P_0 (1 + \alpha)^n \quad (1)$$

que es la expresión de una progresión geométrica de razón $1 + \alpha$.

Por tanto, $\alpha = (P_{n+1} - P_n)/P_n$ es una *tasa de crecimiento poblacional* que nos dice cuánto ha crecido (si es positiva) o decrecido (si es negativa) la población respecto al valor previo. En el ejemplo anterior $\alpha = 1$ y, en términos porcentuales, la población de infectados crece diariamente un 100%. Esta definición se aplica a cualquier crecimiento exponencial, no sólo a las epidemias. Por ejemplo, si en España el crecimiento demográfico en 2020 es del 0,5 %, en 2021 habría $(1 + 0,005) \cdot 47 \text{ M} = 47,235 \text{ M}$ (235 mil personas más).

Si planteamos las ecuaciones con variables continuas, el crecimiento de la población en función del tiempo t viene dado por

$$\frac{dP(t)}{dt} = \lambda P(t) \rightarrow P(t) = P_0 \exp(\lambda t) \quad (2)$$

donde λ es la *tasa de crecimiento exponencial*, que tiene dimensiones de tiempo inverso y que puede calcularse como

$$\lambda = \ln \frac{P(t+1)}{P(t)} \quad (3)$$

El *tiempo de duplicación* es el tiempo necesario para que la población se duplique, y se calcula a partir de la tasa:

$$t_d = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

En la fase exponencial de una epidemia, las Ecs. 2 y 3 pueden aplicarse indistintamente al número de casos acumulados (total de personas afectadas) o al número de nuevos casos diarios (nuevos contagios), pues ambas magnitudes crecen exponencialmente. Pero en la fase de decrecimiento la Ec. 3 para calcular la tasa (que sería negativa) se aplica considerando que $P(t)$ son los nuevos contagios.

Por ejemplo, el 10 de marzo hubo en España 2.308 casos confirmados de coronavirus, y al día siguiente 3.284 casos [1]. Utilizando la Ec. 3, con el tiempo expresado en días, la tasa de crecimiento resulta $\lambda = 0,35 \text{ días}^{-1}$ (un 42 % en términos porcentuales, ya que $\alpha = 0,42$; nótese que $\lambda = \ln(1 + \alpha)$). Los casos se doblaban en aproximadamente 2 días durante esa semana previa al estado de alarma. Más adelante, por ejemplo del 2 al 3 de abril, los nuevos contagios bajaron de 7.591 a 7.280 y, por tanto, la tasa pasó a ser negativa: $\lambda = -0,04 \text{ días}^{-1}$ y los nuevos casos se reducían a la mitad cada 17 días.

Saturación del sistema y curva logística

En el mundo real el crecimiento exponencial no puede ocurrir indefinidamente, debido al agotamiento de recursos (por ejemplo, las bacterias en una charca dejan de multiplicarse cuando ya no hay bastantes nutrientes). En un sistema finito, tras una fase de crecimiento exponencial se llega a la *saturación* del sistema y se alcanza una situación de equilibrio o estacionaria donde la magnitud deja de crecer. En la dinámica del sistema, ello se refleja en que el número de nuevos individuos que surgen no es proporcional a los existentes $P(t)$, sino proporcional a dicho número multiplicado por la *capacidad del sistema*:

$$P(t) \cdot \left(\frac{P_{\max} - P(t)}{P_{\max}} \right) \quad (5)$$

donde P_{\max} es el número máximo de individuos que podrían alcanzarse en un cierto ecosistema. El factor de la derecha es la capacidad del sistema. El crecimiento está gobernado por la llamada *ecuación logística*:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \lambda P(t) \left(\frac{P_{\max} - P(t)}{P_{\max}} \right) \quad (6)$$

cuya solución es un caso particular de función sigmoidea:

$$P(t) = \frac{P_0 P_{\max}}{P_0 + (P_{\max} - P_0) \exp(-\lambda t)} \quad (7)$$

En una epidemia llamamos *susceptibles* a las personas no inmunes ni vacunadas que todavía no

han enfermado. Así, la capacidad del sistema en un tiempo dado es el número $S(t)$ de personas susceptibles relativo a la población total N , es decir $S(t)/N$. En el caso de la COVID-19, como aún no existe una vacuna, la capacidad del sistema es el porcentaje de la población que aún no ha enfermado. Cuantas menos personas sanas quedan, menos contagios se producen (el sistema se autolimita). El crecimiento puramente exponencial sólo se da en la primera etapa de una epidemia, después se va ralentizando. La curva que describe el número total de personas afectadas es una función sigmoidea (Figura 2).

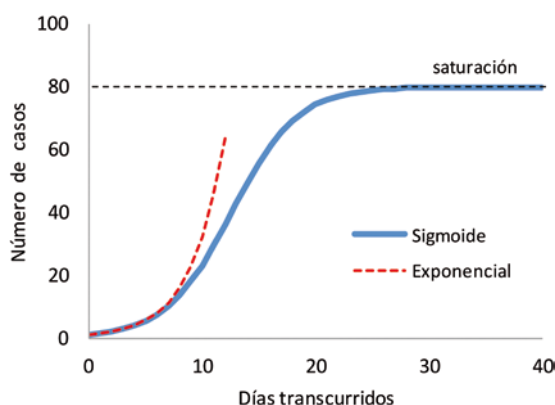


Fig. 2. Curva logística para una población total de 100 individuos con 20 vacunados. La curva satura en 80 casos. Se muestra también el comportamiento puramente exponencial.

3. El número reproductivo

Tasas de contagio y de retirada

- **Tasa de infección** o de contagio, a . Es el número medio de individuos contagiados por otro individuo ya infectado, por unidad de tiempo, en una población totalmente susceptible. Depende de la infectividad del virus, del número medio de contactos interpersonales y de las medidas higiénicas en una determinada población.
- **Tasa efectiva de infección**. Es la tasa de infección multiplicada por la proporción de individuos susceptibles respecto a la población total: aS/N . Da cuenta de que la probabilidad de contagio se reduce a medida que quedan menos individuos susceptibles en el entorno.
- **Periodo infeccioso**, τ . Es el tiempo medio durante el cual un infectado puede contagiar a otros. Tras este periodo, el infeccioso deja de ser activo porque queda en cuarentena, se ha curado o ha fallecido. Si este periodo es muy largo la epidemia crecerá más fuerte, porque una misma persona seguirá transmitiendo la infección durante más tiempo.
- **Tasa de retirada**, b . Es la inversa del periodo infeccioso: $b = 1/\tau$.

Supongamos una población de 100 personas de las cuales 50 están inicialmente infectadas y 50 sanas (susceptibles), y que la tasa de infección es $a = 0,4$ personas/día. Tomamos variables discretas por simplicidad en este ejemplo. Así, los 50 infectados transmiten la enfermedad a 10 nuevos ese día. Por otro lado, supongamos que las personas que han enfermado son infecciosas durante un promedio de 10 días. La tasa de retirada será $b = 1/10 = 0,1$ personas/día y, así, de los 50 infecciosos abandonarán el grupo 5 individuos ese día. Al día siguiente habrá 55 infectados activos y 40 sanos (Figura 3).

El grupo de personas infecciosas por un lado crece y por otro decrece. Entonces, la tasa de crecimiento durante la fase exponencial es igual a la tasa efectiva de infección menos la tasa de retirada: $\lambda = aS/N - b$. Si la tasa de retirada es mayor que la de infección, el crecimiento será negativo y la epidemia se extinguirá.

Estas definiciones ayudan a entender la tasa de crecimiento como un balance de factores. Por

ejemplo, en el crecimiento demográfico juegan a favor los nacimientos y la inmigración; y juegan en contra los fallecimientos y la emigración. Ocurre algo similar con el efecto de los zorros sobre una población de conejos, cuyo crecimiento se frena por la saturación de recursos y por la depredación. En una epidemia juegan a su favor la capacidad infectiva del virus y el contacto humano; y juegan en su contra la vacunación, la detección rápida de enfermos con su consiguiente cuarentena y el distanciamiento social. Este balance entre ganancias y pérdidas nos lleva a definir el número reproductivo.

El número reproductivo

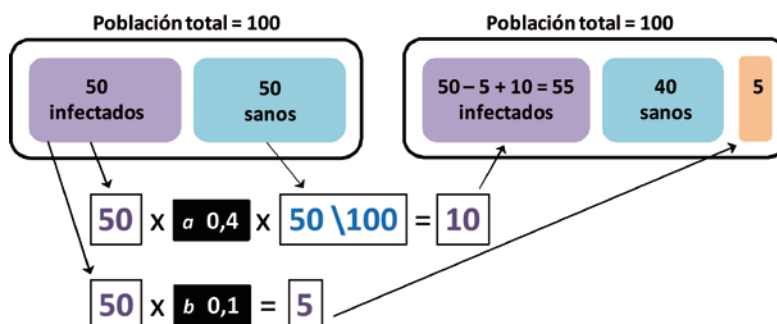
El **número reproductivo básico**, r_0 , se define como el número medio de infecciones generadas por un único individuo infectado, durante el período infeccioso de dicho individuo, introducido en una población totalmente susceptible. Matemáticamente es el cociente entre la tasa de infección y la tasa de retirada:

$$r_0 = \frac{a}{b} = a\tau \quad (8)$$

Dicho de otro modo, r_0 indica cuántas personas son contagiadas en total por una persona infectada. Por ejemplo, el sarampión es altamente contagioso y tiene un valor de r_0 en torno a 15. En la viruela r_0 es aproximadamente 6, y en la gripe 1,5. Para el nuevo coronavirus $r_0 \approx 2,5$, aunque en algunos países ha alcanzado valores de 4 o más [2].

En general, cuando la epidemia ya ha avanzado y el número S de personas susceptibles es menor

Fig. 3. Esquema de cómo el grupo de infecciosos activos de una población aumenta con la tasa de infección y disminuye con la tasa de retirada. Para ilustrar mejor el ejemplo, hemos utilizado variables discretas con incremento temporal de un día.



que el total N , o bien cuando hay un porcentaje de la población vacunada, se define el *número reproductivo efectivo*, r , como

$$r = \frac{S}{N} r_0 \quad (9)$$

El número reproductivo establece un umbral a partir del cual no puede crecer la epidemia:

- $r > 1$, la infección se propaga (hay epidemia).
- $r = 1$, el número de infectados activos se mantiene constante (enfermedad endémica).
- $r < 1$, la infección no puede extenderse y decrece.

Un método manual para entender el número reproductivo

Supongamos una epidemia (epidemia A) en que:

- Cada infectado contagia en promedio a una persona cada día.
- Se tardan dos días en detectar y aislar a un infectado mientras es contagioso.
- Estamos en los primeros días de la epidemia (fase exponencial), cuando las personas susceptibles son prácticamente la totalidad de la población.

Como cada persona infectada contagia a una persona al día durante dos días, el número reproductivo es $r_0 = 2$.

La Figura 4 muestra esquemáticamente la progresión de la epidemia. Los contagios se indican con las fechas. Los números en rojo son los nuevos contagios cada día. Partimos del día 0 con un solo infectado. Este paciente 0 contagia a una persona el día 1 y a otra persona el día 2, pero el día 3 es aislado y deja de contagiar. El que fue infectado el día 1 contagiará a una persona el día 2 y a otra el día 3. Por eso, el día 2 ya habrá dos nuevos infectados. Etcétera.

En la epidemia B, la tasa de contagio es 2 días⁻¹ y el periodo infeccioso es de 3 días. Esta epidemia es mucho más fuerte que la otra. Tiene número reproductivo $r_0 = 6$, porque cada persona contagia en total a seis personas.

4. Modelo epidemiológico SIR: Susceptibles-Infectados-Recuperados

El modelo SIR es un modelo matemático relativamente sencillo, desarrollado por Kermack y McKendrick en la primera mitad del siglo pasado [3, 4]. Es un modelo muy útil que pone de manifiesto aspectos importantes de la dinámica de las enfermedades de transmisión. SIR es un acrónimo formado por las siglas de las palabras Susceptibles, Infectados y Recuperados. El modelo SIR divide a la población en tres subconjuntos o compartimentos:

- **Susceptibles:** Los individuos que pueden contagiarse. Este grupo, al principio de una epidemia, suele ser el total de la población (a no ser que haya personas previamente vacunadas).
- **Infectados:** Los individuos infectados que pueden contagiar a otros mientras no se curan, o mientras no se les detecta la enfermedad y se les aísla. Al pasar a este grupo dejan de estar en el grupo de susceptibles.
- **Recuperados:** Este grupo está formado por los enfermos detectados que pasan a aislamiento, los recuperados inmunizados y los fallecidos. Estos individuos pasan a este grupo provenientes del grupo de infectados. En ocasiones, este grupo también recibe el nombre de *removidos*.

Ecuaciones y curvas del modelo SIR

Si llamamos S , I y R al número de individuos de cada grupo, y N es la población total ($S + I + R = N$), la dinámica de la epidemia está descrita por las ecuaciones diferenciales

$$\begin{aligned} \frac{dI}{dt} &= a I \frac{S}{N} - b I \\ \frac{dR}{dt} &= b I \\ \frac{dS}{dt} &= -a I \frac{S}{N} \end{aligned} \quad (10)$$

La Figura 5 muestra un ejemplo con la evolución de las curvas de los tres grupos obtenidas con el modelo SIR para el número reproductivo medio,

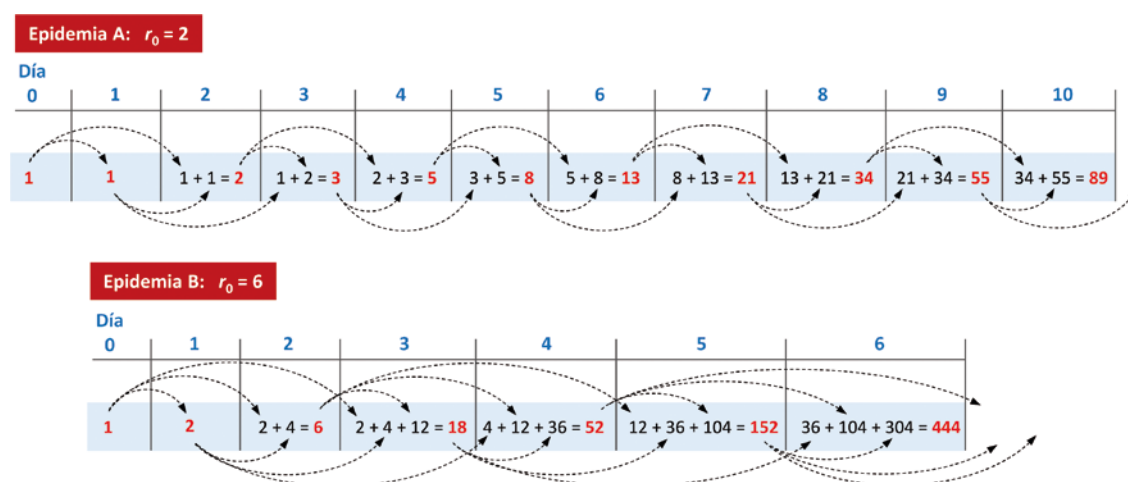


Fig. 4. Epidemia A: $r_0 = 2$ ($a = 1$ días⁻¹, $\tau = 2$ días). Epidemia B: $r_0 = 6$ ($a = 2$ días⁻¹, $\tau = 3$ días).

$r_0 = 2,5$, que tuvo la epidemia en España. La curva del grupo R da cuenta de los casos totales de enfermos afectados.

¿Cuándo surge la epidemia? Pico y tamaño de la epidemia

Si al inicio, cuando surge un brote de infectados, hay una población S_0 de susceptibles, se desprende de la Ec. 10 que comenzará una epidemia si $dI/dt > 0$:

$$\left. \frac{dI}{dt} \right|_0 > 0 \rightarrow a \frac{S_0}{N} > b \rightarrow r_0 > \frac{N}{S_0} \quad (11)$$

(si $r_0 > 1$, en el caso en que $S_0 = N$).

Conforme avanza la epidemia, disminuye la población de susceptibles y el número reproductivo efectivo, $r = r_0 S/N$, se hace cada vez menor hasta que se alcanza un máximo en la población de infectados. Este es el *pico* de la curva, y ocurre cuando

$$\frac{dI}{dt} = 0 \rightarrow \frac{S}{N} = \frac{1}{r_0} \quad (12)$$

Combinando las ecuaciones del modelo SIR e integrando, se obtiene una relación entre las poblaciones de susceptibles e infectados [5]:

$$\frac{I}{N} = 1 - \frac{S}{N} + \frac{1}{r_0} \ln \frac{S}{S_0} \quad (13)$$

Así, el pico de incidencia I_{\max} es

$$\frac{I_{\max}}{N} = 1 - \frac{1 + \ln(r_0 S_0/N)}{r_0} \quad (14)$$

Tras pasar el pico, el número de infectados disminuye progresivamente ($dI/dt < 0$).

En las curvas de la Figura 5 se comprueba que el pico de infectados es el 23 % de la población (Ec. 14) y ocurre cuando la población susceptible es el 40 % (Ec. 12).

Curva de nuevos casos: incidencia

Con el modelo SIR también podemos obtener la *incidencia*, es decir, la curva nuevos casos diarios, a partir de la variación de la población del grupo R entre dos días consecutivos. La Figura 6 muestra esta curva para tres grados de intensidad de una epidemia. El área de las curvas es igual al número total de casos al final de la epidemia (valor asintótico de R).

Si r_0 es grande, el pico de incidencia es abrupto y llega antes. La epidemia es más intensa. Por ello, en esta situación hay menos tiempo para gestionar la crisis y adoptar medidas. Para números reproductivos menores las curvas de incidencia son más planas, aunque eso no significa que la epidemia afecte a menos casos (de hecho, en los ejemplos de la Figura 6 el número final de afectados es similar). Si una enfermedad tiene una mortalidad alta, como la COVID-19, no basta con que la curva sea de por sí más o menos plana, sino que hay que tomar medidas especiales de control.

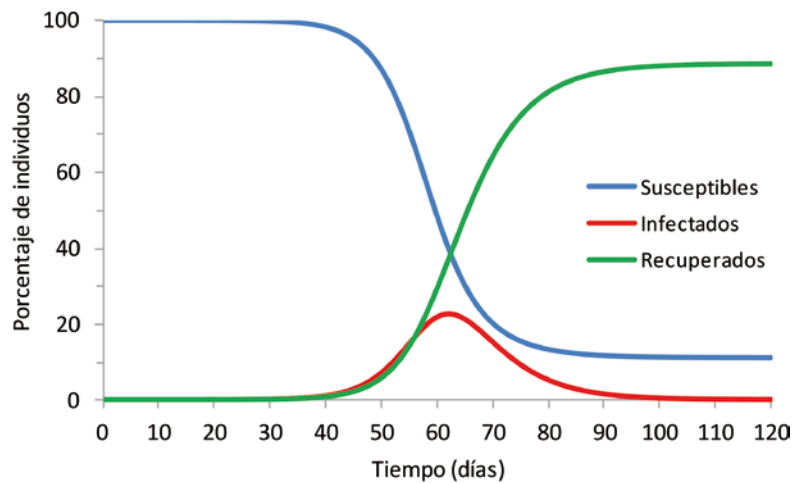


Fig. 5. Curvas del modelo SIR para $r_0 = 2,5$ y $S_0 = N$.

5. Control de una epidemia

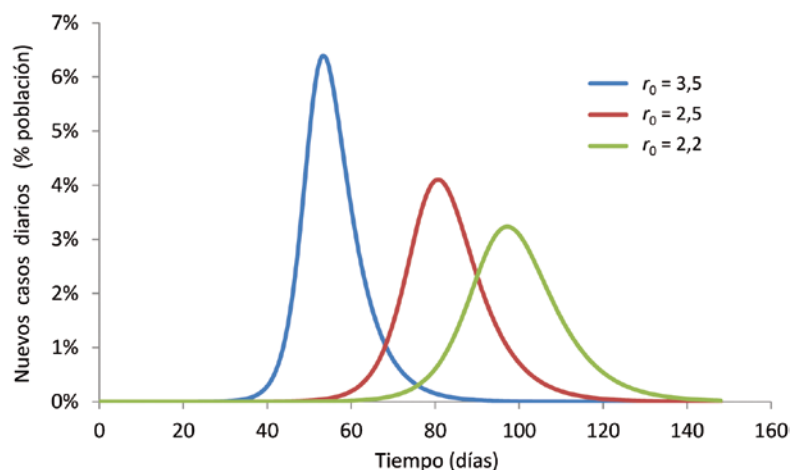
Una cuestión probabilística. Infectividad y exposición a un virus

El contagio por un virus es una cuestión de probabilidad, que depende de las características del virus y del grado de exposición. La *infectividad* es la capacidad de un patógeno para provocar una infección. Si el virus es altamente contagioso pero todas las personas están aisladas, no habrá contagios. Por contra, aunque el virus tenga poca infectividad, el número de contagios será grande si las personas interactúan mucho. La infectividad de un virus viene dada, y no cambia a no ser que se aplique una vacuna, que la población se vaya inmunizando o que determinadas condiciones ambientales (como la temperatura) debiliten al virus. Dejando aparte esas posibilidades, lo que podemos cambiar es nuestro grado de exposición al virus.

El combustible y el motor de la epidemia

Según hemos explicado, el número de nuevos contagios es proporcional a dos cantidades: 1) el número de personas infecciosas, y 2) el número de personas restantes susceptibles de contagio. Así, una epidemia se “alimenta” de las personas

Fig. 6. Simulación de las curvas de nuevos casos diarios para tres números reproductivos dentro del rango de la epidemia de COVID-19 en España si no se hubieran adoptado medidas de confinamiento.



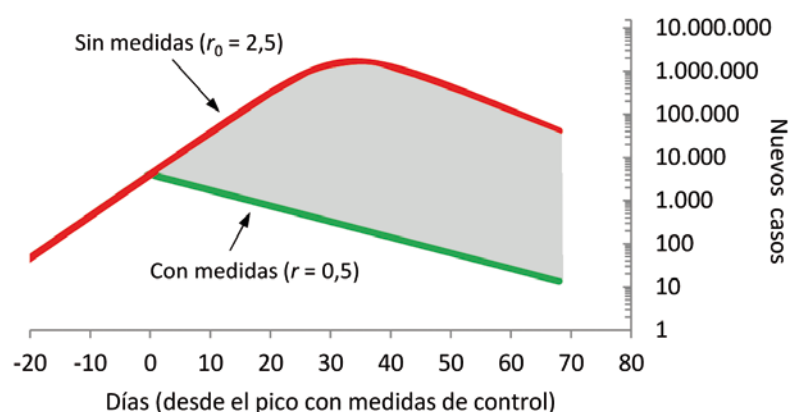


Fig. 7. En rojo: curva de nuevos casos según la tendencia inicial de la epidemia en España. En verde: curva para un número reproductivo de 0,5 tras las medidas de supresión.

que todavía quedan sanas (no aisladas ni vacunadas), que serían como el combustible. Mientras que el motor de la epidemia serían las personas infecciosas activas y la cantidad de contactos que realizan. De forma similar, un incendio sigue avanzando mientras queda bosque por quemar y tanto más rápido avanza cuanto más frentes activos hay. Por tanto, para controlar una epidemia hay que intentar sacar personas infectadas del sistema y reducir la exposición, es decir, limitar la potencia del motor y quitar combustible.

Medidas de control sobre una base científica

El número reproductivo es considerado por los epidemiólogos como uno de los parámetros decisivos para determinar si una epidemia puede ser controlada [6]. A partir de su expresión matemática (Ecs. 8-9) concluimos que podemos actuar sobre tres factores, de la siguiente manera:

1. Disminuyendo el período de infección. Esto puede lograrse mediante el rastreo eficaz de enfermos y el aumento de pruebas diagnósticas, lo que ayudará a la detección precoz de los infectados y a su inmediato aislamiento.
2. Confinamiento, distanciamiento social e higiene. Estas medidas reducirán la tasa de infección.
3. Reducción del número de personas susceptibles, por ejemplo mediante la vacunación de la población (cuando exista una vacuna) o mediante el aislamiento total de regiones donde aún no ha entrado el virus.

La estrategia óptima será la combinación de todas las anteriores, para así actuar tanto en el numerador como en el denominador del número reproductivo.

Mitigación. Inmunidad de grupo (herd immunity)

Si las personas que han pasado la enfermedad quedaran inmunizadas, entonces el grupo de susceptibles en la población sería cada vez menor y el crecimiento de la epidemia se autolimitaría según hemos dicho antes. Las propias personas inmunes harían de cortafuegos (lo mismo que si estuvieran vacunados desde el principio). Se habla así de *inmunidad de grupo*. Si se introducen

medidas de control suaves, se puede reducir un poco el número reproductivo aunque su valor siga por encima de la unidad, lográndose así aplanar la curva de contagios (Figura 6), de forma que el sistema sanitario no colapsase. A esta estrategia se le llama *mitigación*. La población afectada es grande pero los contagios ocurren más lentamente. Sin embargo, si la mortalidad es alta esta estrategia es inviable.

Supresión

Las medidas de *supresión* son más fuertes que las de mitigación, con el objetivo de reducir el número reproductivo por debajo de 1. En la Figura 7 se muestra la curva de incidencia según la tendencia inicial de la epidemia en España, sin haber adoptado medidas, y la curva en el caso muy favorable de reducir el número reproductivo a 0,5 tras adoptar medidas de supresión. El área gris entre ambas curvas representa el número de personas que ya no enfermarían por el hecho de adoptar las medidas. Con todo, incluso en este escenario deseable, la magnitud de la epidemia es enorme. Aunque el número de casos sea decreciente, los contagios no cesan de inmediato, y durante bastante tiempo siguen acumulándose casos en la curva de casos totales.

Estrategias en distintos países

En Corea del Sur se realizaron pruebas de forma masiva que permitieron aislar cuanto antes a los enfermos.

China utilizó una estrategia combinada, con confinamiento y restricción de movimientos, además del uso de datos para encontrar cada foco y rastrear enfermos.

Reino Unido optó en primera instancia por la inmunidad de grupo: protección sólo de las personas más vulnerables y autolimitación de la expansión del virus para el resto de personas (que irían enfermando e inmunizándose). En una fase posterior tuvo que adoptar medidas intermedias de confinamiento.

En España las medidas de contención se han basado en un confinamiento fuerte, salvo para actividades esenciales y urgencias. En una segunda etapa se aumentaron los test diagnósticos.

Portugal actuó con mucha antelación.

En Italia las medidas fueron similares a las de España.

Se puede actuar sólo con medidas de confinamiento, que sirven para reducir la tasa de contagio (España e Italia). También se puede reducir el período de infección, aumentando la tasa con que se retiran enfermos del sistema (Corea del Sur). De las dos maneras se reduce el número reproductivo y se frena el crecimiento de una epidemia. Pero la estrategia más efectiva es actuar sobre los dos factores a la vez, disminuyendo ambos simultáneamente (China).

Cuando exista una vacuna, la vacunación disminuirá el número de personas susceptibles y será más difícil que rebrote la epidemia.

Problemas, incertidumbres y evidencias

Uno de los hándicaps frente a una epidemia es que no sabemos en tiempo real cuál es el número de personas infectadas que están contagiando a otras. Este número sólo da la cara días después. En ocasiones ni siquiera eso, pues pueden existir personas asintomáticas que transmiten la enfermedad ("infectados invisibles"). Por eso siempre hay un riesgo de infravalorar la epidemia. Los casos detectados podrían ser la punta del iceberg.

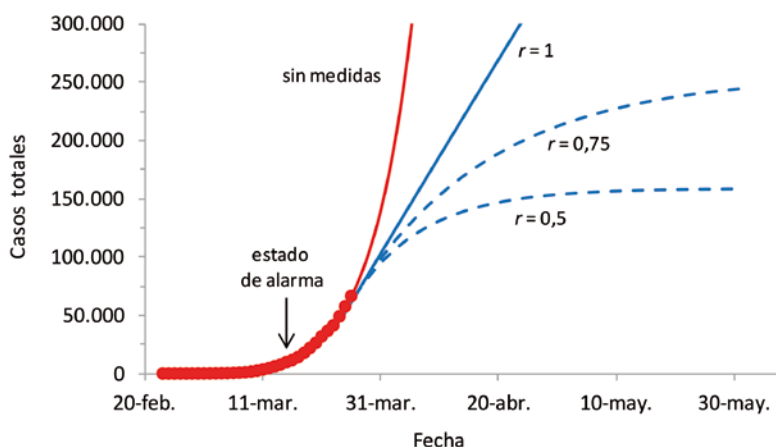
Otro factor de incertidumbre es el período de incubación del virus, que hace que exista un tiempo de latencia durante el cual las personas contagiadas todavía no han empezado a transmitir la enfermedad, pero permanecen como infecciosos latentes. También ocurre que muchos enfermos son contagiosos incluso antes de presentar síntomas. Por eso, desde que se aplican medidas de control, o desde que éstas se relajan, hasta que se observan los efectos en las curvas epidémicas transcurre un período largo de tiempo, que puede ser de hasta dos semanas.

¿Cuándo actuar? Desde el punto de vista matemático (sin otros condicionantes), la respuesta es clara: se debe actuar tan pronto se detecta la enfermedad y con todas las medidas posibles. Conocer la evolución de la epidemia en otros países en los que el brote surgió antes ayudará a anticipar mejor la epidemia y a adoptar las medidas adecuadas. Por ejemplo, la epidemia en España iba retrasada unos seis días respecto a la de Italia durante la primera quincena de marzo, con una progresión muy similar. Cuando en España se declaró el estado de alarma ya había el mismo número de casos que cuando Italia adoptó las medidas una semana antes (Figura 10).

6. La evolución de la epidemia de coronavirus en España

Fase exponencial y posibles escenarios tras el estado de alarma

El número reproductivo de la epidemia en España estuvo en un rango de 2 a 3,5 con un valor medio de 2,5 desde el inicio del brote hasta que se adoptaron las medidas de contención. El 27 de febrero se superaron los 10 casos confirmados, el 2 de marzo los 100 casos, y el 8 de marzo los 1.000 casos. El estado de alarma se declaró el 14 de marzo con unos 7.000 casos. Con el modelo SIR realizamos el 25 de marzo simulaciones de la progresión de la epidemia en distintos escenarios dependiendo de la efectividad que pudiera tener el confinamiento. A priori es muy difícil estimar cuánto se reducirán los contagios, pero se puede contemplar una horquilla razonable con efectividades entre el 60 % y el 80 %. De forma naïf, esto podría corresponder a estas situaciones:



- Escenario A: 1/3 de la población en aislamiento total, 1/3 aislada al 50 %, y 1/3 aislada al 30 %.
- Escenario B: 1/3 en aislamiento total, 1/3 al 70 %, y 1/3 al 40 %.
- Escenario C: 1/3 en aislamiento total, 1/3 al 80 %, y 1/3 al 60 %.

Los números reproductivos en estos tres escenarios valdrían 1 (escenario A, el más desfavorable), 0,75 (escenario B) y 0,5 (escenario C, el más favorable).

Las simulaciones de las curvas de casos totales para estos tres escenarios se muestran en la Figura 8. La curva roja corresponde a la evolución exponencial de la epidemia con la tendencia antes de las medidas de control. Sólo si el número reproductivo baja por debajo de 1 la epidemia empieza a decrecer. La efectividad media del escenario B (con $r = 0,75$) equivale a la situación que se dio en China durante la aplicación de la cuarentena [7].

Evolución de la incidencia y de la curva de casos totales

La Figura 9 muestra la evolución de los nuevos casos confirmados de COVID-19 detectados en España (tanto por pruebas PCR como de anticuerpos) desde el inicio de la epidemia. Y la Figura 10 muestra la curva de casos totales en España e Italia, y la predicción con el modelo SIR en España.

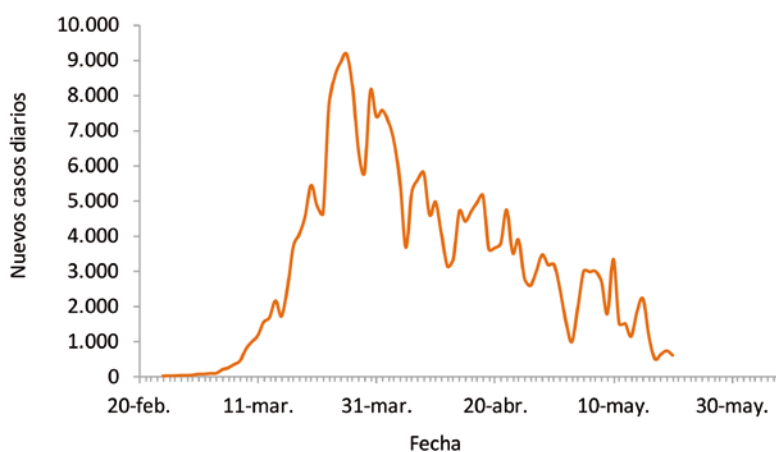


Fig. 8. Simulación con el modelo SIR de la progresión de la epidemia en varios escenarios tras el estado de alarma.

Fig. 9. Evolución de la incidencia (nuevos casos diarios) de la epidemia en España.

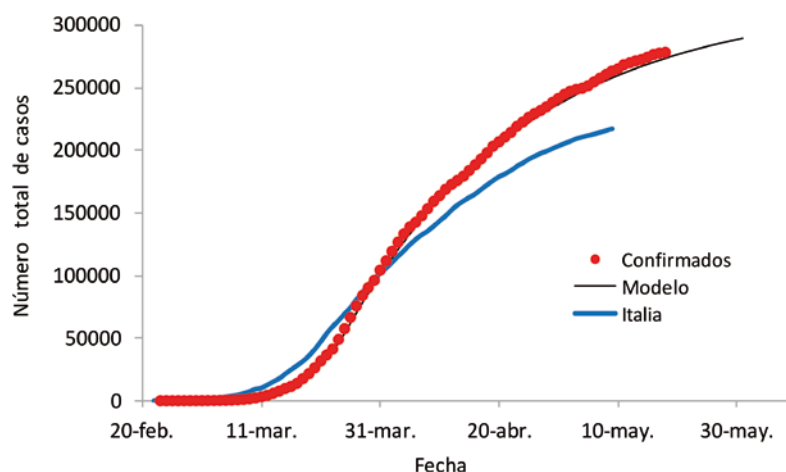


Fig. 10. Curva de casos totales de COVID-19 confirmados en España (mediante test PCR y de anticuerpos) [1], y predicción con el modelo SIR. También se muestra la curva de Italia.

El pico de incidencia se produjo el 27 de marzo, casi dos semanas después de la declaración del estado de alarma. A partir de esa fecha, el número de nuevos casos diarios fue disminuyendo con una tasa de crecimiento exponencial negativa y un número reproductivo de aproximadamente 0,8. La efectividad del confinamiento se ha situado algo por encima del escenario B indicado antes y, a finales de mayo, la epidemia ha quedado prácticamente estabilizada. Sin embargo, a partir de la relajación de las medidas de confinamiento, el número reproductivo puede volver a crecer y producirse un rebrote.

Agradecimientos

El autor agradece al Instituto de Salud Carlos III la financiación a través del Fondo-COVID19 (proyecto COV20/00736), y a J. A. Manzanares (Universitat de València) y M. A. F. Sanjuán (Universidad Rey Juan Carlos) por sus comentarios críticos del artículo.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Sanidad, Gobierno de España: <https://cnecovid.isciii.es/covid19/>.
- [2] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO): <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/>.
- [3] W. O. KERMACK y A. G. MCKENDRICK, "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics", *Proceedings of the Royal Society of London A* 115 (1927), 700-721.
- [4] F. BRAUER, C. CASTILLO-CHÁVEZ, D. P. ELMER *et al.*, "Modelos de la Propagación de Enfermedades Infecciosas", Universidad Autónoma de Occidente (2015). DOI: 10.13140/2.1.4882.5929.
- [5] S. GALINDO URIBARRI, M. A. RODRÍGUEZ MEZA y J. L. CERVANTES COTA, "Las matemáticas de las epidemias: caso México 2009 y otros", *Ciencia ergo-sum UAEMex* (nov2013-feb2014) 20:3, 238-246.
- [6] B. RIDENHOUR, J. M. KOWALIK y D. K. SHAY, "Unraveling R0: Considerations for Public Health Applications", *American Journal of Public Health* 104 (2014), 32-41.
- [7] Q. LIN, S. ZHAO, D. GAO *et al.*, "A Conceptual Model for the Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) Outbreak in Wuhan, China with Individual Reaction and Governmental Action", *International Journal of Infectious Diseases* 93 (2020), 211-216.

Antonio Guirao Piñera
Dpto. de Física, Universidad de
Murcia



II Latin American Strategy Forum for Research Infrastructure: an Open Symposium for HECAP

July 6-10, 2020 (by videoconference)

ICTP-SAIFR, São Paulo, Brazil

<https://www.ictp-saifr.org/lasf4ri2020/>

Muerte por materia oscura

María Luisa Sarsa Sarsa

La materia oscura representa el 27 % de la energía total del Universo y el 84 % de su masa. La Física de Partículas, la Cosmología y la Astrofísica afrontan la comprensión de su naturaleza, desconocida hasta la fecha. ¿Podría ser peligrosa?

El objetivo de la Física es comprender el universo que nos rodea, tanto los objetos que se observan a las distancias más lejanas, como los constituyentes elementales de la materia. Desde hace casi 100 años sabemos que no podemos explicar el universo con las formas de materia que conocemos. Se requiere una misteriosa materia “oscura”, cuya investigación es todo un reto en la frontera de la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología.

El universo invisible

El universo que vemos con nuestros ojos es una parte muy pequeña del universo que hay ahí afuera, sólo la que emite en el rango de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nanómetros. Sin embargo, hemos construido instrumentos mucho más sensibles que nuestro ojo, capaces de formar imágenes, aunque sea en colores falsos, utilizando desde las largas ondas de radio hasta las cortas ondas gamma. Además, hemos aprendido a ver el universo de otras formas, con los ojos de otras interacciones diferentes de la electromagnética. Si miramos, por ejemplo, hacia el Sol, podemos verlo con alta resolución en el UV gracias a las cámaras CCD instaladas en el satélite SDO [1], pero también hemos sido capaces de detectar su emisión en neutrinos. Los neutrinos se producen en reacciones termonucleares de fusión en el núcleo del Sol y su observación fue la confirmación de que nuestro modelo de producción de energía en las estrellas es correcto. El Sol es prácticamente transparente para los neutrinos, que, por eso, llegan a la Tierra sólo 8 minutos después de su producción, a diferencia de los fotones, que tardan decenas de miles de años en transportar la energía del núcleo del Sol a su superficie: la fotosfera es precisamente la frontera a partir de la cual los fotones los fotones se pueden propagar con libertad y abandonando por fin el Sol, dirigirse hacia los confines del universo. La imagen del Sol que construimos con los neutrinos es, por lo tanto, esencialmente diferente de la foto que registramos en fotones: en un caso vemos el núcleo del sol, en el otro la fotosfera; en un caso trazamos las reacciones nucleares de forma casi instantánea, mientras que en el otro observamos el resultado de los complicados procesos de difusión que llevan la energía producida en el núcleo hasta el exterior de la estrella. Imágenes diferentes del mismo objeto nos

aportan información complementaria. Y por supuesto, ha sido preciso desarrollar instrumentos diferentes: la neutrinoografía del Sol se tomó con un tanque lleno de 50 000 toneladas de agua radiopura, enterrado en la mina Mozumi en Japón, el detector Super-Kamiokande [2].

El Sol también lo podemos ver por sus efectos gravitatorios, responsables de la dinámica de todos los cuerpos que constituyen el sistema solar. Algunos, como los planetas, giran en órbitas estables, elípticas y de baja excentricidad, totalmente dominados por la atracción del astro rey. Otros, como los cometas, siguen trayectorias muy excéntricas, que apuntan a que su origen se encuentra en las afueras del sistema solar, en la nube de Oort. Tan lejos del Sol, los objetos están muy débilmente ligados y cualquier pequeña inestabilidad gravitatoria puede precipitarlos hacia el interior del sistema solar.

Si nos fijamos en los planetas, la curva que representa sus velocidades de rotación en función de su distancia al Sol es como una foto gravitatoria del sistema solar: no sólo nos muestra que el Sol está ahí, y que, aunque fuera invisible a nuestros ojos, su presencia sería indiscutible, sino que además nos dice cuál es su masa con una gran precisión. Esta foto gravitatoria del sistema solar es consistente con las fotos electromagnética y nuclear, lo que indica que nuestro modelo solar funciona y que las reglas de la Física que aplicamos en su estudio lo describen bien en todas sus facetas.

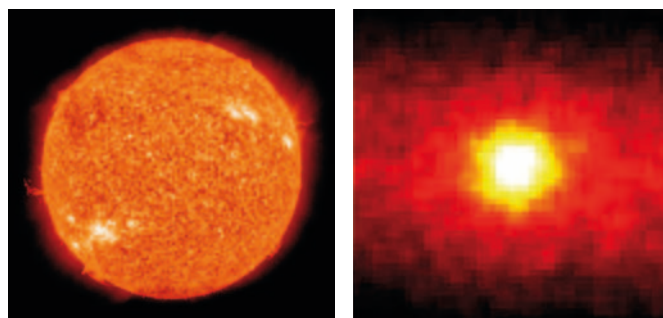


Fig. 1. a) Fotografía del Sol en el rango ultravioleta tomada con el instrumento Atmospheric Imaging Assembly del satélite SDO de la NASA (Solar Dynamics Observatory) [1]. (Crédito: NASA). **b)** Neutrinoografía del Sol tomada con el detector Super-Kamiokande [2] en la mina Mozumi, Japón. (Crédito: R. Svoboda for the Super-Kamiokande Collaboration).

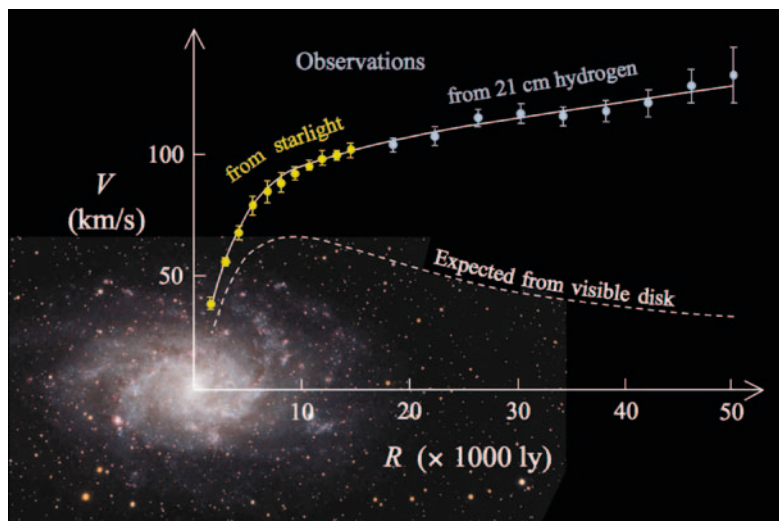


Fig. 2. Curva de rotación de la galaxia M33 comparada con la predicha a partir de la distribución de materia visible [5].

Fig. 3. Imagen compuesta del “Bullet cluster”: en rosa se muestra la emisión del gas caliente en rayos X, tomada con el telescopio Chandra, en azul se ha representado la distribución de masa del cúmulo que se deriva del análisis del efecto de lente gravitatoria, ambas se superponen a la imagen en el visible, tomada con el Magellan and Hubble Space Telescope. (Crédito: NASA).

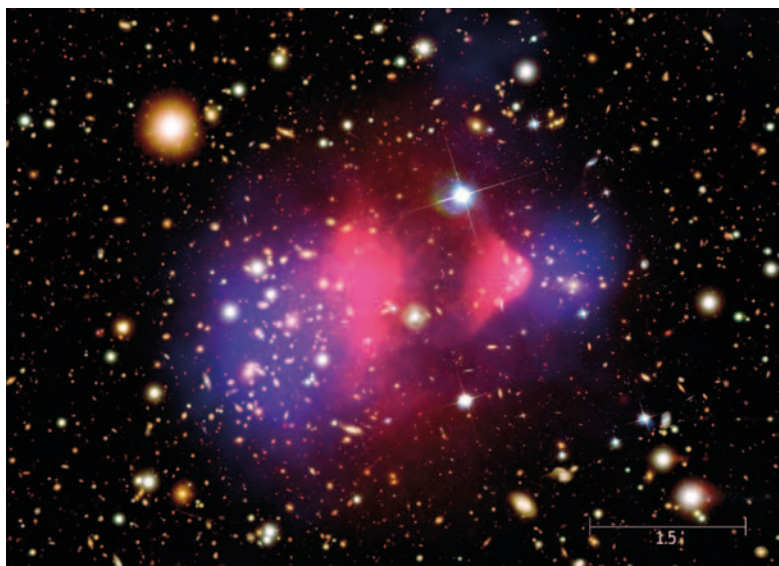
Sin embargo, si miramos las galaxias espirales del mismo modo, las curvas de rotación de sus estrellas y nubes de gas y polvo, medidas por Vera Rubin y Kent Ford en el visible [3] y por Albert Bosma en radio [4], no muestran el mismo comportamiento. Las velocidades de rotación de los objetos que medimos en los brazos de las galaxias espirales crecen o se mantienen constantes hasta distancias muy superiores al radio de la galaxia visible. Sin embargo, al alejarnos suficientemente de la distribución de masa dominante las velocidades de rotación deberían disminuir con la raíz cuadrada de la distancia al centro de la distribución. El hecho de que en este caso las fotos gravitatoria y electromagnética no coincidan se resume diciendo que las galaxias no tienen suficiente masa visible para explicar su comportamiento dinámico.

El problema de la materia invisible en el universo ya se había planteado con anterioridad. Observando el cúmulo de Coma en los años treinta, Fritz Zwicky había observado que las altas velocidades que medía para las galaxias debían corresponder-

se con una masa total del cúmulo muy superior a la inferida a partir de su luminosidad [6]. El teorema del virial que aplicó, suponiendo que los cúmulos son estructuras estables, gravitatoriamente ligadas, asocia los valores medios de la energía potencial gravitatoria con el doble de la energía cinética. Hacía falta materia invisible, y mucha, para hacer estables los cúmulos de galaxias. Estos argumentos se han visto después reforzados por las medidas de la masa de muchos cúmulos derivadas del análisis del efecto de lente gravitatoria que producen en la luz de galaxias más lejanas, desviada por la distribución de masa interpuesta. La masa requerida para producir estos efectos es muy superior a la observada en forma de galaxias y gas caliente y, además, la distribución espacial de la masa total y el gas caliente no siempre coincide, en particular no lo hace en aquellos casos en los que el cúmulo ha experimentado procesos de colisión, como sucede en el “Bullet cluster” [7]. Este hecho indica que la materia que domina en la distribución de masa de los cúmulos, además de ser invisible, interacciona mucho más débilmente que la materia convencional.

El universo primitivo

A lo largo del siglo xx y en lo que llevamos del xxi, en nuestro esfuerzo por comprender el universo y la materia hemos mirado hacia lo más lejano y lo más grande, pero también hacia lo más pequeño. Aunque parezca que miramos en sentidos opuestos, realmente estamos viendo lo mismo, ya que al mirar lejos vemos el pasado del universo. Nos llega luz de galaxias que fue emitida hace 13 mil millones de años, cuando el universo era mucho más pequeño y caliente. Podemos ver hacia atrás, hasta la llamada “primera luz”, la primera foto del universo que podemos tomar con radiación electromagnética: la radiación cósmica de fondo de microondas. Corresponde a un universo de solo 380 000 años de edad. El universo era una sopa de partículas cargadas, un plasma, en el que los fotones eran continuamente absorbidos y reemitidos, tan rápido que no se podían mover con libertad. Cuando la temperatura bajó de 3 000 K, los núcleos positivos se recombinaron con los electrones negativos y formaron átomos neutros. De repente el universo pasó a ser transparente para los fotones, que sin tener con quien interactuar desde entonces, siguen propagándose por el universo, enfriándose conforme este se ha ido expandiendo. Esos fotones “fósiles” o reliquia del pasado del universo son los que vemos en la foto: en la actualidad les corresponde una temperatura media de 2,7 K y muestran un espectro perfecto de cuerpo negro. Las fluctuaciones en su temperatura al observar distintas regiones de la esfera celeste son de solamente una parte en 10 000 y su observación ha permitido que la cosmología se convierta en una ciencia



de precisión. No cualquier modelo cosmológico es capaz de reproducir cuantitativamente la estructura que nos muestra esta foto. Estas fluctuaciones en la temperatura de los fotones se corresponden con las de la densidad de materia en ese momento, que amplificadas por la gravedad permitieron después la formación de las galaxias y los cúmulos de galaxias que observamos en el universo actual.

Pero sabemos mucho más del universo, también de la época de la que no nos puede llegar ninguna luz. Su composición actual (75 % de hidrógeno, 24 % de helio y 1 % del resto de elementos) es resultado de procesos nucleares bien conocidos que dieron lugar a la formación de los núcleos ligeros en los tres primeros minutos de la historia del universo. Los cálculos de la nucleosíntesis primordial predicen con mucha precisión la cantidad de protones y neutrones que tuvo que tener en esa época el universo para reproducir las abundancias observadas de los núcleos ligeros: en ningún caso son suficientes para explicar la materia que nos falta en los cúmulos y en las galaxias. Este argumento, totalmente independiente de los anteriores, apoya que la materia invisible, además, es cualitativamente diferente de la materia que conocemos, es no bariónica.

El modelo de universo Λ CDM

Hemos ido componiendo una foto sorprendente del universo, combinando información de todas las épocas de su evolución, escalas de distancias, y obtenida con técnicas muy diferentes. Tenemos un modelo cosmológico en el que todas estas observaciones encajan de una forma satisfactoria: el modelo Λ CDM. Bueno, de manera satisfactoria si consideramos que un 68 % del universo (Ω_Λ) está en forma de una energía desconocida, la energía oscura, y el resto, en forma de materia (Ω_m), se reparte en un 27 % de materia desconocida e invisible, a la que me referiré a partir de aquí como materia oscura, y nada más que un 5 % de materia bariónica ordinaria.

Aunque la concordancia de tantos indicios en el marco del modelo se ha visto como una de sus fortalezas, no tenemos que olvidar que cualquier teoría o modelo es siempre provisional, todos los nuevos datos que se vayan recabando deben estar de acuerdo con sus predicciones para que su validez se mantenga. Por eso, es importante recordar situaciones similares afrontadas en el pasado. Urano mostraba un comportamiento anómalo en su órbita que permitió descubrir Neptuno, invisible para los instrumentos de la época hasta que se supo dónde mirar. Hasta entonces Neptuno había sido materia invisible, pero sus efectos dinámicos sobre otro objeto visible lo pusieron en evidencia. Algún tiempo después, la anomalía en la precesión del perihelio de la órbita de Mercurio, sin embargo, fue explicada de forma distinta: hizo falta

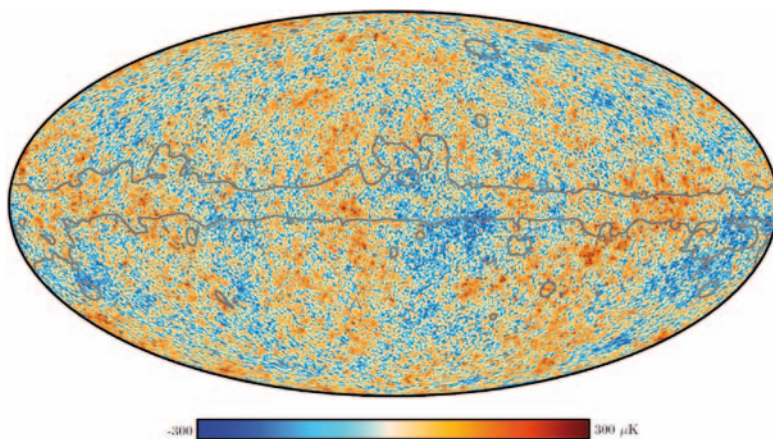


Fig. 4. El mapa de fluctuaciones en la temperatura de la radiación cósmica de fondo de microondas medido por los instrumentos de la misión Planck [8] de la ESA, 2018. (Crédito: ESA and the Planck Collaboration).

que Albert Einstein introdujera una nueva teoría de la gravitación, la Relatividad General, para resolver el problema. Hoy en día no sabemos cómo se resolverá el problema de la materia y energía oscuras, y por eso la ciencia debe investigar las dos opciones: nuevas leyes para el mundo físico, y por lo tanto un nuevo marco cosmológico en el que interpretar todas las evidencias, o materia y energía que hasta ahora había sido invisible. En este artículo me centraré en los esfuerzos por investigar la naturaleza de esta forma desconocida de materia, la materia oscura, uno de los grandes retos que abordan la Física de Partículas, la Astrofísica y la Cosmología.

La naturaleza de la materia oscura

Sabemos bien de qué está compuesta la materia visible (podríamos llamarla también ordinaria). Con solo unos pocos ingredientes (quarks y leptones, el bosón de Higgs y cuatro interacciones

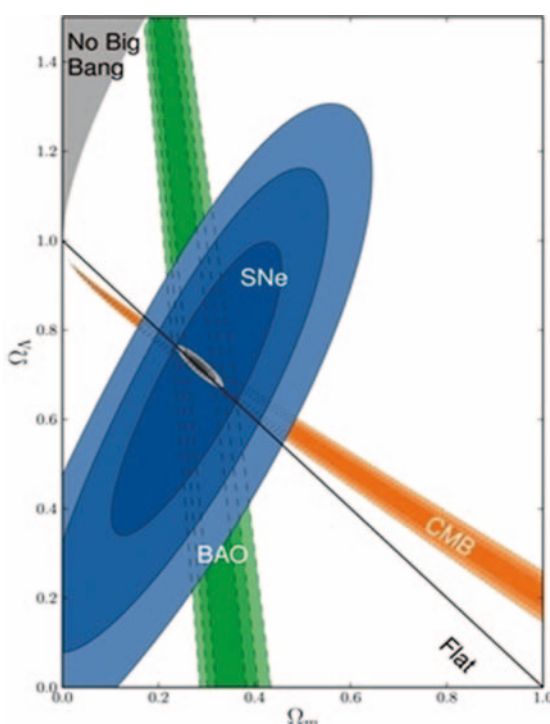


Fig. 5. Muestra de la concordancia de las varias evidencias observacionales interpretadas en términos del modelo cosmológico estándar Λ CDM [9]: radiación cósmica de fondo de microondas (CMB), oscilaciones acústicas de bariones (BAO) y supernovas (SNe). Confluyen en un Universo con un 68 % de energía oscura (Ω_Λ) y un 32 % de materia (Ω_m), de la cual el 84 % es oscura. (Crédito: Supernova Cosmology Project, Suzuki *et al.*, figura 5 de [9]).

mass charge spin	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	0 1 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ +1 1 W W boson	

Fig. 6. El modelo estándar de la Física de Partículas incluye tres familias de quarks y leptones, cuatro bosones gauge con los que se explican tres de las cuatro interacciones fundamentales y un bosón escalar, el bosón de Higgs. (Figura bajo licencia Creative Commons 3.0).

fundamentales), el modelo estándar de la Física de Partículas permite explicar de forma increíblemente precisa todas las observaciones y, sin embargo, deja sin respuesta demasiadas preguntas: cómo incorporar la gravedad en el modelo, por qué se observa una asimetría entre materia y antimateria en el universo, por qué hay tres familias de quarks y leptones, por qué son los que son los valores de las masas de las partículas, o qué son la materia y la energía oscura, entre otras.

Entre los posibles candidatos propuestos para explicar la materia oscura, la mayoría tienen carácter no bariónico para no entrar en conflicto con los resultados de la nucleosíntesis primordial. Este hecho requiere que sean partículas fuera del modelo estándar, distintas por tanto de todo lo que conocemos. Sin embargo, esto no supone ningún problema, ya que muchas de las teorías propuestas para ir más allá del modelo

estándar introducen de forma natural partículas con las características adecuadas para explicar la materia oscura. Entre los candidatos preferidos destacan los axiones y los WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles, partículas masivas que interaccionan débilmente). Por supuesto, existen otras opciones que eluden el problema de la nucleosíntesis primordial y la explicación de las fluctuaciones en la radiación cósmica de fondo de microondas, escondiendo los bariones en las etapas iniciales de la evolución del universo, por ejemplo, en forma de agujeros negros primordiales o agregados de quarks.

La detección de los WIMPs

Como hemos comentado, los WIMPs constituyen una categoría de candidatos a materia oscura fuertemente motivada. Además de interaccionar gravitatoriamente, los WIMPs interaccionan débilmente con la materia normal, por lo que si existieran podríamos abordar su detección de distintas maneras. Podríamos producirlos, por lo tanto, en los grandes aceleradores mediante colisiones a muy alta energía entre partículas normales, o bien observar las partículas que se producirían cuando se aniquilen entre sí en los halos “oscuros” de las galaxias o los cúmulos de galaxias, o bien mediante la interacción de las partículas de materia oscura con los núcleos de un detector adecuado. Esta última aproximación, la detección directa de la materia oscura, es en la que me voy a centrar a continuación.

Necesitamos detectores muy sensibles, capaces de identificar los pequeños y poco frecuentes depósitos de energía que producirían estas partículas y, por lo tanto, debemos aislar bien los detectores de todas las posibles radiaciones que interferirían con nuestra observación. En primer lugar, debemos protegernos de la radiación cósmica, que baña la superficie terrestre con casca-

Fig. 7. Mapa que muestra los laboratorios subterráneos más importantes. Hay también instalaciones subterráneas en Finlandia, Rusia, Ucrania y planes en curso para construir otras nuevas en India, Australia y Sudamérica. (Imagen cedida por S. Cebrián).



das de partículas secundarias, generadas cuando una única partícula de origen cósmico y muy energética interacciona con los átomos de la atmósfera. Debemos buscar entornos subterráneos para que la roca nos proteja de esta radiación. Las instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc [10] se encuentran bajo 800 metros de roca, equivalentes a 2 450 metros de agua, que reducen el flujo de muones atmosféricos en un factor 20 000. Hay sólo unos pocos laboratorios en todo el mundo que compartan estas características [11].

Además de irnos bajo Tierra, debemos proteger nuestros detectores de la radiactividad medioambiental. Todo es radiactivo: las rocas que nos rodean, la materia orgánica, el aire y el agua. Hay isótopos radiactivos naturales como el carbono-14 que se producen por la interacción de la radiación cósmica con átomos estables, mientras que otros forman parte de la composición del sistema solar desde su formación, como el uranio-238 o el potasio-40. Debemos protegernos de las radiaciones que emiten estos isótopos mediante blindajes adecuados que, sin embargo, son prácticamente transparentes, como también lo es la montaña, a los WIMPs.

El experimento ANAIS en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc

Así llegamos a construir un experimento como ANAIS en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc [12]. Usamos detectores de yoduro de sodio dopado con Talio. El yoduro de sodio emite pequeños destellos cuando una partícula interacciona en él. Mediante tubos fotomultiplicadores de muy alta eficiencia cuántica acoplados ópticamente al cristal centelleador se puede observar la luz producida. ANAIS-112 consiste en nueve detectores de 12.5 kg cada uno, distribuidos en una matriz 3×3 , es decir, 112.5 kg de material sensible en total. Los detectores están protegidos de las distintas formas de radiación ambiental dentro de un blindaje adecuado.

ANAIS estudia el viento de materia oscura. En su movimiento acompañando al Sol alrededor del centro de la galaxia, la Tierra suma o resta su velocidad a la del Sol de forma periódica. La materia oscura debe estar ahí, aunque no la veamos, para explicar la curva de rotación de la Vía Láctea, y al movernos a través de ella, deberíamos experimentar algo similar a lo que sucede cuando atravesamos una nube de mosquitos viajando en moto. Deberíamos ver cambiar el ritmo de interacción de las partículas de materia oscura en nuestros detectores con periodicidad anual. Este efecto ha sido aparentemente observado por un experimento, DAMA/LIBRA, en el Laboratorio Nacional del Gran Sasso, en Italia, a lo largo de 20 años: observan una modulación en los datos de sus detectores de yoduro de sodio exacta-



mente como la que se espera que produzcan las partículas de materia oscura [13]. Sin embargo, otros muchos experimentos más sensibles son incompatibles con este resultado y la comunidad científica no lo ha aceptado como prueba de la detección directa de la materia oscura galáctica. Ninguno de estos otros experimentos ha utilizado el mismo material como detector, el yoduro de sodio, y por ello, la comparación de los resultados depende del modelo de materia oscura considerado (tanto en su distribución en el halo galáctico

Fig. 8. Instalaciones del Laboratorio Subterráneo de Canfranc, Huesca, bajo 2 450 metros equivalentes de agua. Dispone de 1 500 m² de espacio subterráneo, alojando experimentos de colaboraciones internacionales. En la figura se muestran todavía vacíos en el momento de su inauguración, en 2010.

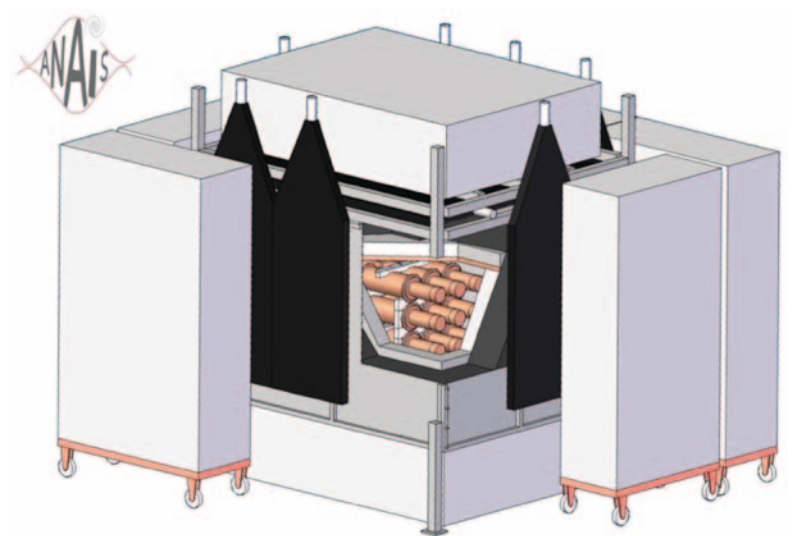
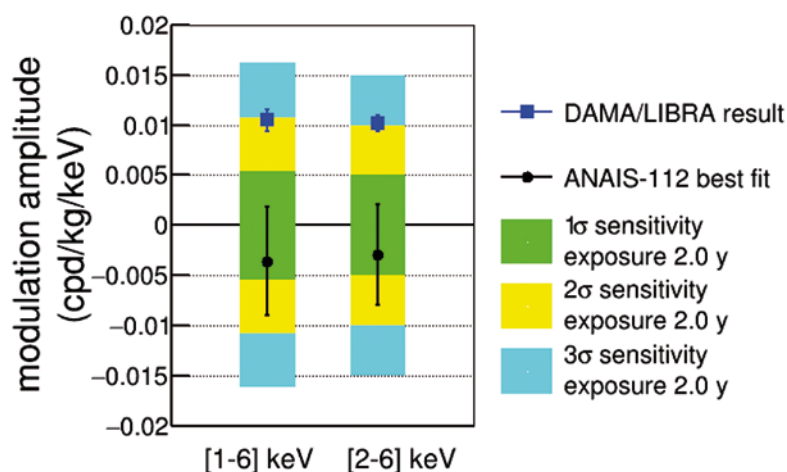


Fig. 9. Montaje experimental de ANAIS-112 en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. Son nueve módulos de yoduro de sodio de 12.5 kg cada uno, rodeados (de dentro hacia fuera) por 10 cm de plomo arqueológico, 20 cm de plomo de baja actividad, una caja hermética que evita la entrada de aire del laboratorio y se mantiene bajo sobrepresión de nitrógeno gas, libre de radón, 16 plásticos centelleadores que actúan como veto activo contra el flujo residual de muones que alcanza el laboratorio y 40 cm de agua y polietileno para moderar los neutrones.



Fig. 10. Detalle de uno de los módulos de ANAIS en el proceso de acoplo al fotomultiplicador de alta eficiencia cuántica en la sala limpia del Laboratorio Subterráneo de Canfranc.

Fig. 11. Resultados de 2 años de toma de datos de ANAIS-112 en términos de modulación. El resultado en las dos ventanas de energía analizadas (círculos negros) es compatible con la ausencia de modulación e incompatible con la modulación observada por DAMA/LIBRA (cuadrados azules) con un nivel de confianza de 2.6 desviaciones estándar [15].



¿Cómo puede afectar la materia oscura a la vida en la Tierra?

Pero no olvidemos que existen muchos y muy variados candidatos, aparte de los WIMPs, que podrían estar ahí afuera, en el halo de nuestra galaxia, constituyendo la materia oscura. En el resto de este artículo voy a comentar un par de propuestas curiosas que nos llevan a plantearnos qué papel podría jugar esta elusiva y misteriosa materia tanto de forma directa en nuestras vidas como en el pasado y tal vez el futuro del planeta Tierra.

La materia oscura podría ser la responsable de desencadenar las extinciones masivas que con cierta periodicidad han asolado nuestro planeta, aniquilando a la mayoría de las especies que en ese momento lo poblaban. Estas extinciones muestran cierta periodicidad, y aunque solo la última de ellas, la famosa que acabó con los dinosaurios hace 66 millones de años, ha sido claramente asociada a un impacto meteórico, se ha barajado frecuentemente la posibilidad de que exista un desencadenante de lluvias de objetos masivos, procedentes de las afueras del sistema solar, sobre los planetas interiores. Partículas de materia oscura que mostraran poca interacción con la materia normal pero que interaccionaran entre ellas podrían generar un disco galáctico oscuro lo suficientemente masivo como para ser capaz de desestabilizar gravitatoriamente los objetos de la nube de Oort, muy débilmente ligados, cuando el sistema solar cruza el disco galáctico, de forma periódica, en su movimiento en torno al centro de la galaxia. Esta es la propuesta que hace Lisa Randall en su libro *Dark Matter and the dinosaurs* [20].

Por otro lado, existe la posibilidad de que la materia oscura no se encuentre en forma de partículas elementales, sino de objetos macroscópicos que pueden interaccionar elásticamente con la materia normal con secciones eficaces “geométricas”. Aunque parezca sorprendente, esta posibilidad no ha sido descartada para un rango grande de masas y secciones eficaces, porque la densidad de estas partículas en el halo de nuestra galaxia sería muy baja. En este escenario, el cuerpo humano podría ser un buen detector de las interacciones directas de este tipo de partículas con la materia normal, aunque el proceso sería bastante destructivo: sus colisiones producirían heridas graves e incluso la muerte, siendo equivalentes a heridas producidas por un disparo de bala. Los autores del artículo “Death by Dark Matter” [21], de hecho, logran excluir algunas de estas partículas de la lista de candidatos a materia oscura, precisamente considerando que en una muestra relevante de seres humanos que desarrollan su día a día en el seno del halo de materia oscura de nuestra galaxia, deberían haberse producido unas cuantas



Fig. 12. Representación artística del impacto meteórico hace 66 millones de años que pudo provocar la última de las grandes extinciones masivas. Lisa Randall propone que la materia oscura pudo estar detrás de este y otros eventos catastróficos, aunque de una forma indirecta. (Crédito: Don Davis/ NASA).

muertes misteriosas de este tipo sin explicación por otros medios: serían muertes por materia oscura.

Epílogo

Durante el último siglo hemos aprendido a ver el universo con nuevos ojos, el espectro electromagnético completo, los neutrinos y recientemente las ondas gravitacionales. Se ha iniciado una nueva Astronomía que nos ha enseñado y nos enseñará en los próximos años cosas increíbles del universo que hoy ni siquiera somos capaces de imaginar. Si añadimos a todo esto una mayor comprensión del campo de Higgs, como la que debería derivarse de los resultados de LHC, y otros posibles descubrimientos en física de neutrinos o violación de CP que nos lleven más allá del modelo estándar de la Física de Partículas, tal vez en un futuro próximo la materia oscura deje de ser un misterio. En todo caso, podemos estar tranquilos, la probabilidad de que tengamos un encuentro “fatal” con la materia oscura en el curso de nuestras vidas, es realmente muy pequeña.

Referencias

- [1] <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>
- [2] <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>
- [3] V. RUBIN, N. THONNARD y W. K. JR. FORD, “Rotational properties of 21 SC galaxies with a large range of luminosities and radii, from NGC 4605 ($R=4\text{kpc}$) to UGC 2885 ($R=122\text{kpc}$)”, *The Astrophysical Journal* 238: 471-487 (1980).
- [4] A. BOSMA, “The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types”, PhD tesis, Rijksuniversiteit Groningen (1978).
- [5] E. CORBELL y P. SALUCCI, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 311 (2): 441-447 (2000).
- [6] F. ZWICKY, “Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln”, *Helvetica Physica Acta*, 6: 110-127 (1933).
- [7] D. CLOWE, A. GONZALEZ y M. MARKEVICH, “Weak lensing mass reconstruction of the interacting cluster 1E0657-558: Direct evidence for the existence of dark matter”, *The Astrophysical Journal* 604 (2): 596-603 (2004).
- [8] <https://www.cosmos.esa.int/web/planck/home>
- [9] Figura 5 tomada de N. SUZUKI *et al.* “The Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey. V. Improving the Dark-energy Constraints above $z > 1$ and Building an Early-type-hosted Supernova Sample”, *The Astrophysical Journal* 746: 85 (2012).
- [10] <https://lsc-canfranc.es/>
- [11] S. CEBRIÁN, “Science goes underground”, *Science in School* 39 (2017) [<https://www.scienceinschool.org/content/science-goes-underground>].
- [12] <https://gifna.unizar.es/anais/>
- [13] R. BERNABEI *et al.*, “First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2”, *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 19, n.º 4: 307-325 (2018).
- [14] COSINE-100 experiment: <https://cosine.yale.edu/home>; SABRE experiment: <http://sabre.lngs.infn.it/>
- [15] AMARÉ, J. *et al.*, “ANAIS-112 status: two years results on annual modulation”, *Journal of Physics: Conference Series* (2019) [<https://arxiv.org/abs/1910.13365>].
- [16] AMARÉ, J. *et al.*, “First results on dark matter annual modulation from ANAIS-112 experiment”, *Physical Review Letters* 123: 031301 (2019).
- [17] <https://www.symmetrymagazine.org/article/testing-dama>
- [18] <https://www.nature.com/articles/d41586-019-00865-9>
- [19] M. L. SARSA, “¿Sopla el viento de materia oscura en el Pirineo Aragonés?”, *Investigación y Ciencia* (julio de 2019).
- [20] LISA RANDALL, *Dark Matter and the Dinosaurs: The Astounding Interconnectedness of the Universe* (Harper Collins: Ecco Press, 2015, ISBN 978-0-06-232847-2).
- [21] J. S. SIDHU, R. J. SCHERRER y G. STARKMAN, “Death by Dark Matter” (2019) [<https://arXiv:1907.06674v2>].

María Luisa Sarsa Sarsa
Centro de Astropartículas
y Física de Altas Energías,
Universidad de Zaragoza



Sesgos cognitivos en la ciencia

Andrés Redondo Cubero

Tres historias con las que aprender sobre el complejo proceso de descubrimiento en la ciencia, en el que nuestra manera de mirar acaba siendo mucho más importante que nuestra manera de medir.

El primer principio es que no debes engañarte a ti mismo, y tú eres la persona más fácil de engañar.

Richard P. Feynman

Los investigadores estamos sujetos a importantes sesgos cognitivos, pero debido a nuestra profesión estos sesgos pueden ser especialmente peligrosos para la calidad y el rigor de nuestros trabajos. ¿Cuáles son esos sesgos y cómo de graves pueden llegar a ser si no les prestamos atención? ¿Por qué nos afectan y cómo podemos evitarlos?

Introducción

En enero de 2020, numerosos medios de comunicación se hicieron eco de una triste noticia científica: Frances H. Arnold, premio Nobel de Química en 2018, anunciaba que había decidido retractarse de un artículo publicado en la revista *Science* unos meses antes [1]. La razón era la falta de reproducibilidad de los resultados, acompañada de la ausencia de registros y datos para algunos experimentos clave. Cuatro años antes, la revista *Nature* había publicado un artículo advirtiendo precisamente de esta crisis de reproducibilidad en la ciencia [2]. En su encuesta, realizada a 1576 investigadores de diversas áreas, un 90 % de los científicos declaraban que la ciencia actual adolece de problemas de reproducibilidad. Es más, un 52 % declaraba que esos problemas eran significativos. Pero lo más interesante del estudio es que se determinaron también las causas más importantes que producían esto. Algunas de ellas eran esperables: la presión por publicar, el análisis pobre de los datos, una estadística insuficiente, o la baja replicación en el laboratorio. Pero lo más sorprendente es que la primera razón de todas era la elaboración de informes selectivos o sesgados por parte de los científicos. ¿Cómo es posible?

La ciencia es una actividad humana y como tal hereda ineludiblemente nuestros propios defectos. Esto ocurre así pese a nuestros esfuerzos por seguir un método científico, debido a que el verdadero mecanismo de la ciencia es mucho más complejo de lo que se admite generalmente [3]. Muchas decisiones importantes sobre los experimentos que se rea-

lizan (y los que no) así como de los resultados que se publican (o se guardan en un cajón) no responden realmente a un método objetivo, sino a fuerzas diversas, como la interacción con nuestros pares o la confianza en nuestras intuiciones e interpretaciones.

En la búsqueda por la verdad los científicos olvidamos a menudo un importante hecho sobre nuestras mentes: que no sólo podemos estar ciegos ante lo obvio, sino también a nuestra propia ceguera [4]. Este artículo pretende ayudar a los científicos a reconocer los sesgos cognitivos más peligrosos para nuestras tareas, aprovechando para ello tres ejemplos históricos concretos que dan buena idea de su alcance en investigaciones importantes. Pero antes conviene aclarar qué son y cuál es el origen de esos sesgos.

Los dos sistemas

Un sesgo cognitivo es cualquier proceso que, en algún estado de inferencia, tiende a producir resultados o conclusiones que difieren sistemáticamente de la verdad [5]. Los seres humanos (y no olvidemos que los científicos lo somos) tenemos muchos sesgos, y en la actualidad hay al menos 154 catalogados [6]. Estos sesgos responden a nuestra necesidad de interpretar información y tomar decisiones rápidamente, aun cuando esa información sea excesiva o insuficiente. Los sesgos afectan a capacidades especialmente críticas en el mundo científico: la habilidad para decidir correctamente, para hacer estimaciones justas, para hacer juicios de valor objetivos, para atribuir relaciones causales o para establecer hipótesis.

El origen de muchos de estos efectos psicológicos reside en lo que se conoce como los dos sistemas [4]. Se sabe que nuestro cerebro dispone de un sistema rápido de decisión, que es inconsciente, asociativo y automático, y que usamos el 95 % del tiempo. Afortunadamente, también disponemos de otro sistema, uno lento y racional, que requiere esfuerzo y que usa la lógica. Puesto que este sistema es más costoso lo usamos raras veces: un 5 % del tiempo aproximadamente. El sistema 1 es el que nos permite decidir si confiamos en la persona de la Figura 1a o no. Esa decisión te llevará sólo unos milisegundos y muy probablemente la respuesta sea “no”, aunque no sepas bien por qué. El sistema 2 es el que nos

permite resolver un problema complejo como el de la Figura 1b, en el que las blancas juegan y ganan. A menos que seas un ajedrecista profesional esto te llevará unos segundos.

Por lo general, todas las personas tendemos a utilizar el sistema 1 mientras sea posible, pues requiere menos esfuerzo que el sistema 2. Los científicos, a pesar de que nos jactamos de ser más racionales que la mayoría de la gente, no somos una excepción a este hecho. Ahora bien, ¿qué sesgos cognitivos nos afectan más en nuestro trabajo?

Conoce al enemigo

De todos los sesgos cognitivos que existen se han seleccionado aquí únicamente seis en base al grado de riesgo que entrañan. Esta simplificación no significa que no haya otros sesgos que puedan alterar nuestra percepción de la realidad, pero es preferible centrar nuestra atención en aquellos sobre los que nos sentimos (erróneamente) inmunizados. Es, al mismo tiempo, una elección personal que no pretende ser sistemática, sino más bien sintomática, esto es: pretende ilustrar los síntomas generales de los sesgos para ayudar a reconocerlos. Por orden de importancia, la clasificación de sesgos que deberían alertar a cualquier investigador científico sería la siguiente:

1. *Sesgo de confirmación*: tendemos a aceptar los detalles que confirman nuestras propias creencias. Tratamos desproporcionadamente las alternativas que no encajan con nuestras expectativas en lo que es un error sistemático del razonamiento inductivo.
2. *Sesgo de ilusión de la validez*: tendemos a encontrar historias y patrones incluso en datos dispersos o aleatorios. Al mismo tiempo tendemos a sobreestimar nuestra capacidad para interpretar datos y predecir su comportamiento.
3. *Sesgo de supervivencia*: tendemos a no tener en cuenta los hechos que no ocurrieron. Esto puede llevar a conclusiones falsas, porque inconscientemente establecemos relaciones entre los efectos y las posibles causas conocidas sin atender a otras posibles causas aún no determinadas.
4. *Sesgo de retrospectiva*: creemos que los hechos eran predecibles, pero sólo después de que ocurrieran. Esto suele modificar nuestros propios recuerdos para crear la ilusión de que nuestra opinión se ve confirmada con los hechos.
5. *Sesgo de anclaje*: tendemos a notar únicamente cambios relativos y solemos confiar demasiado en la primera información recibida. En particular, somos especialmente malos estimando cantidades absolutas y requerimos de proporciones y comparaciones para hacer juicios críticos.
6. *Sesgo de estereotipo*: tendemos a descartar lo específico para formar generalidades. La generalización es quizá una de las cualidades más

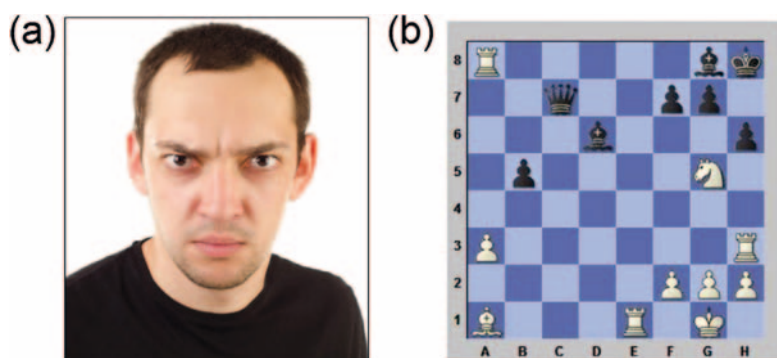


Fig. 1. (a) ¿Confías en él? (b) Blancas juegan y ganan. Dos problemas diferentes para los que se usan sistemas diferentes en nuestro cerebro.

reconocibles de la ciencia, pero, como seres humanos, tenemos demasiada facilidad para usarla, olvidando o pasando por alto detalles importantes.

Merece la pena mencionar que los sesgos pueden operar de múltiples maneras y a distintas escalas. En particular, muchos sesgos pueden trabajar de manera simultánea, e incluso conjuntamente. Por ejemplo, podría darse el caso de que el sesgo de confirmación y el de supervivencia “cooperen” para llevar al científico hacia una misma conclusión. Pero los sesgos también pueden operar en sentidos opuestos. Por ejemplo, el sesgo de confirmación tiende a rechazar ideas (que no encajan con nuestra manera de pensar), mientras que el sesgo de ilusión de la validez tiende a aceptar ideas (que no están suficientemente probadas). Ambas funciones son importantes en la disciplina científica y juegan un papel importante en la elaboración y aprobación de hipótesis.

Afortunadamente, los científicos disponemos de herramientas para luchar contra estos sesgos, pero eso no significa que las usemos a menudo. Así, una manera de acabar con la ilusión de la validez (reconocimiento de patrones inexistentes) es utilizar métodos matemáticos ciegos para el análisis de datos, aumentar el tamaño de la muestra, y considerar todos los datos con el mismo peso. Sin embargo, resulta más fácil eliminar ese punto que no cuadra con la tendencia (al fin y al cabo, todos sabemos que tiene que salir una línea recta, ¿no?). Eso significa que en la práctica la calidad de nuestra investigación está más condicionada por nuestros métodos que por nuestros propios datos [7]. Veamos ahora tres ejemplos concretos de esto en historias científicas que pudieron haber tenido otro final de no ser por los sesgos cognitivos.

Tres historias con mensaje

El agujero de la capa de ozono y el sesgo de confirmación

En 1985 Joseph C. Farman (1930-2013) y su equipo publicaron un breve artículo en el que revelaban pérdidas importantes de ozono en la Antártida [8]. Poco tiempo antes habían decidido reemplazar su equipo experimental de la base Halley porque pensaban que estaba funcionado

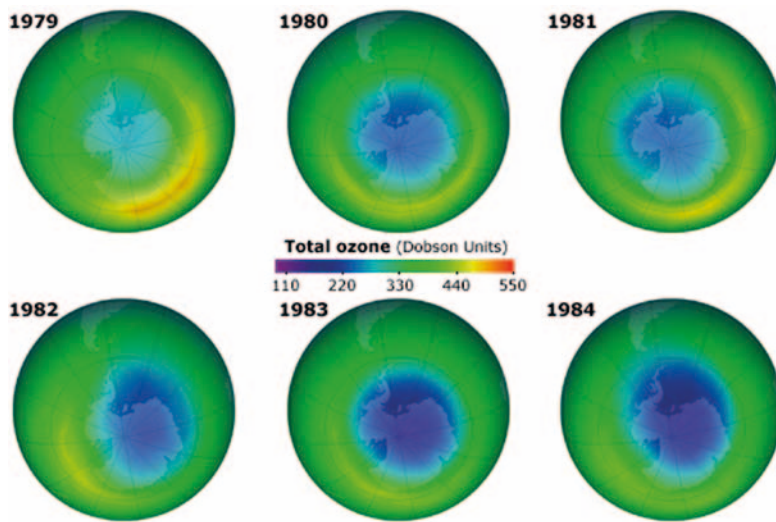


Fig. 2. Imágenes de la NASA que muestran la evolución del agujero de ozono en los años 80, un problema que había pasado desapercibido por un sesgo de confirmación. (Fuente: NASA).

mal debido a los datos anormalmente bajos. Entre otras cosas los datos de la NASA no mostraban este tipo de anomalía, así que lo más lógico era que su equipo, ya anticuado, estuviera midiendo mal. Calibraron un nuevo equipo y lo llevaron a la base, pero la bajada de ozono seguía estando ahí. Revisaron sus datos y se dieron cuenta de que en realidad esa bajada empezó mucho antes, en 1977. ¿Por qué los científicos de la NASA, con satélites que recogían datos 24 horas al día, no eran capaces de detectarlo? Resulta que precisamente por la gran cantidad de información que tenían que procesar, los científicos de la NASA habían tomado la decisión de diseñar un programa que filtrara los datos, es decir, un programa que establecía un umbral de valores admisibles [3]. Todos aquellos valores que no estaban dentro de los umbrales establecidos eran considerados

como fallos de medida y no se analizaban! En un claro caso de sesgo de confirmación los científicos habían decidido ya lo que tenía que salir, perdiendo una valiosa cantidad de información. Gracias a Farman el equipo de la NASA revisó los datos adecuadamente y descubrió que, no sólo había caído el nivel de ozono, sino que había un enorme agujero en el polo sur (Figura 2).

La ley de Hubble y la ilusión de la validez

La ley de Hubble-Lemaître es una de las pruebas científicas más importantes de la teoría del Big Bang y es, además, una de las mejores maneras para estimar la edad del universo. Establece que hay una relación lineal entre el corrimiento al rojo de las galaxias y la distancia a la que están; es decir, que cuanto más lejos se encuentra una galaxia más rápidamente se aleja. Edwin Hubble (1889-1953) utilizó el telescopio más potente del mundo en aquel momento, el del observatorio del Monte Wilson, para hacer observaciones de estrellas variables (cefeidas) en galaxias lejanas y relacionar así su efecto Doppler con su distancia. Combinando sus datos con las medidas de Vesto Slipher (1875-1969), Hubble encontró un valor conflictivo de unos 500 km/s/Mpc, que implicaba una edad para el universo menor que la de la propia Tierra. La Figura 3a muestra los datos originales de Hubble [9], entre los que cabe destacar algunos con velocidades negativas que, de manera ejemplar, Hubble no eliminó de su lista [10]. Sin embargo, podemos preguntarnos viendo esa nube de puntos: ¿sufría Hubble de una cierta ilusión de la validez? ¿Eran sus datos suficientes para demostrar una ley lineal entre velocidad y distancia?

Hoy es fácil responder a esa respuesta comparando con datos recientes [11], representados en la Figura 3b. Las escalas son tan diferentes que nos resulta casi imposible ver dónde caen los datos de Hubble, que apenas alcanzaban los 2 Mpc de distancia (1 pársec \sim 3.26 años luz). Bajo esta perspectiva, parece claro que Hubble no tenía datos suficientes como para concluir de manera contundente que existía una ley lineal, algo que además se reflejaba en un valor sobreestimado de su constante (actualmente se siguen haciendo esfuerzos por reducir la incertidumbre en su valor, que se sitúa próximo a los 70 km/s/Mpc [12]).

Al evaluar el sesgo de Hubble debemos tener cuidado para no caer en un juicio anacrónico. Es cierto que Hubble no disponía de la estadística suficiente en ese momento para poder enunciar su ley con una garantía absoluta, pero también es cierto que no lo podía hacer mucho mejor en la época en la que se encontraba, y que hizo la suposición más simple posible compatible con sus datos (es decir, se ciñó correctamente al principio de la navaja de Ockham). De hecho, Hubble era consciente de sus limitaciones y menciona que “para tal escasa cantidad de material, tan pobre-

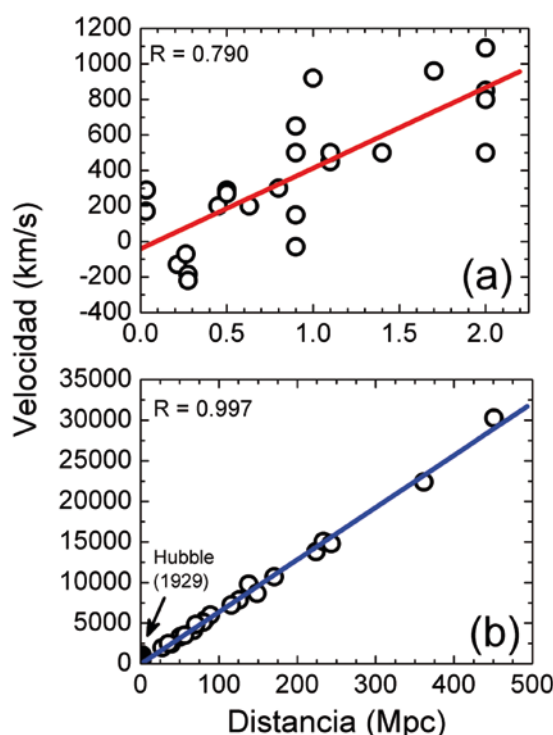


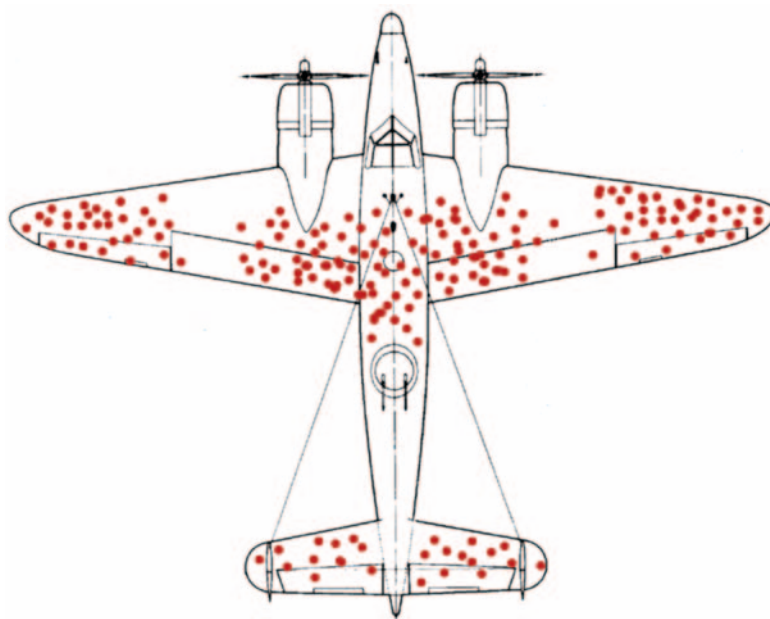
Fig. 3. (a) Datos empleados por Hubble [9] en 1929. (b) Datos de Riess *et al.* [11] obtenidos con supernovas de tipo Ia en 1996. Nótese la diferente escala en las gráficas y el coeficiente de correlación R de ambos casos.

mente distribuido, los resultados están bastante definidos”. Se podría decir, por tanto, que la ley de Hubble es un buen ejemplo de caso de éxito, donde operó un sesgo cognitivo sin consecuencias negativas. En este sentido la historia nos demuestra que la ciencia no sólo avanza a pesar de los sesgos de los científicos, sino que a veces lo hace a través de ellos, y que la intuición y la confianza juegan un papel clave en muchos descubrimientos pioneros.

La contaminación con pesticidas y el sesgo de supervivencia

El sesgo de supervivencia es uno de los más sutiles e indetectables que pueden afectar a las conclusiones científicas. Su origen se remonta a la Segunda Guerra Mundial, cuando se llevó a cabo un análisis de la supervivencia de los aviones en las batallas aéreas recabando información del daño en el fuselaje en los aviones que habían regresado. Los investigadores habían decidido reforzar las partes más dañadas, como se ve en el ejemplo de la Figura 4. Sin embargo, el estadístico Abraham Wald (1902-1950) propuso todo lo contrario: reforzar precisamente las partes no dañadas [13]. Su argumento es que se estaba analizando la información únicamente de los aviones que sobrevivían a los ataques, pero no de los que se habían perdido. Dicho de otra manera, la pregunta que había que resolver no era “¿dónde están dañados los aviones que vuelven?”, sino “¿por qué no vuelven los que no vuelven?”. Y la respuesta lógica es: porque están dañados en zonas más críticas del avión, que no pueden ser las que tienen los aviones que regresan (o de lo contrario no regresarían). El sesgo de supervivencia muestra de manera excelente que “los errores más serios no se comenten como resultado de respuestas incorrectas, sino como resultado de hacer las preguntas equivocadas” [14].

Otro gran ejemplo de sesgo de supervivencia es el caso del pesticida aldrín. Este insecticida es un hexacloro extremadamente tóxico que se usó ampliamente entre los años 1950 y 1970 en cosechas de maíz y algodón en Estados Unidos. Produce daño en los riñones y en el hígado, pero durante varios años se creía que no había motivo de preocupación para el consumo humano. La razón es que los investigadores medían contenidos de aldrín muy bajos en los productos cosechados. Sucede, sin embargo, que el aldrín se transforma en dieldrín (otro hexacloro igual de tóxico) en el suelo y en los tejidos vivos, pero, puesto que los investigadores sólo analizaban el contenido de aldrín, no podían saberlo [15]. De nuevo los investigadores se estaban haciendo la pregunta incorrecta y sólo estaban analizando los datos que sí tenían, pero no los demás. Finalmente, el Departamento de Agricultura de Estados Unidos canceló todos los usos de aldrín y dieldrín en 1970.



Conclusiones

Gran parte del trabajo de un científico reside en tomar decisiones acerca de experimentos, datos, hipótesis y conclusiones. El método científico está influido, en la práctica, por un variado juego de fuerzas que separan a los investigadores de la objetividad requerida para llevar esas tareas. En este artículo hemos visto que a veces esas decisiones están distorsionadas por sesgos cognitivos, muchos de los cuales pasan desapercibidos. Es nuestra misión como investigadores conocer y controlar estos sesgos para que la calidad de nuestros informes aumente, y limitar así los posibles fallos de reproducibilidad en la ciencia. Las historias que hemos revisado nos muestran que, a pesar de algunos casos afortunados como el de la ley de Hubble, estos sesgos pueden entrañar serios riesgos en la interpretación de resultados. Para mejorar la calidad de la ciencia, y en particular su reproducibilidad, los científicos debemos fomentar el uso de métodos de trabajos más lentos, que permitan tomar decisiones de manera más racional y reposada. Puesto que los sesgos que nos acechan son imposibles de eliminar, la manera más eficaz de minimizar sus efectos es por medio de la autocrítica. En este sentido, lo más importante es recordar, como bien indica el principio de Feynman que encabeza este artículo, que *tú* eres la persona más fácil de engañar.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a David García González sus valiosas discusiones y recomendaciones literarias sobre este tema. Quiero agradecer también las enriquecedoras sugerencias del revisor de este artículo. Este trabajo está apoyado por el programa Ramón y Cajal (contrato RYC-2015-18047).

Referencias

- [1] I. CHO, Z.-J. JIA y F. H. ARNOLD, “Site-selective Enzymatic C-H Amidation for Synthesis of Diverse Lactams”,

Fig. 4. Las batallas aéreas en la Segunda Guerra Mundial son un buen ejemplo de cómo opera el sesgo de supervivencia en el análisis científico. La imagen muestra daños hipotéticos en un bombardero. (Fuente: Cameron Moll).

- Science* 364, 575 (2019); I. CHO, Z.-J. JIA y F. H. ARNOLD, *Retraction*, *Science* 367, 155 (2020).
- [2] M. BAKER, "Is There a Reproducibility Crisis?", *Nature* 533, 452 (2016).
- [3] R. CALDWELL y D. LINDBERG, *Understanding Science* (University of California Museum of Paleontology, 2019) [<http://www.understandingscience.org>].
- [4] D. KAHNEMAN, *Thinking, Fast and Slow* (Penguin, 2012).
- [5] D. L. SACKETT, "Bias in Analytic Research", *J. Chron. Dis.* 32, 51 (1979).
- [6] E. DIMARA, S. FRANCONERI, C. PLAISANT, A. BEZERIANOS y P. DRAGICEVIC, "A Task-Based Taxonomy of Cognitive Biases for Information Visualization", *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics* (2018).
- [7] Hay que hacer notar que los sesgos no sólo afectan a la metodología de trabajo científico, sino también al proceso de revisión de dicho trabajo, puesto que son los propios científicos los que juzgan la validez de los artículos. Algunos ejemplos notorios de revisión, como el rechazo en la revista *Nature* del artículo sobre hipoxia de Peter John Ratcliffe (premio Nobel de Medicina en 2019), podrían entenderse mejor a la luz de algunos sesgos cognitivos.
- [8] J. C. FARMAN, B. G. GARDINER y J. D. SHANKLIN, "Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO_x/NO_x Interaction", *Nature* 315, 207 (1985).
- [9] E. HUBBLE, "A Relation Between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", *PNAS* 15, 168 (1929).
- [10] Se sabe que la dispersión de datos tan considerable de Hubble estaba debida, entre otras cosas, al efecto de la velocidad peculiar de las estrellas referida a una galaxia que se usa como sistema de referencia.
- [11] A. G. RIESS, W. H. PRESS y R. P. KIRSHNER, "A Precise Distance Indicator: Type Ia Supernova Multicolor Light Curve Shapes", *Astrophysical Journal* 473, 88 (1996).
- [12] A. G. RIESS *et al.*, "A 2.4 % Determination of the Local Value of the Hubble Constant", *Astrophysical Journal* 826, 56 (2016).
- [13] A. WALD, *A reprint of a Method of Estimating Plane Vulnerability Based on Damage of Survivors*, by Abraham Wald (Statistical Research Group, CRC 432, 1980).
- [14] La cita original se atribuye a Peter F. Drucker (1909-2005).
- [15] R. CARSON, *Primavera silenciosa* (Crítica, 2010).

Andrés Redondo Cubero
Investigador Ramón y Cajal
Dpto. de Física Aplicada,
Universidad Autónoma de Madrid



CMD2020GEFES online

August 31st - September 4th

<http://www.cmd2020gefes.eu/>

Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados

Alberto Saldaña López, Christian Maibohm, Oscar F. Silvestre y Jana B. Nieder

Las necesidades de microfabricación actuales, cada vez más complejas y específicas, requieren de nuevas técnicas como la 2PP que, utilizando los principios físicos de la litografía láser no lineal, hacen posible la creación de estructuras en 3D tanto en materiales biocompatibles como de aplicación electrónica.

La generación de pulsos láser ultracortos, el evento artificial más efímero creado por el hombre, ha permitido el descubrimiento de nuevos fenómenos en el campo de la interacción radiación-materia. Entre ellos destaca la absorción de dos o más fotones en la llamada **polimerización de dos fotones** (*two-photon polymerization*, 2PP, en sus siglas en inglés). Usando esta técnica de escritura láser directa se pueden crear estructuras 3D de libre diseño a una escala microscópica y en diferentes materiales, con una resolución por debajo del límite impuesto por la difracción de la luz. La aplicación de las estructuras escritas vía 2PP van desde andamios en ingeniería tisular hasta estructuras y dispositivos fotónicos como microlentes, guías de onda en 3D y cristales fotónicos.

Introducción

Hoy en día, el estudio de líneas celulares en un entorno tridimensional (3D) es esencial para una mejor comprensión del desarrollo de algunas enfermedades infecciosas y el cáncer. Estos estudios se centran en parámetros como la movilidad, capacidad de invasión y crecimiento de células perjudiciales frente a sanas en diferentes ambientes artificiales. El cambio desde una situación estándar 2D a un andamiaje 3D influye de manera relevante en el comportamiento celular. Los cultivos celulares tridimensionales están jugando un papel importante en la diferenciación de células madre, con aplicación directa en el campo de la regeneración de tejidos.

En un área muy diferente y relacionada con el sector de la información y la comunicación, también se necesitan técnicas de microfabricación 3D. Para reducir la cantidad de materiales y mejorar la velocidad de respuesta, existe una necesidad constante de miniaturización, así como de integración y reemplazo de los componentes electrónicos por sus análogos ópticos. La capacidad de controlar la interfaz luz-electrónica

es la base de la rama conocida como Optoelectrónica, un sector de la tecnología que ha crecido exponencialmente durante la última década.

Ambos campos requieren de técnicas de manufacturación 3D con la capacidad de, para el primero, crear estructuras microscópicas imitando los detalles del tejido natural y, para el segundo, alcanzar la precisión suficiente en el rango micro- y submicrométrico para fabricar estructuras fotónicas capaces de interactuar con los dispositivos optoelectrónicos.

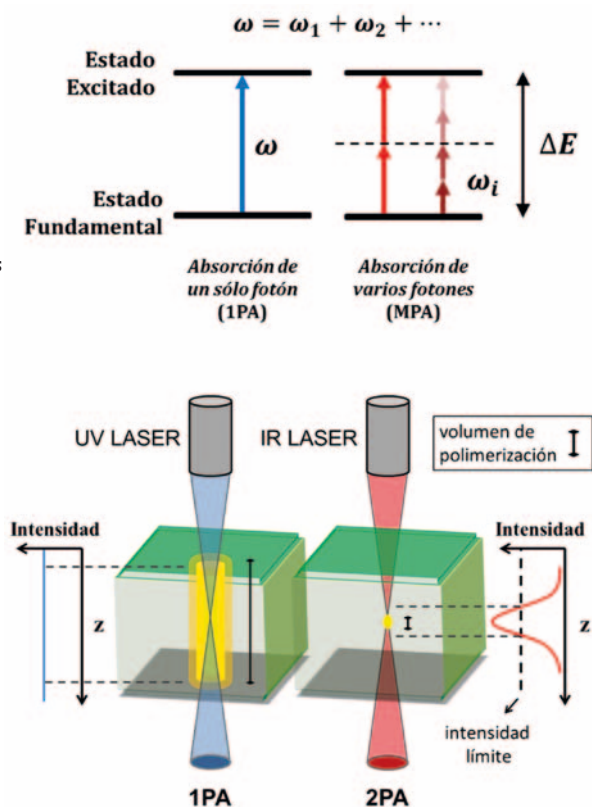
A través de este artículo, comentaremos cómo el desarrollo de una versátil tecnología, la polimerización de dos fotones, está proporcionando soluciones a estos nuevos problemas y a muchos otros.

¿Qué es la 2PP?

La absorción de la luz por átomos y moléculas es un fenómeno ampliamente conocido en Física Cuántica. Sin embargo, la transición entre un estado fundamental y otro excitado puede llevarse a cabo absorbiendo uno, dos o más fotones (Figura 1). La expresión teórica para la absorción de dos fotones fue publicada por Maria Göppert-Mayer en 1930 [1] (premio Nobel de Física en 1964) y experimentalmente confirmada 30 años después tras la invención del láser (del inglés LASER, amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación).

La absorción de dos fotones por parte de un sistema atómico o molecular es un fenómeno muy improbable. Tras la absorción del primer fotón, el segundo fotón debe llegar antes de que el sistema se desexcite desde este nuevo estado virtual en que se encuentra. Así, no fue hasta la segunda mitad del siglo XX cuando se hizo posible la observación de esta doble absorción, gracias al desarrollo de la Óptica Ultrarrápida y, en especial, a la invención de los pulsos láser ultracortos con energía pico suficiente para alcanzar densidades fotónicas muy elevadas.

Fig. 1. Principio y metodología en la absorción de dos fotones. **Arriba:** esquema de absorción mono- y multifotónica por un sistema físico. La diferencia de energía entre el estado fundamental y el excitado es $\Delta E = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 + \dots$. **Abajo:** comparativa entre el volumen de polimerización para los procesos de absorción de uno (1PA) y múltiples fotones (MPA). En el primer caso, la excitación por medio de un fotón UV provoca la polimerización a lo largo de la región de la muestra que es atravesada por la luz. En el otro, la absorción simultánea de dos fotones IR hace que este volumen de polimerización se limite a la región focal del sistema.



La polimerización de dos fotones (2PP) es la técnica por la que un foto-polímero (matriz de monómeros sensibles a la luz) es irradiada y llevada a un estado excitado mediante la absorción de dos fotones infrarrojos (IR) de la misma longitud de onda [2]. En la región de exposición a la luz, los monómeros en la matriz se juntan para formar las cadenas de polímero con propiedades físicas diferentes respecto a la matriz original. Añadiendo foto-iniciadores, y mezclándolos con la matriz de monómero, se puede potenciar la reacción de polimerización por medio de la liberación de compuestos radicales que promueven el ensamblaje de monómeros en la cadena de polímero.

Más específicamente, por medio de la 2PP un láser de pulso ultracorto de unas decenas de femtosegundos (fs) de duración y de longitud de onda infrarroja, con un rango típico entre 750 y 800 nm, es focalizado sobre una muestra de foto-polímero. La pequeña probabilidad de absorción de dos fotones IR causará el fenómeno de 2PP (Figura 1). En la Sección 3 discutiremos por qué esto conduce a una alta localización espacial del proceso de 2PP, permitiendo la fabricación en tres dimensiones.

La polimerización de dos fotones comienza sólo cuando dos fotones IR pueden excitar simultáneamente la transición UV del polímero fotosensible

La polimerización tendrá lugar únicamente en un volumen en el que la densidad de fotones en el medio exceda un valor crítico, en otras palabras, hay un umbral de intensidad.

Desplazando este volumen de polimerización en las tres direcciones espaciales XYZ a través de la matriz de monómero, se consigue la creación de una estructura polimérica tridimensional, cuyas propiedades (índice de refracción, resistencia, elasticidad, etc.) son diferentes a aquellas del monómero original.

En el caso de estar usando un polímero de tipo negativo (ejemplos son SZ2080, Sartomer®, Ormocer®), se retira la matriz de polímero no irradiado alrededor para obtener las microestructuras diseñadas, ya que la región polimerizada se endurece. Para polímeros tipo positivo (como AZ P4620, AZ 9260, etc.) ocurre lo contrario, la zona de polímero irradiada se vuelve más fluida y será retirada. En la Figura 2 quedan esquematizados tanto el arreglo experimental como el proceso de 2PP (para un polímero tipo negativo).

Física debajo del fenómeno de 2PP

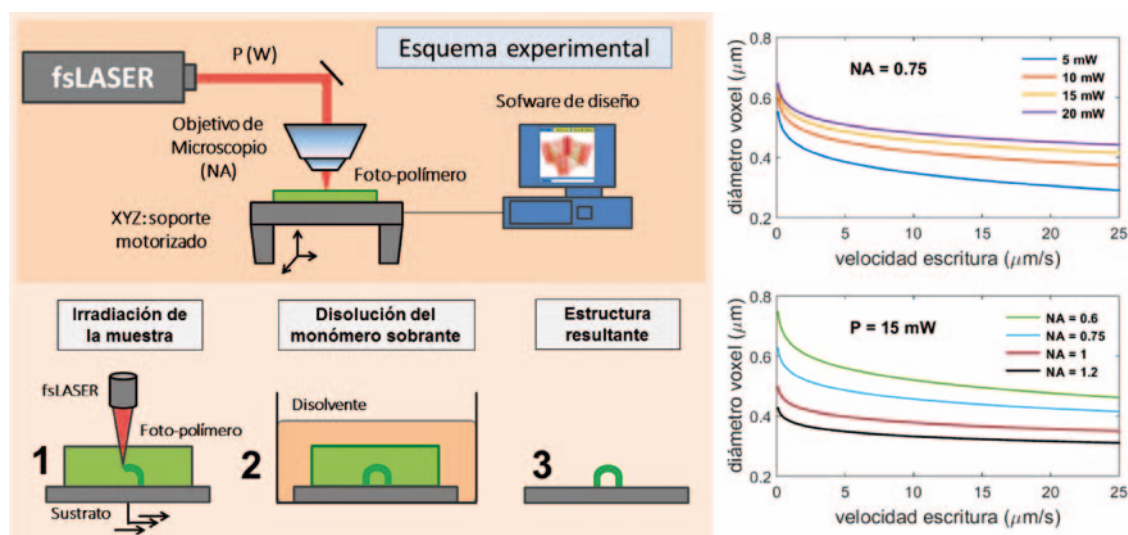
Si uno realiza algunos cálculos, concluirá que la probabilidad de absorción de un sólo fotón (1PA, de sus siglas en inglés) depende linealmente de la intensidad de la luz incidente.

La probabilidad de absorción de dos fotones simultáneos (2PA) es proporcional a la raíz cuadrada de esta intensidad (fenómeno no lineal). Combinando esta dependencia en la potencia con el perfil de intensidad gaussiano que produce una fuente láser de cierta longitud de onda central, el haz puede ser focalizado sobre una muestra de índice de refracción conocido (en general, similar al del cristal, $n \sim 1.6$) dando lugar a un fenómeno curioso. En esta situación y a lo largo del eje óptico de incidencia la probabilidad de absorción se distribuye constante para 1PA y por el contrario, presenta un máximo en el foco del haz para 2PA.

Esto es por lo que para 1PA la polimerización ocurrirá por igual en toda la sección de polímero que atravesase el haz láser, mientras que para 2PA esta sección queda limitada a la región focal del láser (Figura 1). En términos de probabilidades, podríamos decir que la sección eficaz del polímero es mayor para 1PA que para 2PA.

Llamamos vóxel a este volumen de polimerización de forma elíptica y de tamaño micrométrico, derivado del inglés *volume pixel*. La resolución en las estructuras 2PP depende en última instancia del tamaño de este vóxel, típicamente de entre 0.5 y 2 μm de grosor (semieje menor del elipsoide).

En 2PP, el volumen de polimerización o vóxel se localiza en torno al foco del láser



¿Cómo depende el tamaño del vóxel de los parámetros experimentales?

Las principales variables experimentales en 2PP son la potencia suministrada por el láser (P), la apertura numérica del objetivo (NA) y la velocidad de escritura (v). El tamaño del vóxel puede ser reducido:

- Aumentando la NA del objetivo. Cuanto más alta la NA , más pequeña la región en la que se alcanza la densidad crítica de fotones. NA comunes varían entre 0.5 y 1.5 dependiendo de la magnificación del objetivo empleado.
- Disminuyendo la potencia aplicada $P(W)$, asegurando que se supera el límite para la polimerización. La potencia suministrada comprende entre 1 y 50 mW.
- Incrementando la velocidad de escritura (v); en otras palabras, reduciendo el tiempo de exposición/irradiación. Velocidades típicas son de decenas de $\mu m/s$ para una frecuencia de repetición del láser de unos 80-120 MHz.

Una reproducción cuantitativa del comportamiento del tamaño del vóxel con los parámetros experimentales puede verse en la Figura 2, y un ejemplo de sus resultados queda reflejado en la Figura 3, que discutiremos en la siguiente sección.

2PP en investigación biomédica

En la Figura 3 se muestran pruebas de concepto de estudios que involucran interacción entre estructuras 2PP y células, llevadas a cabo en el Ultrafast Bio and Nanophotonics Group del International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL), en el marco de unas estancias de verano para estudiantes.

Las imágenes adjuntas al microscopio electrónico de barrido (SEM), muestran estructuras 3D con forma de caja grabadas mediante 2PP en el polímero SZ2080. Para ello, se usó un láser de femtosegundo de 795 nm a una velocidad de repetición de pulsos de 80 MHz (Tsunami, Spectra Physics), con una duración de pulso de unos 120 fs y una potencia láser promedio de 10 mW.

La velocidad de escritura fue de $10 \mu m/s$ (uFab Workstation, Newport) bajo un objetivo de microscopio de $40\times$ con un NA de 0.75 (PlanApo, Nikon).

En la Figura 3 (izquierda) se puede ver una caja a escala micrométrica de anchura $100 \mu m$ y altura $75 \mu m$, con una estructura en forma de malla en su interior. Un zoom hacia el interior de la malla revela que la resolución puede ser tan buena como 990 nm (abajo, izquierda), cuando el vóxel da una sola pasada a través del polímero fotosensible. En la misma Figura 3 (derecha) se presenta una imagen SEM de una caja similar, con un volumen de $50 \mu m \times 50 \mu m \times 50 \mu m$, en la que se omitió la malla interior. Los muros de esa jaula fueron construidos moviendo el vóxel en líneas horizontales y verticales con $5 \mu m$ de separación en ambas direcciones. Curiosamente no se observa separación entre líneas horizontales. Un solapamiento parcial de vóxel a lo largo del eje vertical conecta un nivel de altura con el siguiente, lo que produce un muro aparentemente homogéneo y muy delgado ($<1 \mu m$), con áreas o celdas ligeramente separadas por micropilares que se extienden desde la base a la parte superior. Estos micropilares —con un diámetro algo superior a $1 \mu m$ y una separación de $5 \mu m$ — se crearon mediante una trayectoria vertical del vóxel y muestran un diámetro ligeramente mayor en comparación con el grosor del resto de la pared. Este engrosamiento, de entre 5 y $6 \mu m$, lo provoca la duración prolongada de la excitación por unidad de volumen cuando el vóxel alargado se mueve en la dirección axial, en comparación con el movimiento lateral donde el diámetro es del orden de $<1 \mu m$. Para sostener estos muros de anchura $<1 \mu m$, se colocaron cuatro torres adicionales en las esquinas de la estructura, de doble grosor y $10 \mu m$ de lado.

De nuevo en la Figura 3 (abajo, derecha), se muestra una imagen al microscopio óptico de células de microglia vivas unas 24 horas después de haber sido agregadas a las estructuras. La dimen-

Fig. 2. Dispositivo experimental y parámetros láser para la fabricación basada en 2PP. **Izquierda:** arreglo experimental para microfabricación vía 2PP. Una fuente láser pulsada de femtosegundo (fs) con una potencia suministrada $P(W)$ se focaliza mediante un objetivo de gran apertura numérica (NA) sobre una superficie de foto-polímero (arriba). Protocolo en la creación de microestructuras: irradiación y procesamiento de una muestra de foto-polímero positivo (abajo). **Derecha:** resultados de una simulación para la dependencia del tamaño del vóxel con la potencia suministrada P y la NA del objetivo. Los gráficos han sido reproducidos para una longitud de onda central de $\lambda = 795 \text{ nm}$, 50 fs de duración del pulso láser, y un índice de refracción para el polímero de $n = 1.69$.

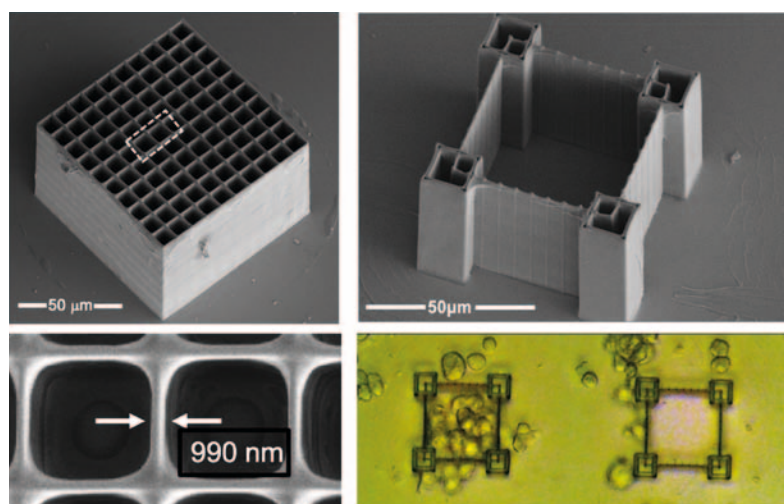


Fig. 3. Izquierda: imágenes SEM de una estructura en forma de caja con un mallado 3D en su interior (arriba). Un zoom de su interior revela la resolución en la construcción de la malla (abajo). **De-recha:** imagen SEM de una estructura en forma de jaula abierta con cuatro soportes en las esquinas (arriba). Imágenes al microscopio óptico de células de microglía tras 24 horas de interacción con las microestructuras (abajo).

sión de las microestructuras 3D es comparable a los elementos de la propia matriz extracelular, de alrededor de $1\ \mu\text{m}$, y se extiende varias decenas de micrómetros excediendo los tamaños celulares típicos. Las imágenes al microscopio óptico muestran también que los cubreobjetos funcionalizados adquieren una buena transparencia para la microscopía de transmisión óptica y, por lo tanto, son muy adecuados para realizar estudios de interacción célula-microestructura. Las observaciones iniciales revelaron cierta unión de las células a las microestructuras y la formación de agregados celulares.

En este proyecto, se creó una matriz con estructuras en forma de caja usando la técnica de 2PP, y se agregaron y tomaron imágenes de células cerebrales humanas (microglía) usando un microscopio de campo amplio. El objetivo era averiguar la viabilidad de usar estas microplantillas 3D fabricadas mediante 2PP para estudios de movilidad celular.

El potencial de invasión y proliferación celular en un tejido está regulado por la interacción entre las células y la estructura 3D del medio que habitan. La habilidad para estudiar la migración y el crecimiento de las células en un medio lo más parecido posible al tejido original se ha convertido en una aplicación natural para la 2PP, ya que permite la creación de estructuras tridimensionales con una resolución superior al tamaño de las propias células (entendiéndose resolución como el tamaño de los detalles más pequeños).

El grupo de Dr. Boris N. Chickov, en Hannover (Alemania), dio la primera demostración de formación de tejidos aplicando esta técnica de impresión. El haz láser se dirigió directamente sobre las células vivas en proliferación, dando una forma predefinida a su matriz extracelular, y consiguiendo con ello la diferenciación sistemática de células madre en óseas o cardíacas de acuerdo [3]. En otro estudio, consiguieron crear una red vascular entre células depositadas en ca-

pas diferentes, que fueron colocadas y separadas mediante 2PP [4] y [5].

Barbara Spagnolo y colaboradores del Instituto Tecnológico Italiano usaron diseños 2PP en forma de jaula para separar células tumorales (células de cáncer de pulmón) de células sanas en base a su capacidad de invasión de las mismas estructuras [6]. Estudios recientes han demostrado además como esta técnica puede ser utilizada para medir la fuerza aplicada por las células durante los procesos de colonización [7].

2PP en Óptica y dispositivos fotónicos integrados

La fabricación de chips en Electrónica y su alto grado de miniaturización lleva a emplear métodos de fabricación como la litografía láser ultravioleta (UV). Sin embargo, y a pesar de su alta resolución, esta técnica únicamente permite la creación de dispositivos 2D y 2.5D (los microchips son planos).

La 2PP sobrepasa esta limitación 2D y en un futuro podría jugar un papel mucho más importante en dispositivos fotónicos integrados: la fabricación de microdispositivos para manipular la luz se vuelve posible. En la Universidad de Stuttgart (Alemania), el grupo de investigación del Prof. Dr. Herald Giessen ha abierto una nueva ventana al mundo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs). Han conseguido el empaquetamiento de multitud de microlentes (fabricadas mediante 2PP) sobre el extremo de fibras ópticas, corrigiéndolas de aberraciones [8]; la mejora en la eficiencia de LEDs nanométricos adaptándoles microobjetivos [9]; o, mediante la integración de microlentes en un chip CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor), la creación de un dispositivo que imita la visión del ojo de un águila, usando microlentes de diferentes distancias focales [10].

En la misma línea, destaca el ámbito de la microrrobótica, con aplicación natural en farmacología y tratamiento clínico. Se busca incorporar en el interior de tejidos dispositivos micrométricos y biodegradables con capacidad para ser orientados y transportados, de forma que puedan suministrar fármacos o realizar pequeñas intervenciones a esta escala y de forma específica.

En la Universidad Técnica de Dinamarca, el equipo del Dr. Jesper Glückstad ha diseñado mediante 2PP microrrobots maniobrables por medio de pinzas ópticas, que al calentarse por acción de un láser provocan la absorción o liberación de nanopartículas dentro o fuera de su núcleo hueco [11]. En la Figura 4 se muestra un microrrobot similar, con cuatro elipsoides utilizados para controlar la dirección.

Este microrrobot se usó como una guía de onda móvil, capaz de acoplar la luz a través de un embudo (arriba a la izquierda en la imagen) y de reorientarla un ángulo de 90° [12].

De forma similar, en una colaboración entre la Universidad de Koç (Turquía) y el Instituto Max Planck de Sistemas Inteligentes (Stuttgart, Alemania), se han producido microtúbulos móviles mediante la aplicación de un campo magnético externo, capaces de liberar fármacos tras su activación por luz [13].

Ninguno de estos logros hubiera sido posible sin la puesta en escena de la técnica que aquí nos ocupa, ya que es de las pocas con una resolución 3D tan adaptable.

Un vistazo general

En resumen, se ha presentado la versatilidad del fenómeno no lineal de la 2PP como una técnica de escritura láser 3D directa. La extrema localización del fenómeno de absorción multifotónica se traduce en su capacidad para la microfabricación tridimensional. En este aspecto, la 2PP destaca por ofrecer soluciones a una gran variedad de campos, desde la aplicación para la investigación en biología celular hasta la fotónica y microóptica. Las estructuras tridimensionales de libre diseño alcanzables gracias al método de la polimerización de dos fotones entran en oposición a lo que se puede conseguir mediante las técnicas convencionales de litografía o microfabricación por absorción de un fotón, por lo que quedan limitadas a diseños 2D o 2.5D.

Los polímeros usados en 2PP pueden ser dopados con sondas químicas fluorescentes o nanopartículas, lo que abre la posibilidad de crear microestructuras 3D inteligentes, con capacidad de quimio-tracción, y con propiedades magnéticas y de sensado. Dado que en microscopía no lineal, la excitación y visualización provienen del mismo vóxel, los equipos láser de femtosegundo que se utilizan en el proceso de fabricación se pueden emplear para la caracterización de las mismas microestructuras.

No obstante, existen algunos problemas todavía por resolver en el desarrollo de esta técnica emergente. La sensibilidad de los equipos a factores externos como la temperatura, la composición precisa de los fotopolímeros empleados y la complejidad de alineación y montaje óptimo de los instrumentos hacen que los resultados no sean del todo reproducibles entre diferentes grupos, ya que todas estas variables afectan de manera última a la resolución y tamaño del vóxel.

Entre otras desventajas, existe además una limitación práctica en la complejidad y tamaño de las estructuras 2PP que se pueden fabricar: diseños demasiado grandes llevan un tiempo de manufacturación largo, y aquellos con detalles muy finos corren el peligro de dañarse al retirar las capas de polímero no irradiado en el posprocesado de la muestra.

Finalmente, cabe añadir que las compañías proveedoras de equipos láser para escritura

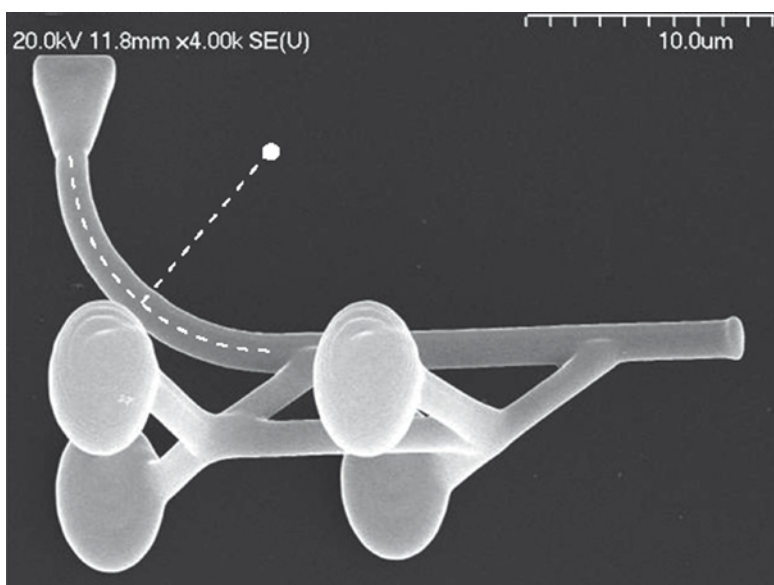


Fig. 4. Imagen SEM de un microrrobot que funciona como un guía de onda móvil. Se ven los soportes elipsoidales para su captura óptica, así como la guía de onda en forma de curva. Imagen reproducida bajo permiso de ref.: [12], © The Optical Society.

3D ofrecen un amplio abanico de opciones en técnicas de manufacturación. Ejemplos de ello son Nanoscribe [<https://www.nanoscribe.de/en/applications/>] Multiphoton Optics [<https://multiphoton.net/application-examples/>] y Newport [<https://www.newport.com/p/UFAB>]. Las aplicaciones, a menudo desarrolladas por sus clientes —que incluyen laboratorios de investigación destacados en todo el mundo—, abarcan desde ingeniería de tejidos, biomimética y dispositivos *lab-on-a-chip*, implantes de estimulación nerviosa, reproducción de la barrera hematoencefálica o dispositivos fotónicos integrados y microóptica.

En conclusión, la 2PP se está viendo involucrada en áreas como la ciencia de materiales y la ingeniería fotónica y tiene el potencial de ingresar en nuevos campos como la tecnología de información fotónica y cuántica, así como en otras ramas en las que su aplicación no ha sido aún explorada.

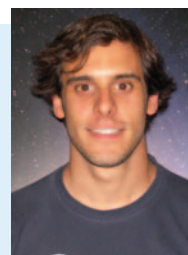
Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory) a través de su programa de becas de verano. Este programa permitió al estudiante de grado A. S. L. participar para contribuir en un proyecto de investigación en curso en el grupo Ultrafast Bio- and Nanophotonics, que involucra técnicas 2PP aplicadas a estudios de movilidad celular. El proyecto fue llevado a cabo por C. M., O. F. S. y J. B. N. Los autores agradecen además a Inês Pinto, Andrea Cruz y Helena Sofia Domíngues (INL) por facilitar las muestras celulares y sus fructíferas discusiones, y a Jérôme Borme (INL) por la caracterización SEM de las estructuras. INL agradece la financiación proveniente de CCDD-N a través el proyecto “Nanotechnology-based functional solutions” (cuantía no.: NORTE-01-0145-FEDER-000019).

Referencias

- [1] M. GÖPPERT-MAYER, "Elementary Processes with Two Quantum Transitions", *Ann. Phys.* 18, No. 7-8, 466-479 (2009).
- [2] M. FARSARI y B. CHICHKOV, "Two-photon Fabrication", *Nature photonics* 3(8): 450-452; Materials Processing (2009).
- [3] M. GRUENE, A. DEIWICK, L. KOCH, S. SCHLIE, C. UNGER, N. HOFMANN, I. BERNEMANN, B. GLASMACHER y B. CHICHKOV, "Laser Printing of Stem Cells for Biofabrication of Scaffold-Free Autologous Grafts", *Tissue Engineering Part C: Methods* 17(1): 79-87 (2011).
- [4] M. GRUENE, M. PFLAUN, C. HESS, S. DIAMANTOUROS, S. SCHLIE, A. DEIWICK, L. KOCH, M. WILHELMI, S. JOCKENHOEVEL, A. HAVERICH y B. CHICHKOV, "Laser Printing of Three-Dimensional Multicellular Arrays for Studies of Cell-Cell and Cell-Environment Interactions", *Tissue Engineering Part C: Methods* 17(10): 973-982 (2011).
- [5] L. KOCH, A. DEIWICK, S. SCHLIE, S. MICHAEL, M. GRUENE, V. COGER, D. ZYCHLINSKI, A. SCHAMBACH, K. REIMERS, P. VOGT y B. CHICHKOV, "Skin Tissue Generation by Laser Cell Printing", *Biotechnology and bioengineering* 109(7): 1855-1863 (2012).
- [6] B. SPAGNOLO, V. BRUNETTI, GODEFROY LEMENAGER, E. DE LUCA *et al.*, "Three-Dimensional Cage-Like Microscaffolds for Cell Invasion Studies", *Nature Scientific Reports* 5: 10531 (2015).
- [7] A. ACCARDO, M. BLATCHÉ, R. COURSON, I. LOUBINOX, C. THIBAUT, L. MALAQUIN y C. VIEU, "Multiphoton Direct Laser Writing and 3D Imaging of Polymeric Freestanding Architectures for Cell Colonization" *Small*, vol. 13:25, (2017).
- [8] T. GISSIBL, S. THIELE, A. HERKOMMER y H. GIESSEN, "Two-Photon Direct Laser Writing of Ultracompact Multi-Lens Objectives", *Nature Photonics* 10: 554 (2016)
- [9] S. FISCHBACH, A. SCHLEHAHN, A. THOMA, N. SROCKA, T. GISSIBL, S. RISTOK *et al.*, "Single Quantum Dot with Microlens and 3D-Printed Micro-Objective as Integrated Bright Single-Photon Source", *ACS Photonics* 4(6), 1327-1332 (2017).
- [10] S. THIELE, K. ARZENBACHER, T. GISSIBL, H. GIESSEN y A. M. HERKOMMER, "3D-Printed Eagle Eye: Compound Microlens System for Foveated Imaging", *Science advances* 3(2), e1602655 (2017).
- [11] M. J. VILLANGCA, D. PALIMA, A. R. BANAS y J. GLÜCKSTAD, "Light-driven Micro-tool Equipped with a Syringe Function", *Light: Science & Applications* 5, e16148 (2016).
- [12] D. PALIMA, A. R. BAÑAS, G. VIZSNYICZAI, L. KELEMEN, P. ORMOS y J. GLÜCKSTAD, "Wave-Guided Optical Waveguides", *Opt. Express* 20, 2004-2014 (2012).
- [13] U. BOZUYUK, O. YASA, I. C. YASA, H. CEYLAN, S. KIZILEL y M. SİTTİ, "Light-Triggered Drug Release from 3D-Printed Magnetic Chitosan Microswimmers", *ACS Nano* 12(9), 9617-9625 (2018).

Alberto Saldaña López
Visiting Student at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory), Universidad Complutense de Madrid (UCM)



Christian Maibohm
Postdoctoral Research Fellow at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



Oscar F. Silvestre
Postdoctoral Research Fellow at the Ultrafast Bio- and Nanophotonics group, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



Jana B. Nieder
Research Group Leader of the Ultrafast Bio- and Nanophotonics Group, Head of the Nanophotonics and Bioimaging Corporate Facilities, Deputy Coordinator of the Future Emerging Technologies Cluster, INL (International Iberian Nanotechnology Laboratory)



<https://www.europhton.org/>

9TH EPS-QEOD EUROPHOTON VIRTUAL CONFERENCE, 30 AUGUST - 4 SEPTEMBER 2020

El papel de las energías renovables en la Transición Energética 2030 en España

J. M. Martínez-Duart y R. Gómez-Calvet

Con un gran porcentaje de renovables intermitentes (eólica, solar) en el sistema eléctrico de 2030 surgirán excesos y defectos de electricidad sobre la demanda real. Por tanto, será necesario recurrir al almacenamiento eléctrico: hidro-bombeo, baterías, hidrógeno, etc.

Wikimedia Commons

El sistema eléctrico español en 2030, según el Plan Energético enviado por el Gobierno a la Comisión Europea, estará principalmente constituido por energías renovables, tales como eólica y solar. Tal concentración de renovables necesitará de una gran capacidad de almacenamiento energético, basado en sistemas hidroeléctricos, baterías, hidrógeno, etc. Por otra parte, se pretende eliminar gran parte de la electricidad de origen nuclear antes de 2030. Finalmente, respecto a la electricidad generada a partir del carbón, ya se ha logrado eliminar alrededor del 68 % en 2019, con la evidente repercusión en emisiones.

1 El sistema eléctrico español

Las fuentes renovables transforman energía presente en la naturaleza en energía disponible para el desarrollo económico y la vida cotidiana. Esta energía utiliza el vector de la energía eléctrica como sistema de conexión entre generación y consumo. Es por ello por lo que hablar de energía renovable y de electricidad de origen renovable representa lo mismo. En el caso del sistema eléctrico en España, se podría calificar como uno de los más avanzados a nivel global debido a las siguientes razones: i) Nuestro sistema de generación eléctrica está basado en una gran diversidad de fuentes, lo que le dota de una gran seguridad de suministro. Por ejemplo, en un año típico, tal como el 2017 (Tabla 1) [1], tenemos en porcentajes de energía eléctrica: nuclear (22 %), eólica (19 %), carbón (17 %), ciclos combinados de gas (14 %), hidroeléctrica (9 %), solar (5 %), etc.; ii) El sistema está muy adecuadamente dimensionado, ya que la potencia total instalada (2017) es de 104.122 MW, que es mucho mayor que el máximo anual exigido al sistema: 41.381 MW el 18 de enero 2017. Esta relación es una de las mayores del mundo, lo que proporciona una gran seguridad al sistema; iii) La contribución de las energías renovables (eólica, hidroeléctrica, solar, bioenergía, etc.) se ha duplicado prácticamente en los últimos doce años, representando en 2019 el 39 % del total de la electricidad consumida.

Uno de los grandes problemas de los sistemas eléctricos a nivel nacional consiste en que generalmente la electricidad debe generarse al mismo tiempo que es demandada por los

Tabla 1. Electricidad generada (MWh) en los últimos cuatro años (2016-2019) en el sistema eléctrico español (fuente: Red Eléctrica Española [<https://www.esios.ree.es/es>] [1])

	2016	2017	2018	2019
Nuclear	56 020	55 603	53 277	55 961
Carbón	35 427	42 752	35 435	11 091
Hidráulica	34 058	17 220	32 642	23 356
Ciclo combinado	25 983	34 154	26 911	51 575
Eólica	47 566	47 146	48 924	52 382
Solar fotovoltaica	7 270	7 813	7 578	9 214
Solar termoeléctrica	5 073	5 282	4 440	5 199
Cogeneración	28 936	31 179	31 934	32 353
Térmica renovable	3 653	3 684	3 597	3 850
	243 985	244 834	244 739	244 981

usuarios, ya que los sistemas de almacenaje eléctrico son muy caros y no siempre suficientemente efectivos. Este tema, que se tratará en detalle más adelante, es sobre todo patente en los casos de la energía solar, aprovechable solamente durante el día, y de la eólica, ya que períodos de vientos muy fuertes pueden venir seguidos en pocas horas de períodos de vientos casi en calma.

Aparte de la variabilidad climática de las fuentes renovables, existe otro aspecto importante que es debido a que el consumo eléctrico depende mucho de las horas del día, de los laborales o festivos, períodos vacacionales, estaciones del año, etc. Teniendo esto en cuenta, las empresas eléctricas podrán planificar las necesidades de generación, y los mercados ajustar los precios de la electricidad de acuerdo con la demanda, todo ello en respuesta a las distintas disponibilidades de electricidad según las horas del día. La variabilidad tanto de generación como de demanda, junto a la dificultad para el almacenaje, lleva a que los mercados ajusten los precios cada poco tiempo con el objetivo de alcanzar el uso más eficiente de los recursos.

Para ilustrar mejor la variabilidad de la generación, en la Figura 1 mostramos el valor medio horario para cada una de las 24 horas del día para el año 2019, de la potencia proporcionada por las principales fuentes de generación [1, 2]. La anchura, según la vertical, de cada una de las franjas coloreadas

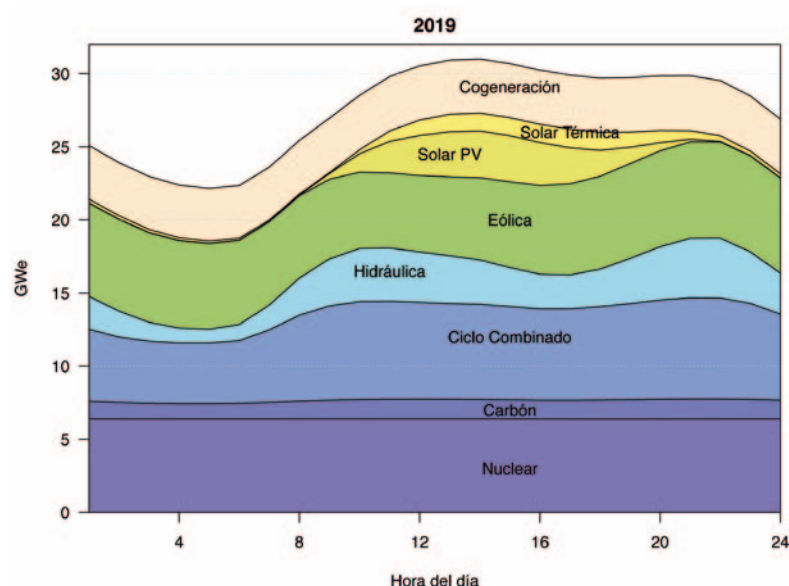


Fig. 1. Desglose horario de generación (igual a la demanda) calculado como la media aritmética de cada uno de los días 365 del año 2019 (véase texto) (fuente: autores a partir de datos de Red Eléctrica Española [https://www.esios.ree.es/es] [1]).

das es proporcional a la aportación de cada tipo de energía de las especificadas en Tabla 1. Obsérvese que la franja inferior es de anchura casi constante (alrededor de 7 GW) debido a que representa la aportación nuclear, ya que los reactores nucleares trabajan con un *output* fijo de alrededor de 1 GW cada uno. Es de destacar que la curva envolvente superior (curva de demanda) presenta durante las horas de la noche un mínimo de unos 23 GW alrededor de las 5 horas. A partir de ahí empieza a crecer hasta alcanzar su máximo diario, debido principalmente a la mayor demanda de la industria, alrededor de las 13 horas. Posteriormente, existe un segundo máximo relativo alrededor de las 20 horas, y después la curva decrece de cara a la noche. Es de notar también la gran aportación de la hidroeléctrica ya que, además de renovable, es altamente gestionable, al contrario de la eólica o solar. Por tanto, es de gran ayuda su contribución (Figura 1) para la transición nocturna de baja demanda a la diurna (de 6 a 10 horas aproximadamente). Por último, nótese que las dos energías solares (PV y térmica en la figura) sólo funcionan prácticamente desde cerca de las 8 horas hasta alrededor de las 20-22 horas según la época del año.

2. Transición Energética 2030. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)

De todas las grandes regiones a nivel mundial, Europa es la que tiene el programa más avanzado hacia una descarbonización casi total de su economía para el 2050, especialmente en el sector de generación eléctrica que es el que presenta mayores emisiones de CO₂. En la Figura 2, obtenida de uno de los documentos de la Comisión Europea (CE) del año 2010 [3], se puede comprobar que desde hace cosa de una década ya se pretendía que las emisiones del sector eléctrico (“power sector” en la figura) fueran nulas en 2050. Este objetivo quedó todavía más afianzado si cabe tras las recomendaciones adoptadas en el Acuerdo de París sobre el Clima de

2015. Posteriormente, la Comisión Europea marcó una serie de objetivos que se deberían alcanzar en una primera etapa que terminaría en 2030. Estas metas son principalmente: i) Al menos una bajada del 40 % en emisiones (en relación a los niveles de 1990); (ii) El 32 % de la energía total consumida por todos los sectores debe de ser de origen renovable, lo cual implicaría que alrededor del 70 % de la electricidad generada fuese renovable.

Basándose en las directrices europeas, España diseñó el denominado Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), cuyo borrador ha sido recientemente aprobado por el Gobierno [4] y enviado a la Comisión Europea. En la Tabla 2 queda detallada la evolución de las potencias eléctricas de las distintas fuentes de energía para la generación de electricidad para los años 2015, 2020, 2025 y 2030 según el PNIEC.

Tabla 2. Capacidad Instalada (MW) prevista en el borrador actualizado en Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), de enero de 2020 (fuente: Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (2020) [4]).

	2015	2020	2025	2030
Eólica	22 925	28 033	40 633	50 333
Solar fotovoltaica	4 854	9 071	21 713	39 181
Solar termoelectrica	2 300	2 303	4 803	7 303
Hidráulica	14 104	14 109	14 359	14 609
Bombeo mixto	2 687	2 687	2 687	2 687
Bombeo puro	3 337	3 337	4 212	6 837
Biogás	223	211	241	241
Otras renovables	0	0	40	80
Biomasa	677	613	815	1 408
Carbón	11 311	7 897	2 165	0
Ciclo combinado	26 612	26 612	26 612	26 612
Cogeneración	6 143	5 239	4 373	3 670
Fuel/gas (T. Insulares)	3 708	3 708	2 781	1 854
Residuos sólidos urbanos	893	610	470	341
Nuclear	7 399	7 399	7 399	3 181
Almacenamiento	0	0	500	2 500
Total	107 173	111 829	133 803	160 837

Debemos reconocer que los planes del PNIEC español son bastante ambiciosos, en parte debido a que el objetivo para 2050 es que España sea neutra en CO₂, es decir, las emisiones menos las absorciones deben igualar cero. Por último, destacaremos que según Duwe *et al.* [5], de entre los planes energéticos presentados por los países de la Unión Europea, los de España y Francia son los que han obtenido calificaciones más altas.

En nuestra opinión, entre los objetivos y calendario del PNIEC (2020-2030) hay tres temas que merecen una atención singular y que trataremos en los subapartados siguientes: estos son la des-

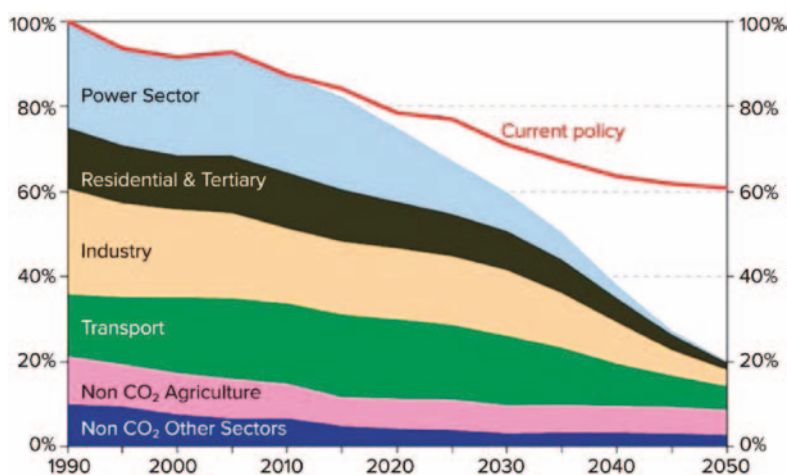
nuclearización de las fuentes de energía eléctrica, así como su descarbonización, y la gran implementación de las renovables, de modo que en 2030 las potencias de la eólica y la solar serían varias veces superiores a sus valores en 2020.

2.1. Desnuclearización

Tal como se señaló en la Sección 1, la energía nuclear es en la actualidad la primera fuente de electricidad en España, ya que representa alrededor del 22 % del total y está provista por siete reactores nucleares de alrededor de 1 000 MW de potencia cada uno. Debido a la escasa popularidad de la energía nuclear en España, junto con el hecho de estar gran parte de los reactores relativamente cerca de su fecha denominada *shelf-life* (40 años), a partir de la cual han de someterse a revisiones muy costosas, España ha decidido ir retirándolos paulatinamente, de modo que en 2030 estén en funcionamiento sólo tres de los siete reactores actuales. De ahí que el PNIEC (Tabla 2) asigne un valor a la potencia nuclear en funcionamiento para 2030 de 3 181 MW en lugar de los 7 399 MW de 2025. Este desmantelamiento de cuatro de los reactores nucleares podría tener unas consecuencias muy negativas en la cantidad de emisiones de CO₂ del sector eléctrico, pero, como veremos a continuación, quedarán en gran parte compensadas por la eliminación de las plantas térmicas de carbón y el gran desarrollo de las renovables.

2.2. Reducción progresiva de generación eléctrica a partir del carbón

Uno de los objetivos más importantes de los países de la Unión Europea durante los últimos años ha sido la eliminación del carbón para la generación de electricidad, ya que es el combustible que más CO₂ emite por unidad de energía (alrededor del doble que el gas natural). Sin embargo, la generación por carbón se había mantenido relativamente constante a lo largo de la anterior década, hasta que llegó 2019, en la que pasó de tener una contribución al sistema nacional de 14.5 % en 2018 a tan sólo el 4.5 % en 2019 [6]. Por otra parte, esta gran disminución se pudo compensar mediante la generación de las plantas de ciclos combinados de gas natural. Para mejor ilustrar este hecho, mostramos en Figura 3 la evolución a lo largo de las 8 760 horas de 2019 de la potencia generada en cada hora, y en la que se aprecia que la sustitución del carbón por gas se produjo principalmente en los dos primeros meses de 2019. Esta transición ha sido posible debido a varias causas: i) encarecimiento de los derechos de emisión que hay que pagar en Europa por emisiones, según el denominado Emission Trading System (EU-ETS); ii) El objetivo principal ya señalado de la Unión Europea para la reducción de emisiones; iii) La gran bajada de precios del gas natural; y iv) la gran capacidad disponible de plantas de ciclo combinado de gas natural.



2.3. Estado actual de las renovables y perspectivas 2030

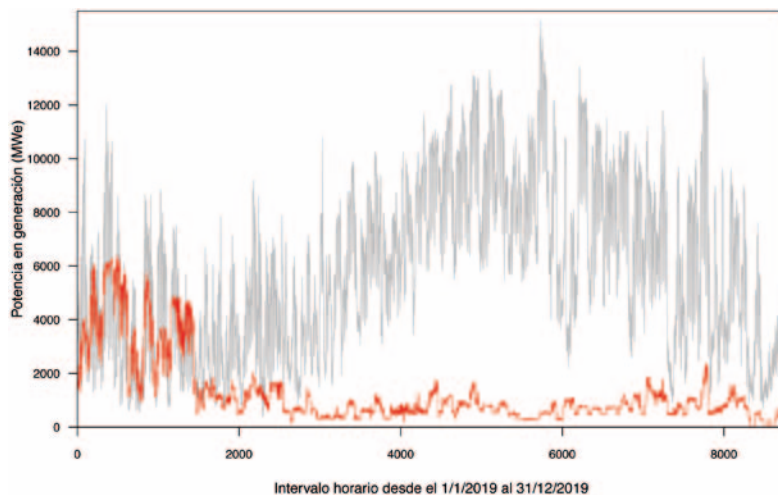
Como hemos señalado anteriormente, el objetivo principal del desarrollo futuro de nuestro sistema eléctrico es la reducción de emisiones. Por ello, el PNIEC (Tabla 2) propone un gran aumento de las potencias instaladas en eólica y solar (fotovoltaica y termoeléctrica) para el año 2030 que serían de 50 333 MW y 46 484 MW, respectivamente. En la Figura 4 se representa la evolución de las potencias eólica y solar fotovoltaica de las dos últimas décadas, así como su proyección a 2025 y 2030, según las previsiones del PNIEC. Observemos que, según estas previsiones, otras renovables, como la biomasa o el biogás, sufrirán un crecimiento mucho menor. Sin embargo, para cumplir con las previsiones del PNIEC, cada año de la próxima década habrá que implementar aproximadamente 5000 MW entre eólica y solar.

3. Alta integración de las renovables: *surplus* y respaldo

Tal como se desprende del *mix* de potencia eléctrica propuesto por el PNIEC (Tabla II) para 2030, se aprecia que presenta unas características muy distintas al del *mix* actual (2020), siendo la más notable el gran crecimiento de la eólica y la solar. Hoy en día es bien conocido, a partir de los cálcu-

Fig. 2. Evolución prevista (1990-2050) de emisiones de CO₂ de acuerdo con la Hoja de Ruta de la Unión Europea [3].

Fig. 3. Potencia observada en la generación de electricidad a partir de carbón (línea roja) y ciclo combinado de gas natural (línea gris) durante las 8 760 horas del año natural 2019 (fuente: autores a partir de [6]).



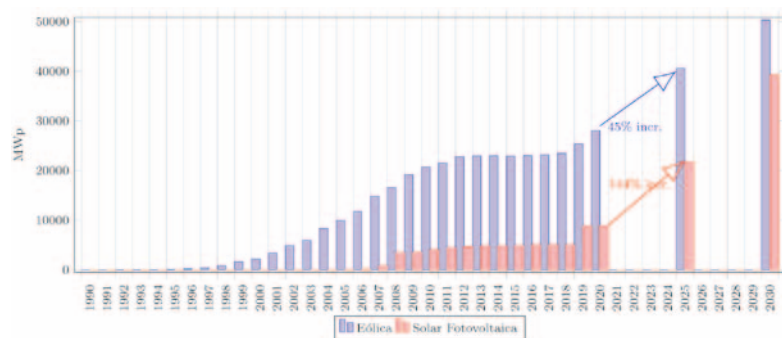


Fig. 4. Evolución observada (1990-2019) y prevista (2020-2030) de la capacidad instalada de centrales eólicas (azul) y solar fotovoltaica (roja) (fuente: autores a partir de datos de Red Eléctrica Española [https://www.esios.ree.es/es] y escenario objetivo previsto en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [4]).

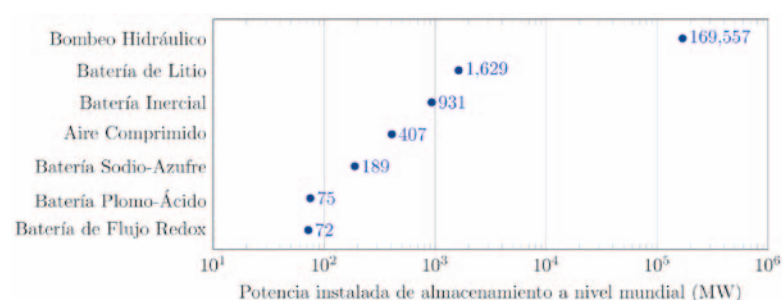
los de Wagner [7], que para porcentajes tan altos de renovables variables habrá momentos en que la intensidad del viento y/o la radiación solar sean tan intensas que bien se exporta la electricidad sobrante a un país vecino o bien hay que parar los aerogeneradores (*curtailment*), aunque lo inteligente en esta situación sería almacenar la energía sobrante (*surplus*). Por el contrario, hay situaciones con el viento en calma, y además de noche, en las cuales las renovables consideradas pueden no generar suficiente energía por lo que se necesitarían sistemas de respaldo (*backup*), con el inconveniente que gran parte de ellos utilizan combustibles fósiles.

Para el cálculo de los *surplus* y de los respaldos hemos realizado estudios con técnicas de optimización por programación lineal para averiguar los porcentajes óptimos de crecimiento en eólica, solar fotovoltaica y solar termoeléctrica de modo que se minimicen los *surplus* y los *backups*. Para los detalles sobre la aplicación de estas técnicas dirigimos a los lectores interesados a nuestras publicaciones recientes [2, 8]. Estas técnicas matemáticas permiten también obtener las distribuciones probabilísticas de las energías de *surplus* y de respaldo para cubrir la demanda horaria de electricidad (Figura 1), así como las necesidades de almacenamiento.

4. Almacenamiento de energía

Acabamos de ver en la sección anterior que, en los sistemas de generación y distribución eléctrica con una gran proporción de energías renovables variables, puede ser muy conveniente el almacenar la energía sobrante en los períodos de *surplus*, ya que en caso contrario se perdería. Puesto que los sistemas de almacenaje de energía tienen costes relativamente elevados, se necesitará de una planificación cuidadosa para su implementación.

Fig. 5. Potencia instalada de almacenamiento a nivel mundial. Unidades: MW. Eje horizontal en escala logarítmica (fuente: autores a partir de Mongird *et al.* (2019), Ref. [9]).



En esta sección discutiremos los sistemas de almacenamiento más frecuentemente contemplados a nivel de plantas de generación y de líneas de distribución eléctricas de gran tamaño.

4.1. Almacenamiento por bombeo hidroeléctrico

El bombeo hidroeléctrico es en el presente la técnica más eficiente para el almacenamiento de grandes cantidades de energía eléctrica a nivel nacional. El mecanismo físico en el que está basado consiste en el bombeo de agua desde una presa o un depósito a otro colocado a un nivel superior; desde el cual se libera posteriormente de una forma controlada al nivel inferior a través de unas turbinas generadoras de electricidad. Por tanto, en realidad, el almacenamiento está basado en los cambios de energía potencial gravitacional. En el mundo hay unos 170 GW de almacenaje por hidrobombeo, que son muchos más que el siguiente sistema de almacenamiento, que es el formado por baterías (Figura 5).

4.2 Baterías

De los numerosos tipos de baterías existentes, existe el consenso de que son las de iones de litio las que presentan un mejor futuro para aplicaciones de almacenamiento en los sistemas eléctricos de grandes redes de distribución. Una razón importante es que estas baterías pueden soportar un número muy elevado de ciclos de carga-descarga, sin apenas pérdidas de carga a lo largo de su vida (Crabtree *et al.*, [10]). Además, su eficiencia de carga/descarga por ciclo es alrededor del 95 % y la evolución de los costes para el almacenamiento de electricidad, actualmente de unos 160 \$/kWh, se espera que bajen hasta los 75 \$/kWh en la próxima década. Por último, puesto que se predice que las renovables representen en muchos países europeos alrededor del 70 % de la generación eléctrica total, una de las prioridades de la Unión Europea en materia de energía es la de apoyar la creación de una competitiva y sostenible industria para la fabricación de grandes baterías.

4.3. Hidrógeno

Otra forma de almacenar la energía de *surplus* (Sec. 3) en sistemas con un alto porcentaje de renovables es mediante hidrógeno, el cual se produciría in situ mediante electrolisis, es decir, haciendo pasar la corriente eléctrica a través de soluciones químicas acuosas. El hidrógeno creado se transportaría para ser inyectado más adelante en células de combustible que luego generarían corriente eléctrica, en un proceso similar al de los coches eléctricos de pila de combustible. A este respecto, es interesante recalcar que la Comisión Europea ha establecido una serie de prioridades para el desarrollo del programa de la Transición Energética 2030 [11] entre las que se encuentra el establecimiento de sistemas alimentados por hidrógeno, de modo que para 2030 la energía generada podría llegar a unos 125 TWh. Otro aspecto muy interesante del alma-

cenamiento con hidrógeno son sus bajas pérdidas, aunque el almacenamiento tenga una duración de meses (almacenamiento estacional).

5. Análisis crítico sobre la Transición Energética 2030 y conclusiones

El Plan de Energía y Clima (PNIEC) expuesto en la Sección 2 nos parece en general bien elaborado, pero al presentar metas muy exigentes, junto al hecho de la crisis de la pandemia del coronavirus, podría sufrir algunos retrasos. La implementación anual de unos de 5 000 MW de renovables en cada uno de los diez años próximos años (véase Tabla II) nos parece que se puede ver algo demorada, puesto que además se tendrán que tender nuevas líneas eléctricas, así como enganches a las redes de distribución generales. De hecho, todavía no se ha celebrado ninguna subasta después de las de los tiempos del ministro Nadal en 2016 y 2017 (8 000 MW entre eólica y solar en los dos años). Sin embargo, en unas declaraciones recientes, la ministra Ribera ha anunciado que va a publicarse en muy poco tiempo una subasta de 3 000 MW de renovables, pero podrían pasar unos tres años hasta que fuesen operativas.

Respecto al almacenamiento, nuestros estudios indican que los 2 500 MW de 2030 de la Tabla II del PNIEC pueden no ser suficientes dada la gran cantidad de renovables variables, es decir no gestionables, que habría en 2030. Además, el PNIEC, al proponer las correspondientes magnitudes de los sistemas de almacenamiento, lo hace sólo en unidades de potencia (MW), pero también se deberían suministrar las correspondientes unidades de energía (MWh) con el fin de calcular si el almacenamiento es suficiente. Por otra parte, tampoco se especifica ni el tipo ni la magnitud de cada técnica de almacenaje que se emplearía: hidro-bombeo, baterías, hidrógeno, etc.

El cierre en el período 2026-2030 de más de la mitad de los reactores existentes, sin estar todavía enteramente resuelto el problema de los desechos nucleares, nos parece que puede verse retrasado, debido a las dificultades y los costes que implican. Por otra parte, su cierre repercutiría en un aumento de emisiones de CO₂.

Un aspecto que nos parece muy factible, tal como propone el PNIEC, es la eliminación total de la generación mediante plantas de carbón, lo cual ayudará mucho en el recorte de emisiones, a pesar de que la energía correspondiente fuera substituida por los ciclos combinados de gas. España está muy bien provista de plantas de ciclos combinados de gas natural (26 612 MW, Tabla 2), los cuales tienen un *output* muy flexible; además todavía no se ha explotado suficientemente toda la potencia eléctrica que podrían suministrar.

Agradecimientos

Estudio realizado gracias al apoyo de Proyectos I+D+i «Retos de Investigación» del Programa Es-

tatal de I+D+i orientada a los retos de la sociedad. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Ref: RTI2018-100983-B-I00.

Referencias

- [1] Red Eléctrica Española, Informes anuales del Sistema Eléctrico, 2015-2019.
- [2] R. GÓMEZ-CALVET, J. M. MARTÍNEZ-DUART, y S. SERRANO-CALLE, "Current state and optimal development of the renewable electricity generation mix in Spain", *Renewable energy*, 135, 1108-1120, 2019.
- [3] European Commission, "A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050", Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions Brussels, 2010.
- [4] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, "Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC)", España, 2019.
- [5] M. DUWE, E. K. VELTEN, N. EVANS, M. FREUNDT, J. PESTIAUX, B. MARTIN y P. VERMEULEN, "Planning for net-zero: Assessing the Draft National Energy and Climate Plans", Berlín, Louvain-la-Neuve, Bruselas, 2019.
- [6] Red Eléctrica Española, "Sistema de información del operador del sistema eléctrico en España", 2020 [<https://esios.ree.es/en>] Visitado el 2020-05-10 [<https://www.esios.ree.es/en>].
- [7] F. WAGNER, "Surplus from and storage of electricity generated by intermittent sources", *Eur. Phys. J. Plus* (1), 131, 445, 2016.
- [8] R. GÓMEZ-CALVET y J. M. MARTÍNEZ-DUART, "On the Assessment of the 2030 Power Sector Transition in Spain", *Energies*, 12(7), 1369, 2019.
- [9] K. MONGIRD, V. V. Viswanathan, P. J. Balducci, M. J. E. Alam, V. Fotedar, V. S. Koritarov y B. Hadjerioua, "Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. Technical report", Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, Washington, EE. UU., 2019.
- [10] G. CRABTREE, E. KOCs y L. TRAHEY, "The Energy-storage Frontier: Lithium-ion Batteries and Beyond", *MRS Bulletin* 40(12):1067-1078, 2015.
- [11] Agora Energiewende and Sandbag, "The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition", 2020.

J. M. Martínez-Duart

Dpto. de Física Aplicada, C-XII,
Universidad Autónoma de Madrid



R. Gómez-Calvet

Dpto. de Empresa, Facultad
de Ciencias Sociales, Universidad
Europea de Valencia



Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

Experimentos con un módulo fotovoltaico

Manual Iván González Martín
Dpto. de Física, Universidad de Burgos



Tras varias décadas de titubeos, la energía solar fotovoltaica ha llegado para quedarse. Los precios de los dispositivos fotovoltaicos han caído con estrépito en la última década, y ahora mismo se cuentan entre las formas más económicas de generar electricidad, sin necesidad de recurrir a las generosas primas con que se retribuyó en el pasado a la generación eléctrica fotovoltaica en España. El nuevo marco normativo vigente facilita enormemente la conexión a la red eléctrica de instalaciones fotovoltaicas de todos los tamaños, hasta el punto de que en 2019 la producción fotovoltaica nacional creció un 18,8 %, siendo capaz de satisfacer en algunos momentos el 15 % de la demanda eléctrica peninsular [1]. Por estos motivos y por los que sin duda nos esperan en el futuro, puede ser pertinente ir adiestrando a nuestros alumnos en relación con el funcionamiento de los dispositivos fotovoltaicos.

El elemento nuclear en la generación fotovoltaica es la **célula fotovoltaica**, un dispositivo semiconductor que entrega corriente eléctrica cuando recibe luz intensa, sea de origen solar o no. Una célula fotovoltaica genera tensiones muy bajas, del orden de unas décimas de voltio en el mejor de los casos. Como estas son insuficientes para la gran mayoría de aplicaciones, se acostumbra a conectar en serie unas pocas decenas de células; el resultado es lo que se conoce como **panel o módulo fotovoltaico**.

Todo módulo fotovoltaico, antes de salir al mercado, debe ser homologado en una serie de ensayos estándar, en los que se mide su respuesta eléctrica, térmica, mecánica, etc., bajo determinadas condiciones ambientales (1.000 W/m^2 de **irradiancia**¹, 25°C de temperatura de célula, etc.). Pues bien, este trabajo presenta variantes muy simplificadas de algunos de dichos ensayos, fáciles de llevar a cabo y significativas para un estudiante de física.

Material

Se requieren los siguientes dispositivos

1. Un módulo fotovoltaico. Para laboratorios de alumnos se recomiendan módulos pequeños. Uno de 5 W de potencia, plenamente funcional, tendrá un área de captación inferior a $25 \times 20 \text{ cm}^2$ y un precio de menos de 20 € .
2. Material eléctrico común: cables de conexión, amperímetro, voltímetro, reóstato.

¹ La irradiancia G mide la energía radiante que incide sobre el módulo por unidad de tiempo y de superficie.

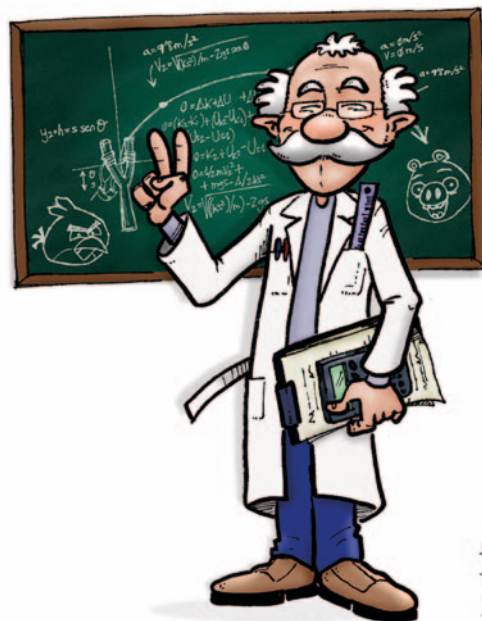


Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

3. Termómetro digital.
4. Fuente de luz. Si los ensayos se pueden realizar con luz solar directa —mejor sin cristales interpuestos— la fuente no es necesaria. En otro caso se requerirá una fuente eléctrica intensa (por intensa se entiende capaz de hacerle llegar al módulo una irradiancia no muy distinta de los 1.000 W/m^2 estándar; en la práctica, tal fuente deberá asustar un poco la primera vez que se conecte), que llamaremos **simulador solar**. La Figura 1 sugiere dos opciones: un foco halógeno de 500 W provisto de reflector o bien un grupo de lámparas LED, también con reflector, tan densamente empaquetadas como sea posible (el modelo de la figura es de bricolaje y consta de 42 lámparas de 5 W y 220 V , conectadas en paralelo [2]) y que ocupen un área al menos igual a la del módulo. El foco halógeno es mucho más barato y proporciona mayor irradiancia, pero es mucho más rico en radiación infrarroja, y en este sentido el simulador LED proporciona un espectro más similar al espectro solar. Los resultados que más adelante se presentan se han obtenido con el simulador LED.
5. **Piranómetro**. Este dispositivo mide la irradiancia G sobre el módulo. Un piranómetro de calidad tal vez sea un lujo innecesario para un laboratorio de ámbito general; sin embargo, existen en el mercado sucedáneos de coste moderado, como el que se presenta en la Figura 1 [3]. Bajo determinadas condiciones, no obstante, es posible prescindir de esta medida, como se indica a continuación.

Ensayo 0. Medida o estimación de la irradiancia

Si no disponemos de piranómetro, deberemos llevar a cabo los ensayos con luz solar real. Afortunadamente, si el día es completamente despejado y tenemos la precaución de orientar el módulo en perpendicular a los rayos solares, podremos asumir sin demasiado error [4] que la irradiancia será próxima al valor estándar 1.000 W/m^2 .

Si disponemos de piranómetro, el procedimiento es simple, y consiste en situar (Figura 2) el sensor del piranómetro sobre la superficie del módulo y a la altura de su centro. Es posible refinar el resultado midiendo en varios puntos del módulo (tal vez en el centro y en las cuatro esquinas) y dar por bueno un promedio ponderado de las lecturas obtenidas. Por otra parte, la imagen muestra claramente que el sensor

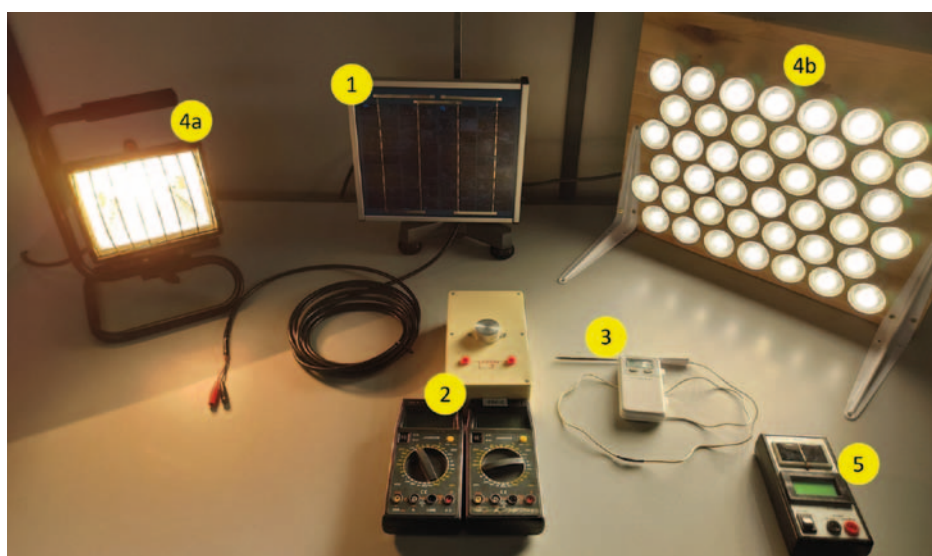


Fig. 1. Material básico necesario. (1): Módulo fotovoltaico; (2): reóstato, amperímetro y voltímetro; (3): termómetro digital; (4a): reflector halógeno o bien (4b) simulador de lámparas LED; (5): piranómetro *low-cost*. La sensación de brillo causada *in situ* por los simuladores es muy superior a la que sugiere esta fotografía.

de medida se halla unos centímetros por delante de la superficie del módulo, lo que nos obligará a corregir la distancia módulo-fuente tras llevar a cabo la medida.



Fig. 2. Medida de irradiancia G . No todos los piranómetros dan la lectura directamente en W/m^2 , pero este ejemplar sí lo hace. La parte inferior derecha de la imagen muestra una porción del simulador LED.

Ensayo 1. Curva estándar tensión-intensidad

Las características eléctricas esenciales de todo módulo fotovoltaico se encuentran codificadas en la **curva tensión-intensidad** $I(V)$, formada todos los posibles pares de valores de tensión e intensidad de corriente que el módulo entrega. El aspecto típico de la curva se muestra en la Figura 3: a tensiones bajas el módulo entrega una intensidad de corriente más o menos constante, mientras que a tensiones altas la corriente cae rápidamente. El punto de corte de la curva con el eje horizontal se denomina **tensión de circuito abierto** V_{ca} , porque es la tensión que el módulo suministra cuando no fluye corriente alguna entre sus terminales. El otro punto de corte es la **intensidad de cortocircuito** I_{cc} , denominación igualmente obvia.

La curva tensión-intensidad nos permite determinar qué tensión e intensidad entregará el módulo en condiciones reales de funcionamiento, es decir, el llamado **punto de trabajo** del módulo. El punto de trabajo depende del aparato al que el módulo alimenta en un momento dado. Como caso más simple e instructivo consideremos que se trata de una resistencia eléctrica R ordinaria, como se aprecia en el recuadro de la Fi-

gura 3. Evidentemente, la tensión entre terminales del módulo coincide con la caída de tensión en R , y la intensidad es única en el circuito. Por otra parte, la ley de Ohm para R nos dice que $I = V/R$, por lo que la curva representativa de la resistencia es una recta de pendiente $1/R$. Por consiguiente, el punto de trabajo del módulo es el punto de corte entre ambas líneas.

El primer ensayo propuesto es la elaboración de esta curva. Todo lo que se requiere es el circuito de la Figura 4, en el que los terminales del módulo se conectan al reóstato, interponiendo un amperímetro y un voltímetro en la forma estándar. Recorriendo todo el rango del cursor del reóstato vamos tabulando pares de valores (V, I) , cuya representación gráfica es la curva buscada. La tensión de circuito abierto V_{ca} es inaccesible, porque requiere una resistencia infinita; en lugar de eso, la tenemos a nuestro alcance sin más que conectar el voltímetro directamente a los terminales del módulo.

Los resultados se muestran como círculos en la Figura 5. En concreto, el ensayo que se presenta se llevó a cabo bajo una irradiancia de 390 W/m^2 . Como se aprecia, su aspecto es el mismo que se apuntó en la Figura 3. Aun así, difiere notablemente de la curva estándar, que se ha representado mediante línea continua. El motivo es que el ensayo estándar ha de llevarse a cabo bajo una irradiancia $G_0 = 1.000 \text{ W/m}^2$,

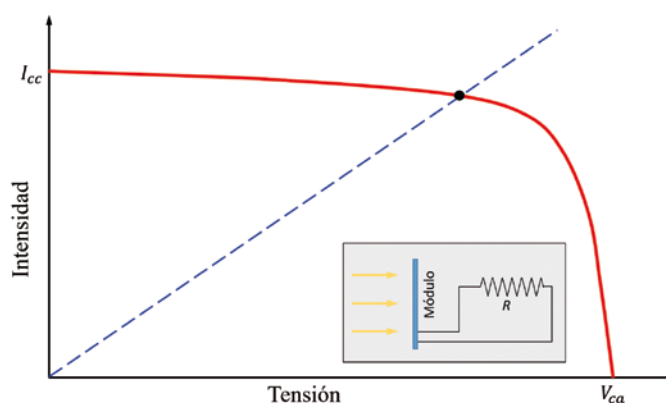


Fig. 3. (Línea continua): curva tensión-intensidad de un módulo fotovoltaico común; (recuadro) esquema de un módulo conectado a una resistencia R ; (línea discontinua): recta característica de la resistencia. El punto de corte entre ambas líneas determina la tensión e intensidad entregadas por el módulo.

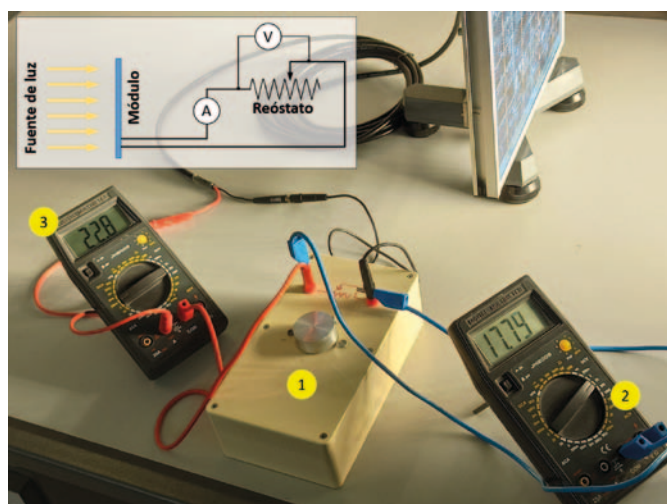


Fig. 4. Montaje para la medida de la curva V-I. El recuadro indica el esquema de conexiones. (1): Reóstato; (2): voltímetro; (3): amperímetro.

como ya se ha mencionado. La comparación es posible si se tiene en cuenta que, en primera aproximación, el módulo responde a cambios de irradiancia sin modificar la tensión en sus terminales y cambiando de forma proporcional la intensidad [5]. En otras palabras, es preciso cambiar la escala vertical de los puntos experimentales², lo que da lugar a los cuadrados de la Figura 5. Ahora sí se aprecia la similitud con la curva estándar. La discrepancia entre ambas curvas existe, pero es atribuible a factores que podríamos llamar “de segundo orden” (incertidumbres en la irradiancia experimental, diferencias de contenido espectral entre la fuente y la luz solar natural, efectos de temperatura, edad del módulo, etc.), por lo que no parece muy pertinente insistir en ella ante alumnos que no estén especialmente cualificados.

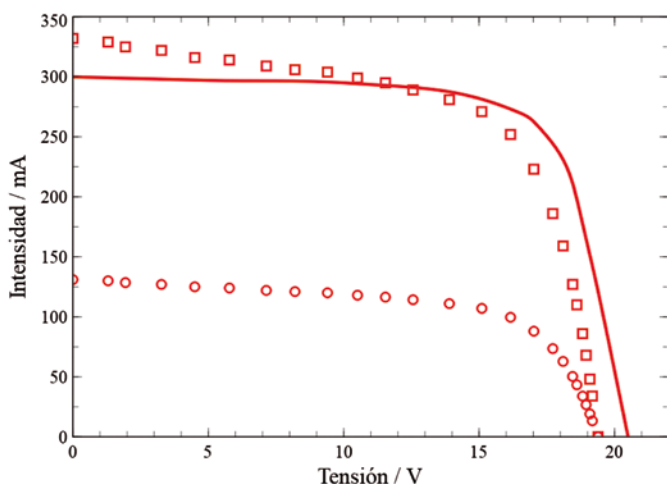


Fig. 5. Curvas I/V para el módulo objeto del ensayo. (Círculos): ensayo experimental, bajo una irradiancia $G = 390 \text{ W/m}^2$; (cuadrados): curva corregida a 1.000 W/m^2 ; (línea): curva estándar proporcionada por el fabricante del módulo.

Ensayo 2. Curva de potencia y eficiencia

Estrictamente hablando este apartado no describe un ensayo, sino un par de cálculos relevantes en relación con las ener-

gías recibida y entregada por el módulo. En primer lugar, trazaremos la llamada **curva de potencia** del módulo $P(V)$, que representa la potencia eléctrica entregada por él en función de la tensión en sus terminales. Puesto que todo módulo entrega corriente continua, la potencia es simplemente $P = I V$ y los datos tabulados del ensayo anterior nos permiten elaborar de inmediato la curva de potencia. La Figura 6 muestra los resultados en los mismos tres casos consignados en la Figura 5. Todas ellas comparten el perfil característico de los módulos fotovoltaicos: un crecimiento aproximadamente lineal a tensiones bajas, un máximo —el punto de máxima potencia, en cuyos alrededores es deseable que opere el módulo— y un desplome posterior hasta la tensión de circuito abierto.

Como es natural, la potencia máxima depende de la irradiancia y es aproximadamente proporcional a ella. En particular, la potencia máxima registrada en el ensayo estándar se denomina **potencia nominal** del módulo; es el número con unidades de potencia que el fabricante proclamará en la etiqueta, en la publicidad y en la hoja de datos de su módulo. La curva estándar de la Figura 6 indica que el ensayo fue hecho sobre un módulo de $4,5 \text{ W}$ nominales.

Una de las razones por las que la curva de potencia es importante es porque nos habla de la **eficiencia** con la que el módulo convierte energía radiante en energía eléctrica. En el ámbito fotovoltaico la eficiencia se vincula a las condiciones de máxima entrega, es decir, se entiende como eficiencia máxima. Un módulo con área de captación A sometido a una irradiancia G recibe una energía $G \cdot A$ por unidad de tiempo. Por tanto, es natural definir la eficiencia de este modo:

$$\eta = \frac{P_{\text{máx}}}{G \cdot A}$$

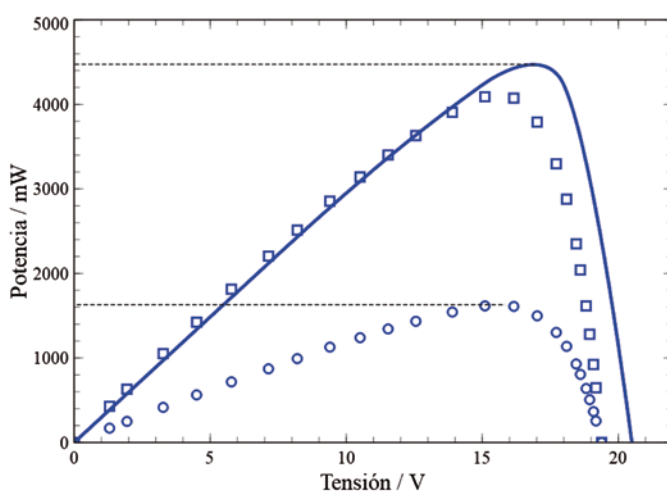


Fig. 6. Curvas $P(V)$ para el módulo objeto del ensayo. (Círculos): ensayo experimental, bajo una irradiancia $G = 390 \text{ W/m}^2$; (cuadrados): curva corregida a 1.000 W/m^2 ; (línea): curva estándar proporcionada por el fabricante. Se señalan sobre el eje vertical la potencia máxima durante el ensayo y la potencia nominal del módulo.

Teniendo en cuenta que el área de captación del módulo ensayado era de $23,5 \times 18,5 \text{ cm}^2$, la eficiencia durante el ensayo fue del $9,5 \%$, frente al $10,3 \%$ que se deduce de la curva estándar. Los módulos actuales basados en silicio rondan el 15% , bastante superior a la de nuestro ejemplar, que

² Como se indicó previamente, esta corrección no sería necesaria si el ensayo se llevó a cabo bajo luz solar natural un día despejado.

tiene más de 20 años. En todo caso, quien se aproxima por primera vez a la energía fotovoltaica suele catalogar estas cifras como decepcionantes. Así es preciso presentárselo a los alumnos: hoy por hoy solo se puede convertir en electricidad útil una fracción modesta de la energía contenida en la radiación solar.

Ensayo 3. Efectos de la temperatura

Una de las consecuencias colaterales del carácter semiconductor de los dispositivos fotovoltaicos es que, a igualdad de otros factores ambientales, la potencia que entregan decrece al aumentar la temperatura de las células que los componen. En términos coloquiales, un módulo dado genera más energía eléctrica al sol de la Antártida que en un momento igualmente soleado en el Sahara. Es muy fácil comprobar el fenómeno sin ir tan lejos, e incluso evaluarlo de forma aproximada.

El ensayo que se propone es una variante del que dio lugar a la curva tensión-intensidad, con un par de modificaciones. En primer lugar, es preciso apoyar firmemente el extremo de la sonda del termómetro contra la superficie del módulo, a fin de registrar una temperatura lo más parecida posible a la temperatura de sus células; si la sonda es voluminosa y genera sombras importantes, se puede intentar el truco de apoyarla en la superficie posterior del módulo. En segundo lugar, conviene que el módulo opere en condiciones de máxima potencia, o al menos no muy lejos de ellas, como se indicará más adelante. Nada más fácil: de los datos obtenidos en el ensayo 1 se recaba el par (V, I) que dio lugar a la máxima potencia, se calcula la resistencia y se ajusta el cursor del reóstato, con ayuda de un polímetro, hasta que tenga esa resistencia $R = V/I$; todo el ensayo se llevará a cabo en esas condiciones.

Con el mismo montaje de la Figura 4 y el módulo inicialmente a temperatura ambiente, se comienza a iluminar el módulo (bien sea con luz solar o con simulador). A medida que transcurre el tiempo la superficie del módulo se irá calentando; a intervalos más o menos fijos de temperatura anotaremos ésta, la tensión, la intensidad y su producto, la potencia. Los triángulos de la Figura 7 revelan cómo decrece la potencia a medida que el módulo se calienta.

Es común en el ámbito fotovoltaico definir un **coeficiente de temperatura para la potencia** máxima del modo siguiente:

$$\alpha_t = \frac{1}{P_{\max}} \frac{dP_{\max}}{dT},$$

donde T es la temperatura de las células del módulo. Esta definición proclama que, al menos en el intervalo en que este coeficiente se pueda considerar como constante, la potencia máxima debe variar exponencialmente con la temperatura:

$$P_{\max}(T) \approx P_{\max}(T_0) \cdot \exp[\alpha_t \cdot (T - T_0)],$$

siendo T_0 la primera de las temperaturas registradas. Desde este punto de vista tiene sentido llevar a cabo un ajuste exponencial con los puntos de la Figura 7. El aspecto de la nube de puntos también invita a un ajuste lineal; ambos modelos son buenas opciones debido a que el intervalo de temperaturas explorado es muy limitado.

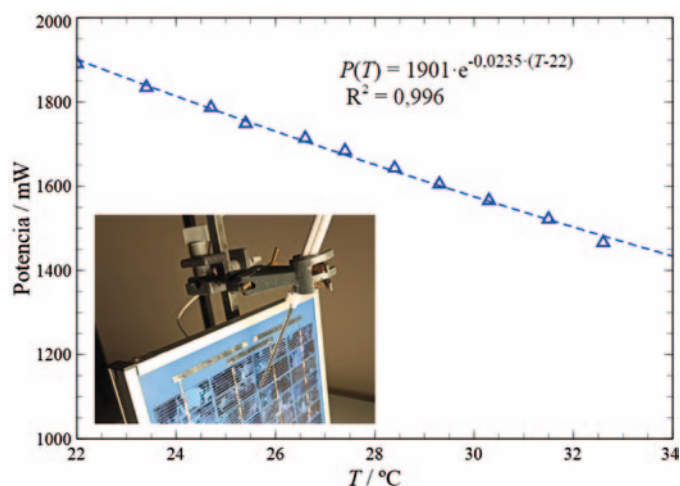


Fig. 7. Potencia en función de la temperatura en la superficie del módulo. La fotografía del recuadro sugiere una forma de apoyar el sensor del termómetro contra la superficie. (Triángulos): valores experimentales; (línea de trazos): ajuste exponencial.

El coeficiente obtenido con arreglo al modelo exponencial, $\alpha_t = 2,35 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, es claramente superior (en valor absoluto) a los valores comunes para módulos de silicio, que oscilan entre $-0,4 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y $-0,5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [6]. Aun así, no debemos ser muy severos con nuestro resultado. Para empezar, el ensayo se llevó a cabo sobre un módulo de más de dos décadas de vida; en segundo lugar, la temperatura que medimos es la temperatura en la superficie del módulo, no la de sus células; y en tercero, llevar a cabo el ensayo con resistencia fija implica que a medida que aumenta la temperatura el módulo se va apartado de sus condiciones de máxima potencia entregada.

Conclusiones

Los ensayos propuestos apenas arañan la superficie de la ciencia y la tecnología fotovoltaicas, pero pueden constituir una primera aproximación a un mundo del que, sin duda, cada vez oiremos hablar más en el futuro. El autor lleva años encomendando ensayos similares a sus alumnos de tercero o cuarto curso de ingeniería. No obstante, el nivel de los conceptos implicados (corriente y circuitos eléctricos, energía, potencia, rendimiento, etc.) es básico, lo que permite adaptarlos sin demasiadas complicaciones a primeros cursos del grado en Física y también a alumnos de Bachillerato.

Referencias

- [1] Red Eléctrica Española, nota de prensa del 23-01-2020, en <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/nota-de-prensa/2020/01/mejora-cualitativa-en-la-integracion-de-renovables-en-2019-se-conectaron-a-la-red-645-MW-de-nueva-generacion-renovable-6126-MW-mas-que-el-2018>.
- [2] M. I. GONZÁLEZ, "An LED Solar Simulator for Student Labs", *Phys. Educ.* 52 (2017). doi: 10.1088/1361-6552/aa5f86.
- [3] FREDERIKSEN, fabricante de material para laboratorios de física. <https://int.frederiksen.eu/shop/product/handheld-pyranometer-with-display-1>.
- [4] M. ORTEGA, *Energías Renovables* (Paraninfo, Thomson Learning, Madrid, 2002, pág. 33).
- [5] R. MESSENGER y J. VENTRE, *Photovoltaic Systems Engineering* (CRC Press, Boca Raton FL, 2000, pág. 43).
- [6] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/effect-of-temperature>.

Efecto Doppler de focos extensos: una propuesta experimental

Eduardo Díaz-Miguel Bermúdez
IES Salvador Rueda, Dpto. de Matemáticas
(profesor jubilado), Málaga



En el estudio habitual del efecto Doppler se asume que los cuerpos que emiten luz o sonido son puntuales. En este trabajo, sin embargo, suponemos que la fuente emisora es una superficie. Con el fin de comprobar la validez de los resultados proponemos un experimento en el que el foco sonoro es un altavoz de membrana plana que, acoplado a un péndulo de torsión, ejecuta oscilaciones armónicas.

Introducción

Uno de los ejemplos más conocidos a los que se recurre cuando se estudia el efecto Doppler sonoro es el de la sirena de una ambulancia que pasa delante de nosotros. En los esquemas explicativos (Figura 1) la sirena se asimila a un punto, F , que se mueve con velocidad \vec{v}_F . Supongamos que en O hay un observador en reposo que va recibiendo las ondas esféricas que F va emitiendo. Si v es la velocidad del sonido y α es el ángulo que forma la velocidad del foco con la dirección de observación, OF , se demuestra [1] que la relación entre las frecuencias de emisión, ν_F , y observación, ν_O , es

$$\nu_O = \frac{\nu_F}{1 - \frac{v_F}{v} \cos \alpha} = \frac{\nu_F}{1 - \frac{1}{v} \vec{v}_F \cdot \vec{n}_F}, \quad (1)$$

en donde \vec{n}_F es el vector unitario de la recta determinada por F y O .

Cuando el foco emite ondas electromagnéticas, el método utilizado [2] para deducir la relación entre dichas frecuencias se basa en considerar dos sistemas de referencia: uno de ellos, S' , es aquél en el que F está en reposo y emite con una frecuencia (frecuencia propia) igual a ν_F . S' se mueve con velocidad \vec{v}_F respecto al sistema, S , en el que el observador, O , está en reposo. Pues bien, una transformación de Lorentz entre S y S' permite llegar a la siguiente relación:

$$\nu_O = \frac{\nu_F \sqrt{1 - (v_F/c)^2}}{1 - (v_F/c) \cos \alpha}, \quad (2)$$

Para velocidades no relativistas ($v_F \ll c$) la ecuación (2) se convierte en la (1) cuando se sustituye la velocidad de la luz, c , por la del sonido, v .

En este trabajo vamos a estudiar lo que ocurriría si el foco emisor fuera un objeto, no necesariamente rígido, cuya superficie exterior vibrara con una determinada frecuencia. El procedimiento seguido para deducir el resultado principal (ecuación (3)) es similar al que empleo cuando el foco puntual se mueve en un medio no homogéneo [3].

En primer lugar establecemos la relación general entre las frecuencias de emisión y observación; después particularizamos la misma a dos casos sencillos de tratar desde el punto de vista geométrico: una fuente esférica en movimiento con radio variable y un plano que gira alrededor de un eje contenido en el mismo. Por último se propone un experimento destinado a comprobar la validez de la ecuación obtenida para el efecto Doppler del plano giratorio sonoro.

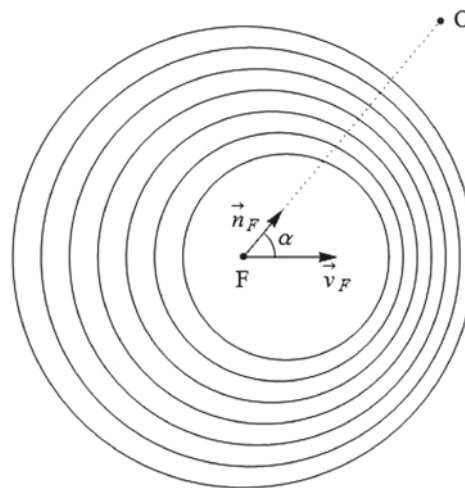


Fig. 1. Instantánea (en un cierto tiempo, t) de la configuración de siete de los frentes de onda esféricos que el foco, F , va emitiendo cada período, T , de las oscilaciones sonoras. Dichos frentes van siendo detectados por el observador O con una frecuencia distinta a la de emisión. La posición indicada del foco no es la que F tiene en el instante, t , en el que se ha tomado la fotografía, sino la que tenía cuando el frente ha recorrido la máxima distancia. Por lo tanto en esta figura F es el centro de la esfera exterior.

Efecto Doppler de un foco extenso

El foco será en lo sucesivo una superficie, $\Sigma(t_e)$, que se mueve en un medio homogéneo. El subíndice “e” (de emisión) se justifica más adelante. Cada punto, P , de la misma viene determinado por sus coordenadas curvilíneas (u, v) , que supondremos constantes durante la evolución. Por ejemplo, si la superficie móvil es esférica las coordenadas de P son su longitud y latitud respectivas. La ecuación vectorial de $\Sigma(t_e)$ es pues del tipo $\vec{x}(u, v; t_e) = \vec{f}(u, v; t_e)$ en donde \vec{f} es la función que describe la variación temporal de su forma y posición en el espacio. Para simplificar la representación he suprimido una dimensión espacial en las Figuras 2 a 4. En la número 2 aparecen tres cortes bidimensionales de Σ en los instantes sucesivos t_1 , t_2 y t_e . Se ha incluido también la trayectoria, γ_O , de un cierto punto, P_0 , cuyas coordenadas (u_0, v_0) son constantes.

El hecho de que hayamos impuesto que las coordenadas curvilíneas de los puntos de la superficie emisora se mantienen constantes a lo largo de la evolución de la misma está justificado. En efecto, en mecánica de fluidos (o de medios continuos en general) existe lo que se denomina representación lagrangiana [4], en la que se describe la posición, \vec{x}_p , de cada partícula del fluido en función del tiempo y su posición inicial: $\vec{x}_p = \vec{f}(\vec{x}_0; t)$. Las coordenadas lagrangianas son las posiciones iniciales, \vec{x}_0 , (evidentemente constantes) de cada una de las partículas que componen dicho fluido. Por otro lado, para estudiar la evolución del universo, se utilizan en

cosmología [5] las coordenadas comóviles. Se suelen denominar también acompañantes y “etiquetan” las posiciones espaciales de las partículas que componen el fluido cósmico. Por definición son constantes durante las fases de expansión o contracción que se puedan dar en el modelo cosmológico considerado. Lo que obviamente no se mantiene constante es la distancia física (distancia propia) entre las “partículas” (galaxias) de dicho modelo.

Volviendo a nuestro estudio, supongamos que en un cierto instante (de emisión), t_e , los puntos de Σ (Figura 2) se convierten en centros emisores de frentes de onda (esféricos). Si v es la velocidad de propagación de la perturbación en el medio, al cabo de un tiempo $t > t_e$ el radio de cada una de dichos frentes será $v(t - t_e)$. Según el principio de Huygens [6], el lugar geométrico de los puntos alcanzados por dicha perturbación es la envolvente de todas estas esferas: la superficie paralela [7] a $\Sigma(t_e)$ situada a una distancia $d = v(t - t_e)$ de ella (nos fijaremos únicamente en la paralela situada en el lado al que apunta el vector normal a Σ). Denominémosla $\Sigma_p(t_e; t)$ y situemos en la misma a un observador, O , cuyo vector de posición respecto a nuestro sistema de coordenadas es \vec{x}_O . A este punto de $\Sigma_p(t_e; t)$ le corresponde otro en $\Sigma(t_e)$, que vamos a denominar *foco efectivo*, F_{ef} , con vector de posición $\vec{x}_{ef}(t_e)$, de manera que O está sobre la normal a la superficie emisora en dicho punto. Por tanto $\vec{x}_O = \vec{x}_{ef}(t_e) + v(t - t_e) \vec{n}_{ef}(t_e)$ siendo \vec{n}_{ef} el vector unitario normal a $\Sigma(t_e)$ en F_{ef} . Basándonos en estas observaciones se prueba en el apéndice que la frecuencia percibida por O en instante t es

$$v(\vec{x}_O, t) = \frac{v_F}{1 - \frac{1}{v} \frac{d\vec{x}_{ef}(t_e)}{dt_e} \cdot \vec{n}_{ef}(t_e)}. \quad (3)$$

Esta ecuación, que debe compararse con la ecuación (1), es válida siempre que el término que está restando a la unidad en el denominador sea, en valor absoluto, menor que 1. A este respecto recordemos que cuando el foco es puntual su velocidad debe ser menor que la de propagación de la perturbación; en caso contrario aparecen ondas de choque [8].

Hagamos notar que las coordenadas curvilíneas del foco efectivo dependen de la posición del observador y del tiempo de emisión: $u = u(\vec{x}_O, t_e)$ y $v = v(\vec{x}_O, t_e)$; por lo tanto la derivada, $d\vec{x}_{ef}/dt_e$, que aparece en (3) no coincide con la velocidad de ningún punto cuyas coordenadas curvilíneas sean constantes, como es el caso del punto P_0 de la Figura 2.

El tiempo de emisión, t_e , se denomina en Electrodinámica tiempo retardado [2] y es igual al tiempo en el que se realiza la observación, t , menos el que tarda la perturbación en propagarse desde el foco efectivo en el instante de emisión, $F_{ef}(t_e)$, hasta el punto, O , de observación. La relación que determina en forma implícita este tiempo como función de (\vec{x}_O, t) es

$$t_e = t - |\vec{x}_O - \vec{x}_{ef}(t_e)|/v. \quad (4)$$

Como hemos indicado, dado el punto de observación, O , el foco efectivo, F_{ef} , es el punto de la superficie emisora, $\Sigma(t_e)$, tal que la recta normal en el mismo contiene a O . Su cálculo es un problema de geometría diferencial que, en general, no es inmediato. No obstante, si el foco es una esfera o un plano, la obtención de F_{ef} es sencilla y se discute a continuación.

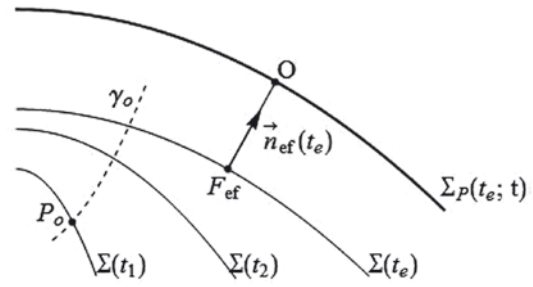


Fig. 2. Superficie emisora, Σ , (una dimensión suprimida) en tres instantes sucesivos: t_1 , t_2 y t_e . En el instante t_e los puntos de $\Sigma(t_e)$ emiten ondas esféricas elementales. Su envolvente en el tiempo t es la superficie paralela, $\Sigma(t_e; t)$, situada a una distancia de $\Sigma(t_e)$ igual a $v(t - t_e)$. Solo consideramos la envolvente situada en el lado al que apunta el vector normal. Al punto de observación, O , cuyo vector de posición es \vec{x}_O , le corresponde el que hemos denominado foco efectivo, F_{ef} , con vector de posición \vec{x}_{ef} . La trayectoria, γ_0 , es la de un cierto punto, P_0 , cuyas coordenadas (u_0, v_0) son constantes durante la evolución de la superficie.

Esfera móvil con radio variable

En la Figura 3 está representada la trayectoria, Γ , que describe el centro, C , de una esfera de radio variable, $R(t_e)$. Sea $\vec{x}_C(t_e)$ el vector de posición de C . Obsérvese en esta figura que el foco efectivo es la intersección de la esfera con la recta que une C y el punto de observación. En consecuencia

$$\vec{x}_{ef}(t_e) = \vec{x}_C(t_e) + R(t_e) \vec{n}_{ef}(t_e) \quad (5)$$

Derivando respecto a t_e :

$$\dot{\vec{x}}_{ef}(t_e) = \dot{\vec{x}}_C(t_e) + \dot{R}(t_e) \vec{n}_{ef}(t_e) + R(t_e) \dot{\vec{n}}_{ef}(t_e). \quad (6)$$

Sustituyendo (6) en (3), y teniendo en cuenta que $\vec{n}_{ef} \cdot \dot{\vec{n}}_{ef} = 0$, se obtiene la frecuencia percibida en O :

$$v(\vec{x}_O, t) = \frac{v_F}{1 - \frac{1}{v} (\vec{v}_C(t_e) \cdot \vec{n}_F(t_e) + \dot{R}(t_e))}, \quad (7)$$

en donde $\vec{v}_C = \dot{\vec{x}}_C$ es la velocidad del centro, C , y $\vec{n}_F(t_e) \equiv \vec{n}_{ef} = (\vec{x}_O - \vec{x}_{ef}(t_e))/|\vec{x}_O - \vec{x}_{ef}(t_e)|$ el vector de posición unitario del punto de observación respecto a C .

Cuando el radio es constante, $\dot{R}(t_e) = 0$, de (7) se deduce, comparando con la ecuación (1), que la frecuencia observada es la misma que habría si en lugar de una esfera tuviéramos un foco puntual que se moviese con la velocidad de C .

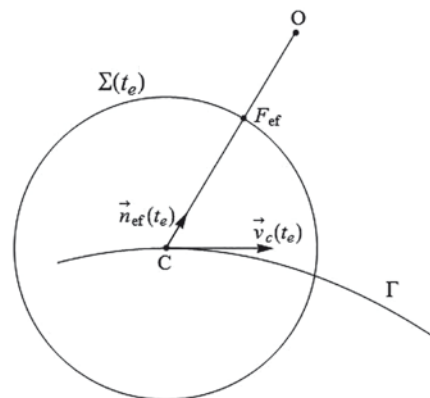


Fig. 3. Geometría del efecto Doppler de una superficie esférica móvil con radio variable.

Plano giratorio

Vamos a suponer que gira alrededor del eje Z con velocidad angular $\dot{\alpha}(t_e)$, siendo $\alpha(t_e)$ el ángulo que forma con el eje X. En la Figura 4 está representado un corte transversal en el instante t_e con el plano XY. Dada la simetría de traslación a lo largo del eje Z, podemos trabajar exclusivamente en este plano, de manera que el vector de posición de O es $\vec{x}_0 = (x_0, y_0)$ y el del foco efectivo, $\vec{x}_{ef}(t_e) = \lambda \vec{u}_{ef}(t_e)$, en donde λ es la distancia orientada de F_{ef} al origen de coordenadas. Tengamos ahora en cuenta que $\lambda = \vec{x}_0 \cdot \vec{u}_{ef}(t_e) = x_0 \cos \alpha(t_e) + y_0 \sin \alpha(t_e)$. Por otra parte el vector normal $\vec{n}_{ef}(t_e) = (-\sin \alpha(t_e), \cos \alpha(t_e))$ es perpendicular a $\vec{u}_{ef}(t_e)$, por consiguiente

$$\dot{\vec{x}}_{ef} \cdot \vec{n}_{ef} = (\dot{\lambda} \vec{u}_{ef} + \lambda \dot{\vec{u}}_{ef}) \cdot \vec{n}_{ef} = \dot{\lambda} \vec{u}_{ef} \cdot \vec{n}_{ef} = (x_0 \cos \alpha + y_0 \sin \alpha) \dot{\alpha}. \quad (8)$$

Sustituyendo (8) en (3) se obtiene

$$v(\vec{x}_0, t) = \frac{v_F}{1 - \frac{1}{v} (x_0 \cos \alpha(t_e) + y_0 \sin \alpha(t_e)) \dot{\alpha}(t_e)}. \quad (9)$$

Si el plano nunca atraviesa el punto de observación, la distancia entre éste y el foco efectivo es $D = \vec{x}_0 \cdot \vec{n}_{ef}(t_e) = -x_0 \sin \alpha(t_e) + y_0 \cos \alpha(t_e)$. Así que, según (4), el tiempo de emisión es la función implícita de \vec{x}_0 y t determinada por la ecuación

$$t_e = t - D/v = t - (-x_0 \sin \alpha(t_e) + y_0 \cos \alpha(t_e))/v.$$

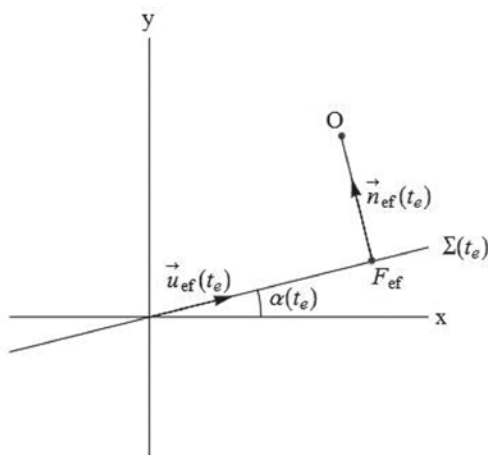


Fig. 4. Geometría del efecto Doppler de un plano giratorio.

Experimento propuesto

Un altavoz de membrana plana, que emite de forma continua una nota de cierta frecuencia, está acoplado a un péndulo de torsión que tiene la dirección del eje z (Figura 5). El plano que contiene a la membrana en reposo es el XZ y los puntos en los que se detecta la frecuencia son el A y el B. Sea $\omega = 2\pi/T$ la frecuencia angular de oscilación del péndulo y α_0 la amplitud. El ángulo del plano del altavoz con el eje X es $\alpha(t_e) = \alpha_0 \cos \omega t_e$. Los segmentos OL y OR indican las posiciones de los lados izquierdo y derecho en los instantes en los que la velocidad angular de éste es nula.

Como en la deducción de la ecuación (9) hemos supuesto un plano ideal infinito, hay que asegurarse de que los puntos de observación, A y B, están dentro de la región delimitada por las dos rectas perpendiculares a OL y OR en sus extremos y contenidas en el plano $z = 0$. Así evitamos el efecto de los

bordes. Esta observación es análoga a la que se hace cuando se calcula el campo eléctrico entre las placas de un condensador plano: el campo es perpendicular y constante en los puntos no cercanos a los bordes.

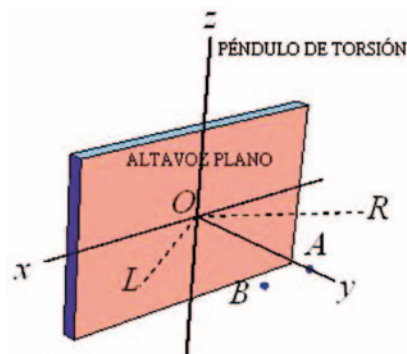


Fig. 5. Esquema del experimento destinado a comprobar la validez de la ecuación (11).

Si la distancia, D, del punto de observación, O, al plano del altavoz es del orden de un metro entonces el tiempo que tarda el sonido en recorrerla es de unas $1/340 \text{ s} \approx 3$ milésimas de segundo. Podemos entonces aproximar el tiempo de emisión por el de observación, con lo cual la ecuación (9) proporciona la frecuencia percibida en O para los instantes $t > D/v$.

$$v(x_0, y_0, t) = \frac{v_F}{1 + \frac{\omega \alpha_0}{v} (x_0 \cos(\alpha_0 \cos \omega t) + y_0 \sin(\alpha_0 \cos \omega t)) \sin \omega t}. \quad (11)$$

Se podría efectuar una aproximación más precisa que $t_e \approx t$, tal y como $t_e \approx t - D/v$; no obstante, con los puntos de observación elegidos, las curvas obtenidas no difieren apreciablemente de las proporcionadas por (11). El punto A(0, 0.5) está sobre el eje Y a una distancia $D = 0.5 \text{ m}$, y el B(0.2, 0.5) a la misma distancia que A, pero desplazado 20 cm a su izquierda (mirando al plano). El período de oscilación del péndulo es $T = 0.5 \text{ s}$ y su amplitud $\alpha_0 = \pi/6$. El altavoz de la figura tiene un metro de anchura y emite la nota la_3 ($v_F = 440 \text{ Hz}$).

En la Figura 6 se representan las frecuencias de observación proporcionadas por dicha ecuación. La recta horizontal

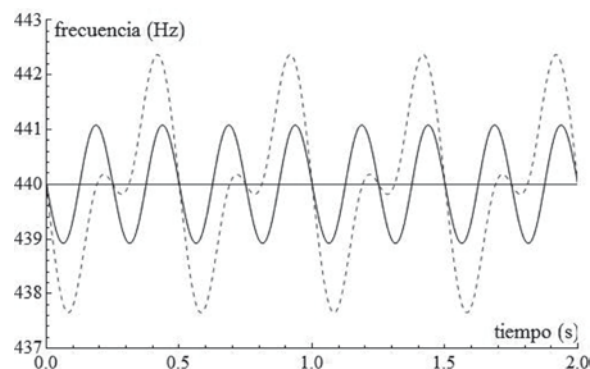


Fig. 6. La curva continua es la de la frecuencia detectada por el observador situado en A. La posición de este punto es simétrica respecto al plano del altavoz. La línea discontinua corresponde al punto B (posición asimétrica). El período de oscilación del péndulo de torsión es igual a 0.5 s, la amplitud es de $\pi/6$ rad y el altavoz emite la nota la_3 (440 Hz).

corresponde a la frecuencia de emisión. La curva continua es la de la frecuencia observada en A. Obsérvese que la frecuencia que el observador detecta en este punto varía con un período igual a la mitad del que tiene el péndulo. Esto es debido a que A está en la bisectriz de OL y OR: por cada oscilación del plano la parte que está a la derecha de A se acerca y aleja una vez, al igual lo hace, de forma simétrica, la parte a su izquierda. La frecuencia observada está en el intervalo (438.92,441.08) Hz. La curva discontinua corresponde al punto B, cuya posición es asimétrica respecto al plano del altavoz, lo que se refleja en el hecho de que el período ya no es la mitad de T, sino que coincide con él. En B la amplitud de oscilación de la frecuencia percibida es mayor que en A: (437.65,442.37) Hz.

Apéndice

La distancia entre el foco efectivo y el punto de observación (Figura 2) es $v(t - t_e)$, por lo tanto

$$|\vec{x}_0 - \vec{x}_{ef}(t_e)|^2 = v^2(t - t_e)^2. \quad (A1)$$

La superficie Σ va emitiendo frentes de onda con una frecuencia $\nu_f = 1/T$, siendo T el período; por consiguiente los tiempos de emisión vienen dados por $t_e = nT$ ($n = 1, 2, \dots$). La frecuencia, $\nu(\vec{x}_0, t)$, detectada en el instante t por el observador situado en O es el número de frentes que lo atraviesan por unidad de tiempo: $\nu(\vec{x}_0, t) = \partial n / \partial t$. El número de frente, n, viene dado en forma implícita por la ecuación que resulta de efectuar la sustitución $t_e = nT$ en (A1):

$$|\vec{x}_0 - \vec{x}_{ef}(nT)|^2 = v^2(t - nT)^2. \quad (A2)$$

Al derivar (A2) respecto a t se obtiene

$$-2(\vec{x}_0 - \vec{x}_{ef}(nT)) \cdot \frac{d\vec{x}_{ef}}{dt} \nu T = 2v^2(t - nT)(1 - \nu T). \quad (A3)$$

A continuación sustituimos la relación $\vec{x}_0 - \vec{x}_{ef}(nT) = v(t - nT)\vec{n}_{ef}$ en (A3) y se despeja ν : el resultado es la ecuación (3).

Referencias

- [1] S. BURBANO, E. BURBANO y C. GRACIA, *Física General* (Tébar, 2003, 32.ª ed.).
- [2] L. D. LANDAU y E. M. LIFSHITZ, *Teoría Clásica de los Campos* (Reverté, 1973, 2.ª ed.).
- [3] E. DÍAZ-MIGUEL, "Efecto Doppler en medios no homogéneos", *Revista Española de Física* **11** (4), 1997.
- [4] A. MOLINA, *Mecánica teórica: Mecánica Analítica y Mecánica de los Medios Continuos* (Universidad de Granada, 2014, 2.ª ed.).
- [5] J. CEPA, *Cosmología Física* (Akal, 2007).
- [6] M. BORN y E. WOLF, *Principles of Optics* (Pergamon Press, 1993).
- [7] A. GRAY, E. ABBENA y S. SIMON, *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica* (Chapman & Hall/CRC, 2006).
- [8] E. DÍAZ-MIGUEL, "La envolvente de Mach en medios no homogéneos", *Revista Española de Física* **10** (3), 1996.

La enseñanza de la Física: Una apasionante aventura a través del patrimonio de los institutos históricos

M.ª Matilde Ariza Montes

Profesora de Física y Química
IES Pedro Espinosa, Antequera, Málaga



La creación de los institutos de Segunda Enseñanza en España durante el siglo XIX fue esencial para la educación y, en particular, para la enseñanza de la Física, creando un nuevo modelo de aprendizaje experimental a través de los instrumentos científicos, diseñados en esta época de desarrollo científico y tecnológico.

Esta investigación está focalizada a la enseñanza de la Física en el siglo XIX, para tomar conciencia del rigor con el que se estudiaba esta disciplina hace una centuria y qué instrumentos científicos se utilizaban, para así explicar las diferentes leyes de la Física.

De la misma forma, se puede apreciar cómo se está investigando en un centro educativo de Enseñanza Secundaria este legado científico-histórico, poniéndolo en valor a través de su recuperación, restauración, conservación, exhibición y divulgación, lo que está concienciando al alumnado a valorarlo como pieza fundamental para el aprendizaje íntegro de la Física.

Se puede evaluar, igualmente, la inmensa contribución a la difusión de la Física que está generando el Museo Virtual del Patrimonio del IES Pedro Espinosa (MUVIPA), porque impulsa no solo la publicación de su legado científico-histórico, sino que también está patrocinando, de forma continua, actividades educativas para la transmisión del conocimiento de la Física.

Introducción

En este artículo, se presenta la evolución que ha acompañado al patrimonio científico del IES Pedro Espinosa de Antequera (Málaga) desde su creación en el año 1928 hasta la actualidad, siendo su punto de inflexión la celebración de su 75 aniversario, fecha en que se empieza a recopilar este legado olvidado, en cierto modo abandonado y deteriorado por la falta de uso que trajeron los nuevos planes de estudios de 1970.

El objetivo principal es la puesta en valor de esta herencia centenaria que posee el centro, así como su restauración, conservación y difusión. Esto se lleva a cabo mediante las investigaciones que se están realizando y su utilización en la enseñanza de la Física a través de su patrimonio.

Contexto histórico

En la década moderada del siglo XIX, período en que alcanzó la mayoría de edad Isabel II, se aprobó la Ley Pidal (1845), firmada por el ministro de Gobernación Pedro José Pidal el 17 de septiembre de 1845. Con posterioridad, se desarrollaron una serie de disposiciones, incluido el Reglamento para la

ejecución del Plan de Estudios, que irían completando la primera versión de la Ley Pidal. Se debe afirmar que Antonio Gil de Zárate fue el verdadero artífice de la implementación de la libertad de la enseñanza pública en España. En su obra *De la Instrucción Pública en España* (1852), se pueden apreciar muchas de las vicisitudes de la evolución de la enseñanza en la España de la primera mitad del siglo XIX.

Todo lo expuesto fue clave en la creación de los primeros institutos de Segunda Enseñanza, a partir de 1845, para albergar al alumnado que debía prepararse para la universidad, una vez que había terminado sus estudios de Enseñanza Primaria. Son los denominados **institutos históricos**, que ocuparon edificios significativos, procedentes, en algunos casos, de los afectados por la desamortización de Mendizábal. A lo largo de toda la geografía española, se creó un centro educativo por cada provincia como respuesta a la demanda del número de alumnado, a excepción de la capital de España, donde se crearon cuatro institutos por razones obvias. Hay que resaltar que todos los institutos no se crearon en el mismo año, sino que se fueron fundando paulatinamente hasta completar todas las provincias españolas.

El 17 de julio de 1857, Isabel II firmaba la Ley de bases, autorizando al Gobierno para formar y promulgar una Ley de Instrucción Pública, que daría lugar a la Ley Moyano, vigente durante más de una centuria. Por otra parte, la política educativa durante la dictadura de Primo de Rivera amplió en 1926 en una veintena el número de institutos de Segunda Enseñanza repartidos por toda la geografía española.

Legado científico-histórico del IES Pedro Espinosa

El apogeo económico del siglo XIX en Antequera se vio reflejado en la creación del Instituto Municipal San Luis Gonzaga en 1871, donde sólo se podía impartir el Bachillerato Elemental. Disponía de gabinetes de Física y Química y de Historia Natural, así como materiales para la enseñanza de la Geografía y las Matemáticas. Más tarde, el Plan "Callejo" daría paso a la creación del Instituto de Antequera en 1928 que pasó a denominarse Instituto Nacional Pedro Espinosa en honor al poeta barroco antequerano.

Con motivo del 75 aniversario de la creación del IES Pedro Espinosa, se llevó a cabo la primera actuación de puesta en valor de su patrimonio científico, durante el curso 2002/2003 por Francisco Callejón Ródenas, profesor de Física y Química, que fue el encargado de la recuperación de muchos de los instrumentos científicos. El siguiente curso 2003/2004, se siguió por la que suscribe con la puesta en marcha de la exposición permanente de los instrumentos científicos.

En los siguientes años, fue aumentando la puesta en valor de otros instrumentos científicos y de distintos materiales pertenecientes al legado científico-histórico, relacionados con la Química, la Historia Natural y las Humanidades. Esto corresponde a las investigaciones que se están publicando, destacadamente, en las Jornadas Nacionales de Institutos Históricos. En ellas, se presentan los avances e investigaciones científicas que estos centros educativos, pertenecientes a toda la geografía española, están realizando y cuya finalidad es aunar esfuerzos para que este patrimonio esté en el lugar que le corresponde, desde sus edificios históricos hasta sus colecciones científicas, sin olvidar sus bibliotecas y las personas que allí formaron y se formaron.



Fig. 1. Exposición del patrimonio en la VI Jornada Científica del IES Pedro Espinosa.

Hasta la publicación de este artículo, el IES Pedro Espinosa ha contribuido con 16 comunicaciones en las 13 ediciones que ya se han realizado de las Jornadas Nacionales de Institutos Históricos, enfocadas a la utilización del patrimonio en la enseñanza de la Física y la Química, principalmente.

También, el departamento de Física y Química del IES Pedro Espinosa lideró la participación en los proyectos ARCE, donde trabajó con los institutos históricos IES Zorrilla, de Valladolid, IES El Greco, de Toledo, y el IES San Isidro, de Madrid, bajo los títulos "Aprender a través del patrimonio de los institutos históricos" (2009-2011) y "Enseñamos nuestra historia y difundimos nuestro patrimonio" (2011-2013). El denominador común del patrimonio se vio enriquecido por las visitas e intercambios con alumnado y profesorado en los cuatro centros implicados, creando una conciencia museística entre los más jóvenes y fomentando el amor por la conservación de los materiales de nuestros antepasados, que han hecho posible una enseñanza más experimental.

En la misma línea, también hay que destacar la participación en el Programa PIISA (Programa de Iniciación a la Investigación e Innovación en Secundaria en Andalucía) durante los cursos 2014/2015 y 2015/2016, realizándose en este segundo curso la investigación "Estudio de los instrumentos científicos del siglo XIX en el Museo Virtual del Patrimonio del IES Pedro Espinosa como laboratorio histórico", donde se realizó la catalogación definitiva de los mismos.

La oportunidad de recuperar esos instrumentos y, a la vez, hacer que la mayoría de ellos volviera a tener utilidad, tal como la tuvieron en su época, fue uno de los objetivos que se planteó para evitar que ese material se perdiera, se deteriorara o se olvidara cada vez más.

Una forma de divulgar el legado científico: la creación del MUVIPA

La creación del **Museo Virtual del Patrimonio del IES Pedro Espinosa (MUVIPA)** nace en marzo de 2015 como continuación del trabajo, que se venía realizando desde el curso 2003/04, de catalogación y recuperación del patrimonio del centro. Está disponible en el enlace <http://museovirtualespedroespinosa.blogspot.com/>

Por una parte, no hay espacio para exponer el patrimonio del instituto en su edificio y, por otra parte, se debe crear

Tabla 1. Relación de algunos Instrumentos científicos centenarios del IES Pedro Espinosa por categorías

Categorías	Instrumentos científicos centenarios del IES Pedro Espinosa
Acústica	Aparato de Savart, bocina, martillo de agua, oscilador de Trevelyan, placas de Chladni, resonador de bocina, sonómetro
Astronomía	Aros de aplanamiento, esfera celeste, máquina centrífuga de Salleron, máquina centrífuga de Weinhold y accesorios, péndulo de Foucault
Calor	Alambique, anillo de 's Gravesande, aparato de Ingenhousz, hipsómetro de Régnault, máquina de vapor de Watt, pirómetro de Van Musschenbroek
Electromagnetismo	Arco voltaico, botella de Leiden, campanario eléctrico, electróforo de Volta, esfera centelleante, pila de Volta, telégrafo de Breguet
Hidrostática	Bomba aspirante-impelente, hemisferios de Magdeburgo, manómetro de Bourdon, máquina neumática de Bianchi, piezómetro de Oersted
Mecánica	Articulación Cardan, doble cono de Nollet, grúa, péndulo de Galileo o de agujé, plano inclinado, rueda dentada, torno diferencial
Meteorología	Barógrafo registrador de Richard, barómetro aneroide o de Vidie, barómetro de Fortin, higrómetro de Daniell, psicrómetro de August
Metrología	Agrimensur, colección de las medidas de capacidad, balanza de precisión, balanza de Roberval, decímetro cúbico, areómetro de Baumé
Óptica	Aparato de Müller de la reflexión, cámara oscura, espejo cóncavo, lente cónica, microscopio Nachet, refractómetro de Abbe

este espacio virtual para que cualquier persona con interés en nuestro legado tenga acceso al mismo, dando a conocer las actividades que se realizan en torno a él.

El formato del MUVIPA tiene la originalidad de que está pensado especialmente para hacer hincapié en la participación activa del alumnado, ya que con este museo virtual se puede completar cualquier asignatura que se está cursando en el instituto.

Paralelamente, este mismo alumnado investiga para aportar al MUVIPA su estudio o exploración desde cualquier óptica de este patrimonio, clave en su avance científico-histórico, utilizando las TIC tan imprescindibles en la actualidad. En definitiva, se han puesto en marcha los denominados “Científicos I+D+i del IES Pedro Espinosa”, que están no sólo investigando, sino desarrollando e innovando nuevas propuestas para mejorar la utilidad de estos instrumentos científicos centenarios, al mismo tiempo que se han convertido en guardianes, custodiando y poniendo en valor este legado.

Está estructurado como los institutos de Segunda Enseñanza nacidos en el siglo XIX, por lo que consta de un gabinete de Física, un gabinete de Química y un gabinete de Historia Natural, además de otras dependencias relacionadas con el estudio de los materiales vinculados a las Humanidades y los fondos bibliográficos. Además se ha introducido una sección nominada “Noticias”, en la que se incluyen las novedades que está generando el patrimonio del IES Pedro Espinosa, tanto en los medios de comunicación como los referentes a las investigaciones realizadas sobre su material, destacando también los enlaces referentes a la RSEF, la RSEQ y la ANDPIH, para fomentar, asimismo, la enseñanza de la Física y de la Química, así como del patrimonio de los institutos históricos.

Respecto al gabinete de Física publicado en el MUVIPA, se ha dividido en torno a las ramas que existían en el siglo XIX de esta ciencia y que conciernen a la **Acústica**, la **Astronomía**, el **Calor**, el **Electromagnetismo**, la **Hidrostática**, la **Mecánica**, la **Meteorología**, la **Metrología** y la **Óptica**. En cada uno de estos apartados, se encuentran fotos, fichas y vídeos de los instrumentos mencionados. Se han fotografiado una vez que han sido limpiados, medidas sus dimensiones, datados, estudiada su composición, qué científico los diseñó, qué ley física permiten comprobar, para qué se utilizan, qué constructor los creó, qué político los acogió, qué universidad los abaló, en qué país ocurrió, entre otras preguntas.

Hasta el momento, están catalogadas más de 500 piezas entre instrumentos científicos, paneles, sustancias químicas, minerales, modelos anatómicos y mapas del siglo XIX y principios del XX. Esta catalogación se inició como propuesta en el marco de las investigaciones del programa PIISA, relativa a la Historia de la Ciencia. Los instrumentos científicos se clasificaron en diez categorías correspondientes a su utilización para lo que fueron diseñados. Así se pueden distinguir instrumentos relacionados con la medida (01), el estudio y la demostración de una ley (02), lo tecnológico o el modelo tecnológico (03), la producción de agentes físicos (04), el uso no científico o cotidiano (05), lo recreativo (06), el modelo didáctico (07), lo auxiliar (piezas auxiliares) (08), el multiuso (09) y la investigación (10). Esto es consecuencia del modelo de clasificación que existía en los libros de Física del siglo XIX.

El número de catalogación asignado en el MUVIPA consta de tres o cuatro números, correspondientes al año de catalogación, a la categoría, al orden alfabético del instrumento dentro de su categoría y al número de piezas, siendo este último opcional.

Este trabajo se puede apreciar en el libro *Apostando por las vocaciones científicas desde la Educación Secundaria. Oportunidades mediante investigaciones con el programa SCIENCE-IES (PIISA)*, publicado en el ámbito de Innovación Educativa por la Universidad de Málaga en 2017.

Utilización del Patrimonio en el IES Pedro Espinosa

El funcionamiento de los instrumentos científicos centenarios permite medir magnitudes físicas, descubrir leyes físicas e investigar sobre fenómenos físicos, sin olvidar su función como modelos didácticos o productores de agentes físicos. Fueron diseñados por relevantes constructores franceses y destacados fabricantes alemanes del siglo XIX, a los que le siguieron los primeros fabricantes españoles de primeros del siglo XX. En la Tabla 1 se pueden apreciar algunos de los instrumentos del siglo XIX que alberga el patrimonio del IES Pedro Espinosa.

En los albores de la enseñanza de la Física en Secundaria, son piezas clave los **instrumentos de medida o Metrología**, por los que el alumnado en los primeros cursos de Física y Química, por ejemplo, puede apreciar la *colección de las medidas de capacidad para aceite, leche, vino y áridos*, afian-



Fig. 2. Algunos instrumentos científicos del patrimonio del IES Pedro Espinosa de Metrología, Mecánica y Astronomía.

zando el sistema métrico decimal de 1790, al mismo tiempo que aprenden sobre la comisión definitiva para sugerir este nuevo sistema, donde participaron el físico Coulomb y el químico Lavoisier. La medida de la masa es otra magnitud física de relevancia y que permite poner en valor balanzas como la *balanza de Roberval* y aprender que la diseñó el físico y matemático francés, Gilles Personne (1602-1675), quien la bautizó como su localidad natal. Fue la primera balanza proyectada con los platillos arriba, lo que la hacía más cómoda para la medida de la masa. El alumnado, en clase, puede apreciar la diferencia con las balanzas de precisión de la época y compararla con las balanzas de hoy día, mucho más precisas pero más impersonales, puede estimar su artesanía y cómo sus constructores permitieron la medida de la masa desde aquella época hasta nuestros días.

Otro material estrella, utilizado en el laboratorio, es el densímetro, que permite al alumnado aprender el concepto de densidad con la utilización de los pesa-leches, pesa-vinos o pesa-orinas a partir de *alcoholímetros de Cartier y Gay-Lussac*, *areómetros de Baumé y Nicholson* y la amplia colección de densímetros con los que cuenta el instituto.

Piezas imprescindibles en el estudio de la **Mecánica** son los instrumentos que facilitan la comprensión de los tipos de movimiento y las leyes de la Dinámica. En estos casos, cabe mencionar la utilización del *plano inclinado*, que permite estudiar experimentalmente las condiciones de equilibrio variando la inclinación del plano que se mide en una escala graduada. Destacable es el *engranaje o rueda dentada*, cuyo mecanismo se utiliza en la transmisión del movimiento rotatorio y del movimiento de torsión entre ejes. El abad y físico francés Jean Antoine Nollet también aportó en el siglo XVIII el diseño del *doble cono de Nollet*, que, al igual que el *cilindro ascendente*, explica que la estabilidad de un cuerpo corresponde a la posición más baja de su centro de gravedad. El *péndulo de retardo de Galileo o de aguja*, que capacita el estudio de la velocidad de un cuerpo cuando cae, por el principio de conservación de la energía, ilustra las clases de Dinámica en la ESO y Bachillerato. Cabe resaltar el *aparato de Weinhold*

para la **Mecánica de sólidos**, compuesto por un conjunto de poleas, que proporciona el estudio de muchos ensayos relacionados con esta máquina simple. Todo ello posibilita que el alumnado de Física tome conciencia de las leyes de la Física a partir del patrimonio, proporcionando al mismo tiempo investigaciones y diseño de experiencias que realimentan cada uno de los fenómenos físicos estudiados.

En el estudio del campo gravitatorio, toma relevancia la **Astronomía**, donde se utiliza la *máquina centrífuga de Weinhold* y todos sus *accesorios*, que demuestran el achatamiento de la Tierra, la fuerza centrípeta o la rotación de la Tierra, ilustrado perfectamente con el *péndulo de Foucault*. La utilización de este material acerca al alumnado a la emoción de percibir que los procesos que ocurren en la naturaleza se pueden reproducir con un diseño apropiado, como ya lo hacían los constructores científicos del siglo XIX. Tampoco se puede olvidar la *esfera celeste* para explicar tanto la rotación como la traslación de los cuerpos celestes, al mismo tiempo que puede visualizarse el comportamiento de la Luna, que, al no producirse su movimiento en el plano de los planetas y el Sol, hace posible que el alumnado perciba claramente el fenómeno de los eclipses.

Son clave en el estudio de los gases, la presión, el volumen y la temperatura, conceptos que en **Hidrostática** pueden desencadenar otros muchos estudios del comportamiento de los líquidos y los gases. Cabe mencionar el *diseño de los hemisferios de Magdeburgo* por el físico y jurista alemán, Otto von Guericke, que demuestran la existencia del vacío. Es elemental recalcar la importancia en la vida diaria del *ariete hidráulico o golpe de ariete*, porque estudia la sobrepresión que se puede producir en una tubería por una interrupción brusca del flujo, de ahí la relevancia del diseño de las instalaciones hidráulicas. Otro instrumento a tener en cuenta es el *manómetro de Bourdon*, que permite explicar el funcionamiento de los manómetros aneroides. Adquiere mucha consideración la *máquina neumática de Bianchi*, diseñada a partir de los trabajos del ingeniero inglés Henry Albert Fleuss por la empresa italiana Bianchi, que es la más antigua del mundo en la fabricación de bicicletas, con las dos ruedas del mismo tamaño de



Fig. 3. Algunos instrumentos científicos del patrimonio del IES Pedro Espinosa de Hidrostática, Meteorología y Electromagnetismo.

radio y fabricadas con neumáticos de goma. Cabe señalar la *bomba aspirante-impelente*, que es empleada en la elevación de líquidos debido al efecto de la presión atmosférica. Todos estos estudios se pueden completar con la ilustración del *tubo de Newton*, diseñado para demostrar la existencia del vacío.

Un capítulo aparte lo constituye el estudio de la propia atmósfera o **Meteorología**, y que en el instituto se ve avalado por instrumentos tales como termómetros, incluido el *termómetro de Six de máxima y mínima*, *barógrafo registrador de Richard*, *barómetros de sifón de Gay-Lussac*, *barómetro de Fortin*, *barómetros aneroide o de Vidie*, *higrómetro de Daniell* o *psicrómetro de August*. Estos instrumentos centenarios se utilizaron en el estudio de la Meteorología de Antequera, durante el curso 2013/2014, así como cuando se organizan exposiciones o, con carácter excepcional, en alguna clase para el estudio de los gases.

Los temas relacionados con el **Electromagnetismo** se ven ilustrados con la apreciación de los instrumentos centenarios, como la *botella de Leiden*, diseñada por el físico holandés Pieter van Musschenbroek, profesor en la Universidad de Leiden, y primer dispositivo inventado para almacenar carga eléctrica, siendo, por tanto, el primer condensador de la historia. Es también destacable la *pila de Volta*, que en 1800 cautivó a Napoleón cuando vio que este aparato era capaz de transformar la energía química en eléctrica. Digno de mención es el *telégrafo de Breguet*, desarrollado por Louis François Clément Bréguet hacia 1845, que revolucionó las comunicaciones a grandes distancias de forma instantánea en el siglo XIX. Son remarcables, de la misma forma, las investigaciones realizadas, como la del curso 2013/2014, con motivo del I Centenario del átomo de Bohr, en el que se hicieron diferentes espectros utilizando el *espectroscopio de Bunsen y Kirchhoff*, el *carrete de Ruhmkorff* y distintos *tubos de descarga*, de tal manera que el alumnado aprendió el significado del espectro electromagnético perfectamente. Tampoco pasa desapercibida la puesta en marcha de la *máquina de Wimshurst* en las clases relacionadas con la Electroestática, que sirven de ilustración a los conceptos de atracción y repulsión entre las cargas.

En el capítulo del **Calor** se emplean instrumentos tales como el *baño María*, que permite calentar por debajo del punto de ebullición del agua, el *alambique*, que es pieza clave en las destilaciones, el *anillo de 's Gravesande*, que demuestra la dilatación de los cuerpos, o el *pirómetro de cuadrante*, diseñado por Pieter van Musschenbroek, que percibe la dilatación lineal de los sólidos metálicos. Citas obligadas son el *higrómetro de Regnault*, que determina la temperatura de 0 °C, o el *modelo de la máquina de vapor de Watt*, que ilustra la teoría de la entrada de vapor a través del funcionamiento de un émbolo, cuando se acciona con una manivela. Para finalizar mencionar al *regulador de Watt*, que es capaz de controlar la velocidad angular de un motor, modulando la cantidad de vapor admitido.

Es un clásico, en las clases de **Acústica**, la utilización de los *sonómetros*, que permiten el estudio cuantitativo del sonido, las *bocinas*, responsables de la amplificación del sonido, que ya Napoleón utilizaba para transmitir a sus tropas órdenes a unos cuantos kilómetros, o los diapasones, tan precisos en el afinado de los instrumentos musicales y cuyo diseño actual data de 1711, cuando John Store, jefe de trompetas al servicio del rey Jorge I de Inglaterra, lo modificó respecto a los antiguos diapasones. Tampoco se debe olvidar el *oscilador de Trevelyan*, que es el primer instrumento capaz de transformar el calor en sonido, una vez que se calienta con un soplete. Es interesante destacar el *martillo de agua*, que emite un especial estruendo al agitarlo, debido a que no hay aire dentro del tubo de vidrio que lo forma y toda el agua se deja caer al mismo tiempo. Acentuar la aportación en las clases de ondas de las *placas de Chladni*, que destacan por su sencillez y facilidad con la que el alumnado puede observar los vientres y los nodos que el sonido produce cuando la arena se desplaza al tocar la placa de Chladni con un arco de violín.

En lo que respecta a la **Óptica**, el alumnado aprende las leyes de Snell con la utilización de los *aparatos de la reflexión y de la refracción de Müller*, que permiten el cálculo de los índices de refracción de distintos materiales. Al mismo tiempo, se puede hacer uso de la *cámara oscura*, también reproducida

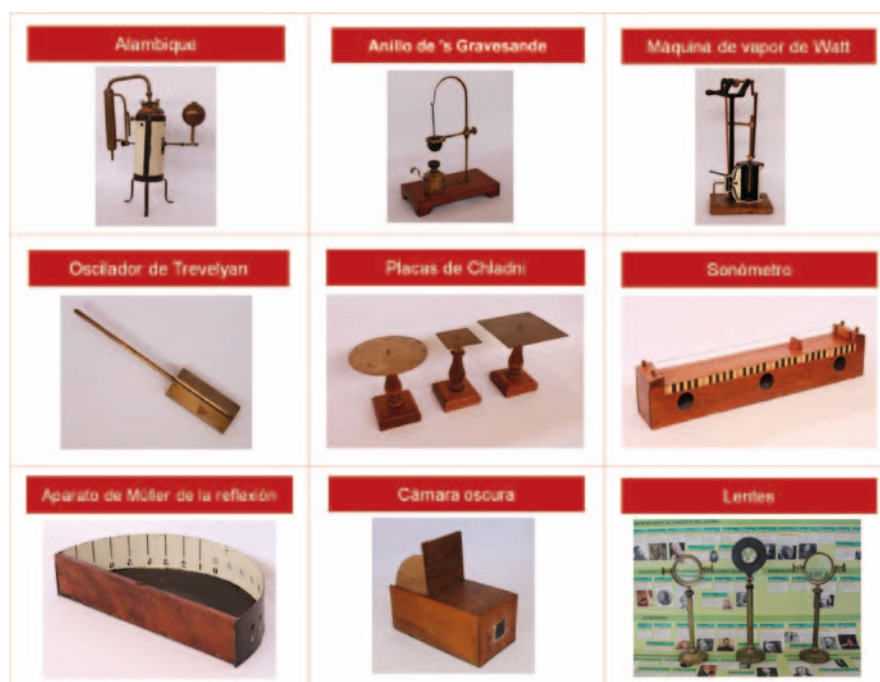


Fig. 4. Algunos instrumentos científicos del patrimonio del IES Pedro Espinosa de Calor, Acústica y Óptica.

por el alumnado tanto de la ESO como de Bachillerato en las clases de Física, en la que aprenden el funcionamiento del que se considera el padre de la cámara fotográfica. A un nivel más avanzado de la Óptica, se utilizan los *espejos planos, cóncavos y convexos* y las *lentes convergente, divergente y cónica* para detectar las imágenes, así como para estudiar cualitativa y cuantitativamente sus características. No se debe olvidar la utilización en las clases de Óptica del *disco cromático de Newton* para explicar la luz blanca como resultado de los siete colores del arco iris, el *microscopio Nachet*, empleado para examinar objetos transparentes, o las *pinzas de turmalina* que recrean la doble refracción.

Hay que matizar que la utilización de los instrumentos científico-históricos se hace en clases muy determinadas y, sobre todo, se emplean para las diferentes investigaciones que se realizan bajo el marco de los distintos proyectos en los que está inmerso el IES Pedro Espinosa.

Cada una de las investigaciones realizadas no solo versa sobre la historia de la ciencia implicada, sino del conocimiento cuantitativo, que emana de los datos obtenidos con las medidas realizadas con estos instrumentos científicos centenarios.

Desde la creación del MUVIPA en 2015, se celebra en nuestro instituto la "Jornada Científica", a modo de una feria de la Ciencia, para celebrar San Alberto Magno, y son los llamados "científicos en acción", alumnos del bachillerato científico, quienes explican las leyes y el funcionamiento de los instrumentos científicos que se exponen. Esta búsqueda ha permitido fomentar el conocimiento de muchos de los conceptos relacionados con la Física que se estudian en los currículos de la ESO y Bachillerato, creando en muchos casos vocaciones científicas en las nuevas generaciones.

Conclusiones

Los institutos de Segunda Enseñanza creados a partir de 1845 contribuyeron al desarrollo, avance y florecimiento de nuestra actual sociedad científico-tecnológica, ya que facilitaron un elenco de instrumentos científicos que han sido piezas clave en la elaboración de los aparatos de la sociedad actual.

La herencia científico-histórica del IES Pedro Espinosa está considerada como un inmenso tesoro que nos identifica, donde el alumnado ha aprendido que hay que protegerlo, conservarlo y difundirlo para que también las próximas generaciones puedan beneficiarse en el camino hacia el conocimiento de la Física.

En este párrafo final, quiero señalar mi más sincero agradecimiento a José María Pastor Benavides, catedrático emérito de Educación Secundaria, por sus oportunos comentarios en la revisión de este artículo, guiado por su conocimiento e interés sobre el patrimonio de los instrumentos científicos con que se enseñaba la Física en los institutos históricos.

Referencias

- [1] M. M. ARIZA MONTES, "Museo Virtual del Patrimonio del IES Pedro Espinosa", 2015 [<http://museovirtualiespedroespinosa.blogspot.com.es/>] (consultado el 14 de enero de 2020).
- [2] F. GIRES, *L'Empire de la Physique* (Gabinet de Physique du Lycée Guez de Balzac d'Angoulême. Association de Sauvegarde et d'Étude des Instruments Scientifiques et Techniques de l'Enseignement [ASEISTE], Niort, 2006).
- [3] Asociación Nacional para la Defensa del Patrimonio de los Institutos Históricos (ANDPIH). [<http://www.asociacioninstitutos-historicos.org/>] (consultado el 19 de marzo de 2020).
- [4] J. I. CRUZ OROZCO, "Los institutos de Segunda Enseñanza en España. Datos sobre su implantación", *Educatio Siglo XXI*, vol. 30, 233-252, 2012.
- [5] M. FERNÁNDEZ PARADAS y V. M. HEREDIA FLORES, "La Segunda Enseñanza en Antequera (1844-1928): los colegios de San Luis Gonzaga", *Revista de Estudios Antequeranos* 4, 1996, 81-178.
- [6] E. ORTEGA y A. PAREJO, *El Instituto Pedro Espinosa de Antequera: sus primeros años (1928-1934)* (Ayuntamiento de Antequera, 1992).
- [7] C. ROMERO BENÍTEZ, "Historia de un olvido: patrimonio en los centros escolares. Centros escolares con patrimonio. IES Pedro Espinosa. Antequera (Málaga)", *CEE Participación Educativa*, 7, marzo de 2008, pp. 79-85.

Lord Robert May of Oxford: Un científico excepcional que buscó la sencillez de lo complejo

Miguel Ángel Fernández Sanjuán

Supo estar en el momento y en el lugar oportuno para desarrollar sus grandes talentos al servicio de la ciencia, mediante una solida formación en física teórica y matemáticas que le permitieron realizar trabajos pioneros en diversas disciplinas.

Robert McCredie May, Lord May of Oxford, físico y uno de los pioneros en ecología teórica y teoría del caos, falleció el pasado 28 de abril de 2020 a la edad de 84 años en Oxford de una neumonía complicada por la enfermedad de Alzheimer.

Se consideraba a sí mismo, con cierta ironía, como un científico con poca capacidad de atención, que le gustaba llegar en el momento preciso a un campo de investigación cuando consideraba que aún se podían hacer cosas interesantes, sencillas e importantes. Siempre pensaba que todo era menos interesante cuando el campo crece, pues se vuelve más una cuestión de elaboración y sistemática. También era de la opinión de que su carrera científica había sido “accidental”, en el sentido de que todo había sido una secuencia de accidentes, sin duda afortunados, que le fueron llevando de un lugar a otro. Accidental fue también graduarse en física, así como hacer un doctorado en física teórica. Posteriormente, también fue en cierto modo accidental su encuentro con la ecología teórica, la teoría del caos, la estabilidad de los sistemas bancarios, la epidemiología del SIDA, el control de enfermedades infecciosas, de igual modo que el importante papel que jugó en la promoción de la ciencia en los importantes cargos de servicio público que le tocó desempeñar.

Había nacido el 8 de enero de 1938 en Sídney, Australia. Tras los estudios secundarios y tras destacar en el equipo de debate de la escuela, descartó posibles carreras en derecho y medicina, y decidió obtener un título en ingeniería química en la Universidad de Sídney (1953), como es natural por influencia de un buen profesor. Sus éxitos en los exámenes de química, matemáticas y física le hicieron ganar premios en química y física, lo que le llevó a abandonar la ingeniería química, para especializarse finalmente en matemática pura, matemática aplicada y física. Tras completar con éxito su año de honores en física (1956) y graduarse en ingeniería química y en física teórica, decidió seguir una carrera en ciencias.

Un ingrediente esencial en su carrera científica fueron en última instancia las matemáticas, pues le permitían pensar

cosas complicadas, preguntarse por las posibles simplicidades ocultas en ellas y así expresar sus ideas en términos matemáticos, para finalmente analizar las consecuencias de manera que se puedan comprobar. Pensaba que las habilidades de debate fueron lo principal que se llevó de la escuela, y que se trataba tal vez de un talento infravalorado en la ciencia. Se consideraba razonablemente bueno para hacer las cosas que hacía, pero también razonablemente bueno para presentarlas de manera que resultaran interesantes a la audiencia, una cualidad muy importante en la ciencia.

La física fue uno de los primeros y muchos accidentes afortunados que dieron forma a su vida. Se le daba bien hacer exámenes, los cuales tomaba como juegos. De modo que llamó la atención de su profesor de física, Harry Messel, quien jugó un papel decisivo en su camino en esta disciplina. Harry Messel había sido precisamente artífice de atraer a la Universidad de Sídney a un trío mundial de físicos teóricos. Uno de ellos fue su director de tesis, Robbie Schafroth, que había sido estudiante y ayudante de Wolfgang Pauli. Luego estaba Stuart Butler, quien obtuvo su doctorado en el grupo de Rudolph Peierls, que estaba en Birmingham después de la guerra con Freeman Dyson. El tercero era John Blatt, que acababa de escribir con su director de tesis Victor Weisskopf (primer director general del CERN) el texto definitivo de su generación sobre física nuclear.

Después de su graduación en física, Robert May decidió hacer su doctorado también en física en la Universidad de Sídney trabajando en superconductividad bajo la dirección de Robbie Schafroth, que había demostrado las propiedades superconductoras de un gas ideal de bosones cargados. El objetivo de su tesis era demostrar la unión efectiva de pares de electrones, que serían bosones. Como es bien sabido, los físicos Bardeen, Cooper y Schrieffer superaron al grupo de Sídney y fueron galardonados con el Premio Nobel de Física en 1972. Robbie Schafroth tuvo una enorme influencia sobre él, pero falleció en un accidente de avioneta, lo que le impidió seguirle a la cátedra de física teórica en Ginebra, tal y como estaba previsto, y, en opinión de May, a recibir el Nobel, compartido con dos de los que realmente lo obtuvieron.

Robert May fue Presidente de la Royal Society durante el 2000 y el 2005.



Tras completar su tesis en 1959, decidió salir de Australia y se fue junto con Max Krook a la División de Ingeniería y Física Aplicada de la Universidad de Harvard como Gordon MacKay Lecturer en Matemática Aplicada (1959-61). Fue en ese periodo cuando conoció a su esposa, Judith, que siempre consideró el “accidente” más importante en su vida. Allí entabló también una buena relación entre otros con Gerald Guralnik, quien fue uno de los descubridores del mecanismo de Higgs, junto con Carl R. Hagen y Tom Kibble.

May regresó a la Universidad de Sídney a finales de 1961 como *Senior Lecturer* en el Departamento de Física. En 1964 fue nombrado *Reader* y en 1969 recibió una de las dos primeras *Personal Professorships* establecidas en la Universidad de Sídney. En esos años, en parte como resultado de su participación en el movimiento recién formado para la responsabilidad social en la ciencia, desarrolló un interés particular en la dinámica de poblaciones y en la relación entre la complejidad y la estabilidad en los ecosistemas naturales. Estas inquietudes fueron muy apoyadas por Harry Messel, quien le animó a conectar ideas de física con la biología. La ecología era una disciplina por aquel entonces muy joven y de naturaleza descriptiva, con muy poco de teoría.

Desarrolló aún más estos intereses durante un periodo sabático de 18 meses, que disfrutó primero en el Reino Unido y luego en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton en torno a 1971, donde se produjo un punto de inflexión en su carrera. Charles Birch, biólogo de la Universidad de Sídney y uno de los fundadores del movimiento recién formado para la responsabilidad social en la ciencia en Australia en los años 60 del siglo pasado, le había puesto en contacto con Richard Southwood, del Imperial College de Londres, y con Robert MacArthur, en Princeton. Ocurrió algo extraordinario en Princeton en su entrevista con Robert MacArthur, que era con-

siderado como el arquitecto fundamental de la ecología teórica. MacArthur le comentó que buscaba atraer para Princeton a Jared Diamond, que estaba en UCLA, pero al parecer no le apetecía trasladarse, de modo que le preguntó si le interesaría ocupar su cátedra. A May le pareció una oferta asombrosa, pero la rechazó, ya que quería volver a Australia y seguir trabajando en física.

La mayoría de los ecólogos del momento creían que un ecosistema más diverso sería más estable que uno menos diverso, lo que implicaría que las poblaciones de las especies en el ecosistema más diverso variarían menos de un año a otro. Precisamente el primer trabajo que realizó en ecología resultó ser una de las aportaciones más importantes que hizo en investigación, donde elaboró un modelo matemático de ecosistema en el que las interacciones fuertes entre especies pueden llegar a disminuir su estabilidad general. Demostró una generalización de un teorema de física debido a Wigner, que hoy día recibe el nombre de teorema de May-Wigner, de gran relevancia en el futuro desarrollo de la ecología¹.

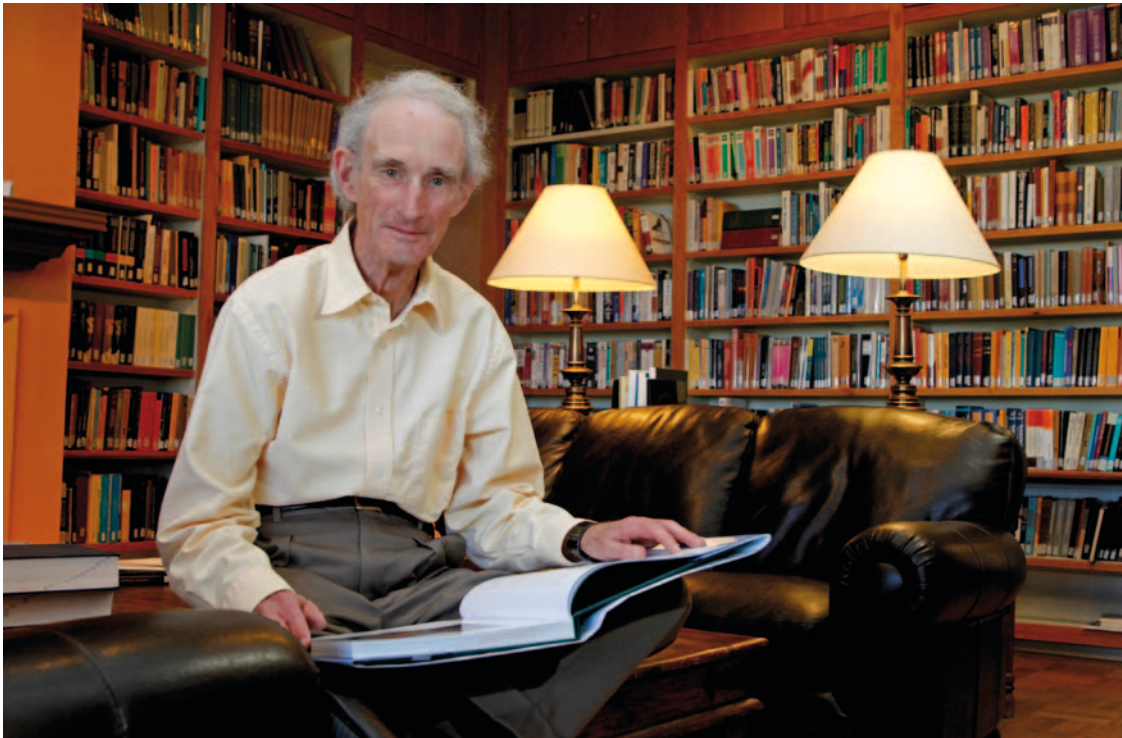
Regresó a Sídney y escribió la monografía sobre estabilidad y complejidad en modelos de ecosistemas² siguiendo la recomendación de Robert MacArthur, que pronto se convirtió en la fuente más importante en ecología teórica. Asimismo, se fue convenciendo de que su camino en investigación era la ecología matemática, aprovechando la ocasión de haberse topado con ella en su época dorada para hacer teoría.

Finalmente, en 1973 cambió de idea y decidió aceptar la cátedra en el Departamento de Biología de la Universidad de Princeton, donde estuvo 16 años y donde supo utilizar sus habilidades como físico teórico para hacer grandes avances en el campo de la biología de las poblaciones. Durante las siguientes tres décadas, estas herramientas se extendieron aún más al estudio de las enfermedades infecciosas y de la biodiversidad. Durante los últimos 11 años que estuvo allí, de 1977 a 1988, también fue presidente de la Junta de Investigación de la Universidad, lo que equivaldría a vicerrector de investigación en cualquier otra universidad. Pudo compaginar esa dedicación, cuya carga de trabajo era de día y medio por semana, con lo que fue el periodo más productivo de su vida científica.

A diferencia de lo que ocurre en casi todas las ciencias físicas, donde las ecuaciones diferenciales juegan un papel esencial, comenzó a estudiar ecuaciones en diferencias, en particular la ecuación logística, y se interesó por entender la estabilidad de las soluciones en dinámica de poblaciones, encontrando situaciones muy complicadas para regio-

¹ Robert M. May, “Will a Large Complex System be Stable?”, *Nature* 238, 413-414 (1972).

² Robert M. May, *Stability and Complexity in Model Ecosystems* (Princeton University Press, 1973).



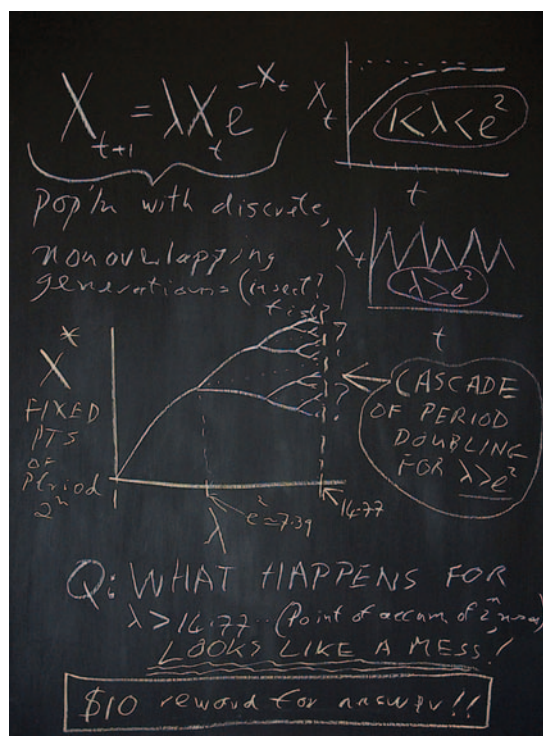
Robert May en el Instituto de Santa Fe (EE. UU.). (Foto cortesía de Jenna Marshall del Instituto de Santa Fe).

nes donde la tasa de crecimiento era grande. Había observado que para cierto rango de parámetros aparecían soluciones estables cuya periodicidad se doblaba, para después encontrarse con regiones que no entendía por su extraño comportamiento³.

Paralelamente, en una tarde de marzo de 1973, el matemático de origen chino Tien-Yien Li apareció en el despacho del matemático americano Jim Yorke quien le propuso una idea que le había rondado en su cabeza por mucho tiempo sin haberla podido demostrar por completo. Dos semanas después, Tien-Yien Li, manipulando hábilmente sus técnicas de cálculo, demostró lo que ahora se conoce como el teorema de Li-Yorke. Enviaron el artículo para su publicación al *American Mathematical Monthly*, pero fue rechazado y el editor les pidió a los autores que lo reescribieran y tuvieran en cuenta que un estudiante pudiera entenderlo. En ese periodo Tien-Yien Li estaba ocupado en investigar otro tema, de modo que el artículo permaneció intacto en su escritorio durante casi un año.

El Departamento de Matemáticas de la Universidad de Maryland había escogido el año 1974 como un “año especial” dedicado a la biomatemática, de modo que se invitaba a los mejores académicos en el campo a dar conferencias cada semana. En la primera semana de mayo, se invitó a Robert May a dar una serie de seminarios durante toda la semana. El último día habló sobre la aplicación logística e informó sobre el comportamiento dinámico complicado de sus secuencias de iteración sin poder explicarlo, pensando que quizá se trataba de algo generado por errores

de cálculo. En el seminario se encontraba Jim Yorke, quien expresó que sabía lo que ocurría, y de camino al aeropuerto le pasó el artículo con el resultado del teorema de Li-Yorke que había permanecido en el escritorio durante casi un año. May se sorprendió al leer la conclusión del artículo y reconoció que este teorema explicaba completamente sus incertidumbres. De inmediato, Yorke regresó del aeropuerto y contactó con Li, sugiriéndole reescribir el artículo lo antes posible, logrando finalmente que se publicara en el número de diciembre de 1975. En el artículo



Reproducción de la pizarra que escribió en el pasillo del Departamento de Física Teórica de la Universidad de Sídney en 1972 que ilustra el comportamiento de la aplicación logística (crédito: <https://www.mhs.ox.ac.uk/blackboard/may.htm>).

³ Robert M. May, <https://www.mhs.ox.ac.uk/blackboard/may-text.htm>



Robert May junto a la Reina de Inglaterra en 2002, cuando recibió la Orden del Mérito.

titulado “Period Three Implies Chaos”⁴ se acuñó el término “caos” y se introdujo por primera vez una definición matemática del caos.

Robert May entendía lo que pasaba en la región de doblamiento de periodo y Jim Yorke entendía lo que ocurría en el régimen caótico. Posteriormente, May escribió su famoso artículo “Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics”⁵, que envió a *Nature*. El artículo fue inicialmente rechazado por ser demasiado matemático. Sin embargo, uno de los editores principales, Miranda Robertson, lo revisó y pidió que se enviara a John Maynard Smith, cuyo entusiasta apoyo hizo que finalmente se publicara en 1976.

Su influencia en el desarrollo de la teoría del caos, de la dinámica no lineal y de la teoría de la complejidad ha sido enorme. En dicho artículo May concluía: “No solo en investigación, sino también en el mundo cotidiano de la política y la economía, todos estaríamos mejor si más personas se dieran cuenta de que los sistemas no lineales sencillos no necesariamente poseen propiedades dinámicas sencillas.”

En 1988 May se trasladó a Gran Bretaña, para ocupar un puesto conjunto como profesor de investigación de la Royal Society en la Universidad de Oxford y en el Imperial College, cuando Richard Southwood se trasladó también a Oxford desde el Imperial College donde se encontraba por aquel entonces. En esos años ocupó cargos políticos importantes como Asesor Científico Principal del Gobierno del Reino Unido y jefe de su Oficina de Ciencia y Tecnología entre 1995 y 2000, bajo el mandato de John Major y Tony Blair, y posteriormente fue Presidente de la Royal Society entre 2000 y 2005, de la que era miembro desde 1971.

Otro accidente afortunado ocurrió en 2006, y de manera muy profética, mucho antes de la crisis económica. El Banco de la Reserva Federal de Nueva York y la Academia Nacional de Ciencias de

EE. UU. formaron un grupo de estudio para intentar comprender los efectos sistémicos relacionados con las finanzas, grupo en el que Robert May participó junto con su antiguo estudiante George Sugihara y el matemático y ecólogo Simon Levin, de Princeton. Los tres escribieron el artículo “Ecology for Bankers”⁶, que se publicó en *Nature*. En los últimos años de su vida estuvo precisamente ocupado de este tipo de cuestiones relacionadas con el riesgo sistémico en finanzas junto con personas del Banco de Inglaterra. En particular, escribió un artículo en *Nature*⁷ en colaboración con el economista jefe Andrew Haldane, donde aconsejaban a los Gobiernos sobre cómo evitar futuros colapsos financieros.

A lo largo de su vida, Robert May recibió numerosos reconocimientos, incluido el de Caballero en 1996, Compañero de la Orden de Australia en 1998, Lord May of Oxford en 2001 y la Orden del Mérito en 2002. Fue miembro de numerosas academias: The Royal Society, Academia Australiana de Ciencias, Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, Academia Europæa y de la Royal Society de Nueva Gales del Sur. Obtuvo numerosos títulos honoríficos de muchas universidades y muchos premios. Cuando falleció era profesor emérito en la Universidad de Oxford y miembro del Merton College.

Era de la opinión de que la ciencia, y en particular las matemáticas, realmente no son más que una forma de pensar con claridad, y que un buen bagaje en física teórica te permite hacer cualquier cosa. Su trabajo sobre el número reproductivo básico de una enfermedad (R_0)⁸ y los métodos de modelización de enfermedades han sido claves en el esfuerzo global actual para controlar la COVID-19.

Las contribuciones de Robert May en física, ecología teórica, teoría del caos, epidemiología, biodiversidad, análisis del riesgo sistémico en finanzas y su incansable dedicación al servicio público de la ciencia fueron absolutamente extraordinarios. Sin duda, se nos ha ido uno de los grandes científicos del siglo xx.

Miguel Ángel Fernández Sanjuán
Universidad Rey Juan Carlos



⁶ Robert M. May, Simon Levin y George Sugihara, “Ecology for Bankers”, *Nature* 451, 893-894 (2008).

⁷ Andrew Haldane y Robert M. May, “Systemic Risk in Banking Ecosystems”, *Nature* 469, 351-355 (2011).

⁸ Robert M. May, “Estimating r : A Pedagogical Note”, *The American Naturalist* 110, 496-499 (1976). J. A. P. Heesterbeek, “A Brief History of R_0 and a Recipe for its Calculation”, *Acta Biotheoretica* 50, 189-204 (2002).

Puntos de interés

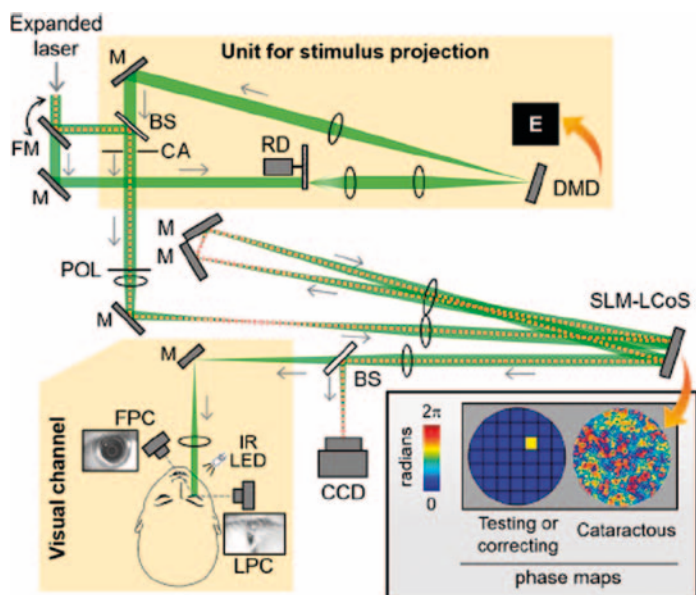
Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica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

CORRECCIÓN DE LAS CATARATAS MEDIANTE MANIPULACIÓN DE LA FASE

Las cataratas son la primera causa reversible de ceguera en el mundo. Se caracterizan por la opacificación del cristalino, originada en los cambios físicos y químicos de sus proteínas. El efecto en las imágenes en la retina son el emborronamiento y reducción del contraste, particularmente

es posible elegir entre la cirugía y la corrección óptica, es también de interés diseñar un **procedimiento no invasivo, fundamentado en el uso de técnicas ópticas para la corrección de las cataratas.**

En un artículo publicado en *Optica* (DOI: doi.org/10.1364/OPTICA.7.000022), los investigadores del Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia, Augusto Arias y Pablo Artal, evaluaron las capacidades y limitaciones de una técnica óptica de manipu-



Esquema del sistema experimental empleado e imágenes de una letra E antes y después de la corrección.

en presencia de fuentes de luz deslumbrantes, dificultando la severamente la visión. El tratamiento estándar, y muy exitoso, de las cataratas es la cirugía, donde el cristalino afectado es extraído y reemplazado por una lente intraocular. Aunque este es un procedimiento rutinario en los países desarrollados, **sigue habiendo un gran número de personas en el mundo que no tienen acceso a esta cirugía.** De la misma manera que en la corrección de la miopía

lación del frente de onda, conocida como “*wavefront shaping*”, en la mitigación de los efectos de las cataratas en la visión. Este tipo de técnica había sido previamente implementada en microscopía para aumentar la capacidad de penetración de la luz en medios turbulentos.

En el desarrollo de esta investigación, los autores diseñaron un **sistema experimental para generar y corregir simultáneamente el efecto de las cataratas de manera realista.** La corrección consistió en la adaptación iterativa de los retrasos del frente de onda representativo de los ojos cataratosos para mejorar la calidad de la

¹ Sección preparada por Augusto Beléndez, en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.



imagen en la retina. El sistema permite la observación de test visuales bajo los efectos simulados de cataratas y su corrección, permitiendo la evaluación de la calidad visual en voluntarios.

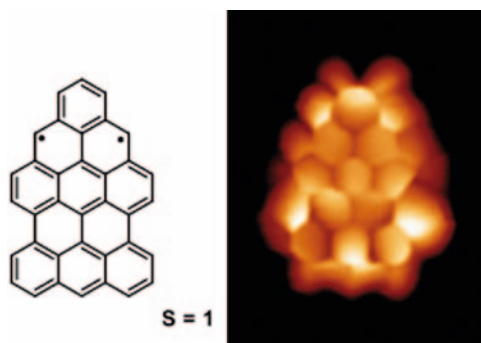
Los resultados, según Augusto Arias, “demuestran que la técnica *wavefront shaping* recuperaría la agudeza visual con letras de alto contraste en los pacientes cataratosos, independientemente de su severidad, pero la mejora del contraste en las imágenes sería menor”. A consecuencia de lo anterior, si un corrector basado en esta técnica se usara en exteriores, un velo de luz de los objetos brillantes no permitiría apreciar las mejoras en la resolución. Por ello, los autores sugirieron que las imágenes pudieran ser “simplifi-

cadas” antes de ser proyectadas a través del corrector. “Imaginamos un sistema de realidad virtual adjunto al corrector, que registre las escenas en frente del paciente, y, tras un procesado, elimine las fuentes de deslumbramiento”, explica Arias.

Los hallazgos de esta investigación permitirán, además, **entender el impacto de resultados en estudios similares sobre la calidad visual.** “Teniendo en mente los umbrales encontrados sobre la capacidad de la técnica, estamos estudiando su implementación *in vivo*”, añade el Prof. Artal. Esta investigación se enmarca en el proyecto del Consejo Europeo de Investigación SeeCat.

ORIGAMI MAGNÉTICO CON GRAFENO

El grafeno es un material diamagnético, esto significa que **no le gusta el magnetismo, y se muestra reacio a magnetizarse**. Y a pesar de esto, la teoría predice que una estructura triangular de este material podría llegar a ser magnética. Esta aparente contradicción es consecuencia de que para ciertas for-



mas “mágicas” del grafeno los electrones parecen “girar” más fácilmente en una dirección determinada, forma coloquial para decir que tienen un mismo espín, y con ello lo vuelven magnético.

Un **triánguleno es una estructura triangular de grafeno donde las predicciones afirmaban que se puede conseguir un estado magnético puro**. En otras palabras, es como un imán de dimensiones nanométricas. Dotar al grafeno de magnetismo abre perspectivas fascinantes en su aplicación en tecnologías cuánticas, por ejemplo.

Sin embargo, a pesar de la rotundidad de las predicciones sobre el estado magnético del triánguleno, hasta la fecha no existían pruebas experimentales claras del mismo. Por un lado, la producción de triánguleno por métodos de síntesis orgánica en solución es muy difícil, porque el carácter bi-radical de esta molécula hace que sea muy reactiva. Además, parece que su magnetismo es extremadamente esquivo en los pocos casos en los que se han estudiado con éxito.

Un nuevo estudio publicado en la revista científica *Physical Review Letters* (Doi: PhysRevLett.124.177201) ha retomado este reto utilizando un microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés) y ha demostrado que un trozo triangular de grafeno, de apenas 36 átomos, tiene un momento magnético.

En este estudio se fabricó la pieza de grafeno triangular (ver en la figura), con precisión atómica, sobre una superficie

de oro limpia mediante una reacción química *in situ* (en el microscopio). Medidas de espectroscopía de efecto túnel revelaron que este compuesto posee un estado magnético neto caracterizado por un espín $S = 1$ y que, por lo tanto, **esta molécula es un pequeño “paraimán” de carbono puro**. Es más, mediante la manipulación atómica, los investigadores pudieron extraer átomos de hidrógeno de algunas moléculas “contaminadas” y observaron cómo sus propiedades magnéticas emergían.

Al contrario que un imán macroscópico, un “paraimán” **no tiene polos bien definidos debido a su pequeño tamaño**. Por ello, la detección de su estado magnético no podía realizarse con técnicas más convencionales de espectroscopía, donde la orientación del magnetismo del imán pudiera facilitar su detección. En este trabajo, la prueba experimental de su estado magnético fue obtenida mediante la detección del efecto Kondo multicanal —una versión “exótica” del efecto Kondo tradicional descrito en los años 60— y que puede surgir en sistemas magnéticos complejos.

Su observación en una estructura triangular de grafeno, de apenas 36 átomos de carbono, puede abrir todo un horizonte en nuestra comprensión del origen de este novel magnetismo, que utiliza electrones deslocalizados de las bandas π del grafeno.

ABSORCIÓN NO-LINEAL Y RESOLUCIÓN EN LA FABRICACIÓN CON LÁSERES ULTRACORTOS

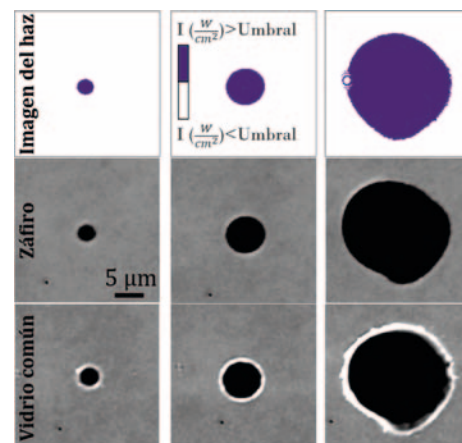
En mayo hemos celebrado el 60 aniversario del primer láser. En estas seis décadas ha quedado ampliamente demostrada la importancia y aplicabilidad de esta tecnología en los más diversos campos.

Uno de los campos en los que el láser se utiliza habitualmente es en la **modificación precisa de materiales**, con intereses tan diversos como la cirugía refractiva ocular o la fabricación de microestructuras tridimensionales. En particular, el uso de pulsos ultracortos, cuya duración es menor al picosegundo, ha permitido unos niveles de calidad en la fabricación sin precedentes. Además, a esto se le añade la peculiaridad

única de que **con pulsos ultracortos se pueden modificar materiales que son transparentes a la radiación incidente**, gracias a los **procesos de absorción no lineal de la luz** que cobran importancia debido a las altísimas potencias de pico características de estos pulsos.

En este contexto, el confinamiento espacial de **la absorción no-lineal ha demostrado ser crucial en la resolución alcanzada en técnicas avanzadas de microscopía**, superando incluso el límite de difracción. Nuestra intuición, por tanto, ha llevado a asimilar que los mismos beneficios de resolución se producen al modificar materiales transparentes con pulsos ultracortos.

Sin embargo, en un artículo publicado en *Optics Letters* (<https://doi.org/10.1364/OL.382610>) se ha demostrado que **el concepto de resolución no-lineal no es aplicable en el proceso de microfabricación con láser**. En este trabajo, realizado en el Laboratoire LP3



de Marsella (Francia), se demuestra que **el tamaño de los cráteres se predice a partir de la forma espacial del haz incidente, sin necesidad de tener en cuenta la naturaleza no lineal de la absorción**. Como señala el Dr. Mario García Lechuga, “A diferencia de la fluorescencia, observable en la microscopía no-lineal, el fenómeno de la ablación del material no es proporcional a la absorción. Para inducir dicha ablación **no sólo es necesario absorber luz, sino superar un determinado umbral de irradiancia absorbida**”.

Así pues, el único criterio que define la resolución es el perfil del rayo láser incidente. Esta observación es importante porque el mecanizado con láser ultracorto ha seguido una dirección opuesta a la de la litografía, mientras que ambos se rigen por los mismos principios ópti-

cos. Así, la litografía utiliza la radiación ultravioleta extrema, mientras el infrarrojo es el dominante en los láseres ultracortos. **Este trabajo indica que los niveles de resolución alcanzados por la fotolitografía se podrían conseguir mediante el uso de pulsos ultracortos en el ultravioleta**, con potenciales aplicaciones como la nanocirugía del ADN y el procesamiento de nanomateriales.

TRANSPORTE DE EXCITONES EN PEROVSKITAS 2D: VISUALIZACIÓN DEL FLUJO DE ENERGÍA EN UN SEMICONDUCTOR BLANDO

Una década después de su descubrimiento, las células solares basadas en perovskitas de haluro metálico se han posicionado a la cabeza de las células solares de unión única más eficientes, rivalizando incluso con el silicio cristalino. Sin embargo, un ingrediente clave que falta en las perovskitas es la estabilidad química. **Una ruta prometedora para abordar el problema de la estabilidad es el uso de perovskitas de dimensiones inferiores, como las perovskitas bidimensionales (2D)**, que muestran una mejor resistencia a la

rea Alcázar-Cano, Marc Meléndez, Tim J. Lubbers, Sanne W. Walraven, Sahar Pakdel, Elsa Prada, Rafael Delgado-Buscalioni y Ferry Prins, del Centro de Física de la Materia Condensada (IFIMAC) de la Universidad Autónoma de Madrid, **han visualizado directamente el transporte de excitones en perovskitas 2D** utilizando microscopía de fotoluminiscencia transitoria (TPLM). Los resultados muestran que **los excitones experimentan una difusión rápida inicial** a través del plano cristalino, **seguida de un régimen subdifusivo más lento** a medida que los excitones quedan atrapados. Curiosamente, el régimen de transporte lento limitado por la presencia de trampas desaparece a intensidades de iluminación más altas. Utilizando modelos teóricos, los autores encuentran que esto puede explicarse por un comportamiento de llenado de dichas trampas. Sin embargo, el hallazgo más importante de este estudio es que **la difusividad intrínseca temprana depende notablemente del tipo de espaciador orgánico** usado para separar las láminas inorgánicas en las perovskitas 2D. Entre los espaciadores orgánicos comúnmente utilizados (fenetilamonio y butilamonio), **las difusividades y las longitudes de difusión difieren tanto como en un orden de magnitud**. Estos cambios están estrechamente relacionados con **variaciones en la rigidez de la red**, lo que sugiere un **papel dominante del acoplamiento excitón-fonón y de la formación excitón-polarón en la dinámica espacial de los excitones en estos materiales**. Los descubrimientos

aportados por este estudio proporcionan una estrategia de diseño clara para mejorar el rendimiento de las células solares y los dispositivos emisores de luz basados en perovskitas 2D.

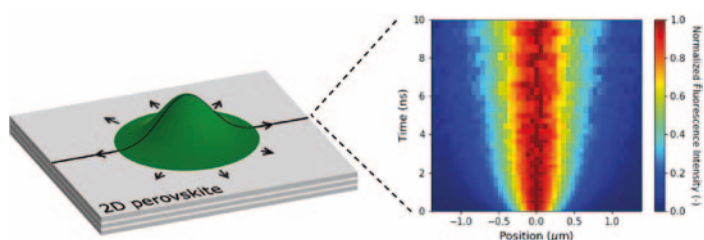
BUSCANDO NEUTRINOS CÓSMICOS EN LA ANTÁRTIDA Y EN EL MEDITERRÁNEO

Los neutrinos, al ser partículas neutras que solo interactúan débilmente, **son mensajeros cósmicos ideales**: escapan de entornos

densos y viajan largas distancias sin ser desviados por los campos magnéticos interestelares, lo que permite apuntar a sus sitios de producción. Gracias a estas propiedades, **los neutrinos pueden proporcionar las pistas que faltan para revelar el origen de los rayos cósmicos**, enigma que permanece en gran parte sin resolver más de cien años después de su descubrimiento. Sin embargo, **sus propiedades también los hacen muy difíciles de detectar**. Los experimentos que los buscan **transforman grandes volúmenes de hielo o agua en un detector de partículas**, desplegando en el medio detectores ópticos para observar la luz emitida por las partículas secundarias producidas en las interacciones de los neutrinos. Uno de ellos es **IceCube**, que cuenta con más de 5.000 detectores ópticos en un kilómetro cúbico de hielo de la Antártida. Otro es **ANTARES**, que tiene cerca de 1.000 detectores en el fondo del mar Mediterráneo, junto a la costa francesa.

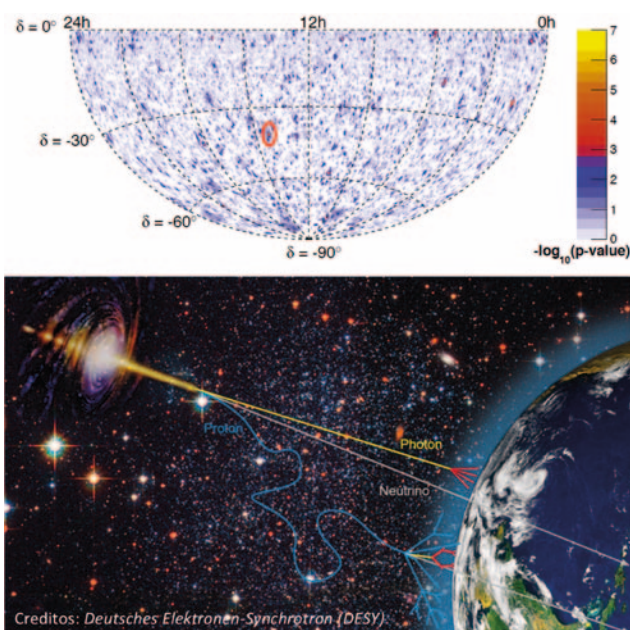
Un **estudio conjunto de los experimentos IceCube y ANTARES para buscar neutrinos de origen astrofísico**, publicado en la revista *The Astrophysical Journal* (DOI: 10.3847/1538-4357/ab7afb), ha sido llevado a cabo por Giulia Illuminati, investigadora predoctoral del Instituto de Física Corpuscular (IFIC, CSIC-Universitat de València), centro de investigación que lidera la participación española en ANTARES y su sucesor, KM3NeT. “La razón para hacer esto es que **los dos telescopios se complementan** gracias a sus diferentes características, en particular el mayor volumen de IceCube y la vista privilegiada del cielo del Hemisferio Sur de ANTARES”, explica Illuminati.

El estudio consta de cinco análisis diferentes: una exploración completa del cielo del Hemisferio Sur y de una región restringida alrededor del centro de nuestra galaxia, donde se cree que hay un agujero negro supermasivo, una búsqueda en la dirección de 57 objetos astrofísicos conocidos por su emisión de rayos gamma (a la que se asocia también la producción de neutrinos) y el análisis de dos candidatos prometedores a ser fuentes de neutrinos: Sagitario A* (fuente asociada al agujero negro supermasivo del centro de la Vía Láctea) y el remanente de supernova RXJ 1713.7-3946.



degradación que las fases 3D convencionales. La dimensionalidad reducida, sin embargo, altera significativamente las propiedades fotofísicas de las perovskitas. En lugar de actuar como portadores libres, los electrones y los huecos están unidos entre sí y viajan a través del material como pares neutros llamados excitones. Para garantizar que cada fotón absorbido contribuya a la generación de energía en una célula solar, los excitones deben difundirse lo suficiente como para llegar a los sitios de separación de carga.

En un trabajo publicado en la revista *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-020-15882-w), los investigadores Michael Seitz, Alvaro J. Magdaleno, Ne-



Aunque los análisis no encontraron ninguna emisión significativa de neutrinos cósmicos, han demostrado el potencial que supone realizar búsquedas conjuntas con ambos experimentos. “Para descubrir una fuente de neutrinos **en el área del centro galáctico solo necesitaríamos observar la mitad del flujo de neutrinos** en comparación con lo que cada experimento debe observar por separado”, asegura la investigadora del IFIC. Con la puesta en marcha de KM3NeT, que desplegará más de 10.000 sensores en el Mediterráneo y cuyas primeras líneas ya se han instalado, y la próxima ampliación de IceCube, los análisis conjuntos serán clave para el descubrimiento de las fuentes de neutrinos cósmicos.

HACIA LA INGENIERÍA DE POLÍMEROS METÁLICOS

Los polímeros metálicos, o metales orgánicos, son **polímeros orgánicos que presentan una gran conductividad eléctrica al ser dopados química o electro-químicamente**. Las ventajas de los polímeros conductores respecto a otros materiales conductores son varias, entre otras pueden ser fácilmente procesados a un coste moderado y son ligeros. La investigación en polímeros metálicos fue iniciada con la síntesis del poliacetileno, un polímero que al doparse (añadir átomos de impurezas) exhibe una alta conductividad. Tal descubrimiento abrió una nueva

ruta hacia la electrónica orgánica y recibió el Premio Nobel de Física en el año 2000.

Sin embargo, pronto se observó que los dopantes comprometen la estabilidad de los polímeros, reduciendo su aplicabilidad en dispositivos reales. La pregunta que surge entonces es: **¿podemos diseñar metales orgánicos intrínsecos?** Para responder a esta pregunta, necesitamos acudir a la teoría topológica de bandas. Esta teoría clasifica los materiales con *bandgap* electrónico

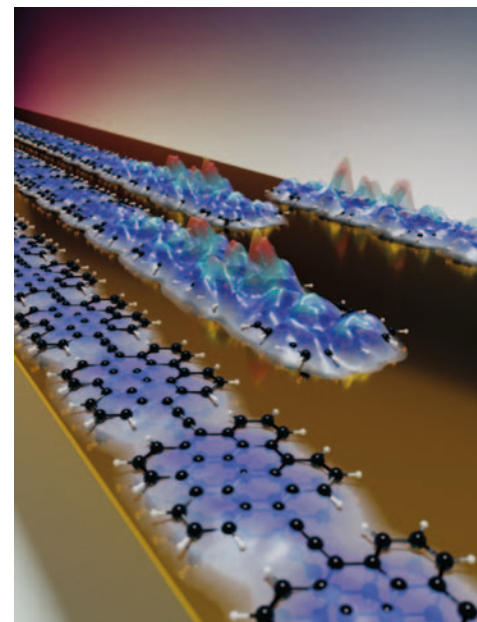
en materiales triviales (aislantes) y no triviales (aislante topológico no trivial). Tal teoría establece que la transición entre dos materiales de distinta clase topológica debe proceder a través del cierre de la banda, es decir, a través de un estado metálico. Por lo tanto, si pudiésemos confeccionar la topología de las bandas manipulando la estructura química, podríamos lograr el tan ansiado material.

Investigadores del instituto IMDEA Nanociencia, la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad Autónoma de Madrid han reportado en la revista *Nature Nanotechnology* una investigación teórico-experimental (DOI:10.1038/s41565-020-0668-7) que une los campos de la Teoría Topológica de Bandas (Física del Estado Sólido) y la conjugación de electrones π (Química Orgánica) para construir polímeros orgánicos cuasimetálicos con precisión atómica.

En primer lugar, se identificó una nueva familia de polímeros de aceno, clasificados por el número de unidades de benceno en su columna vertebral ($n = 1, 2, 3, \dots$). Teóricamente, para $n < 5$, los polímeros se encuentran en la fase trivial, mientras que para $n > 5$ son no triviales, hallándose el polímero de pentaceno ($n = 5$) en el punto de transición topológica. Con el fin de comprobar estas predicciones, polímeros de antraceno ($n = 3$) y de pentaceno se han fabricado con precisión atómica sobre sustratos de oro aplicando los últimos métodos de síntesis en superficie. **Las mediciones experimentales**

con microscopía de sonda de barrido revelaron que el polímero de antraceno es un semiconductor trivial, mientras que el polímero de pentaceno se encuentra muy cerca de la transición topológica en la zona de los **clase topológica no trivial**, presentando un *bandgap* experimental en superficie de sólo 0,35 eV, así como estados topológicos protegidos por la simetría del sistema en el nivel de Fermi. Avanzados cálculos teóricos que incluyen correlación electrónica revelaron que es de esperar que el polímero de pentaceno sin superficie presente un *bandgap* de tan sólo 0,05 eV, siendo, por tanto, cuasimetálico. Los autores extendieron el estudio a la familia de polímeros de los periacenos, logrando *bandgaps* tan bajos como 0,3 eV para los polímeros de bisanteno, corroborando asimismo el carácter topológico no trivial de dicho material y racionalizando el bajo *bandgap* debido a la proximidad del punto de transición de clase topológica.

Por otra parte, gracias al avanzado poder de resolución de microscopía de fuerzas atómicas, se pudo identificar la forma resonante dominante para cada



polímero, estableciéndose una correlación inequívoca entre cruce de forma resonante y cambio de clase topológica.

En resumen, esta investigación desarrolla la **posibilidad de diseñar polímeros orgánicos estables con *bandgaps* electrónicos cuasimetálicos**, cuyas aplicaciones irían desde la optoelectrónica molecular hasta las tecnologías cuánticas de la información.

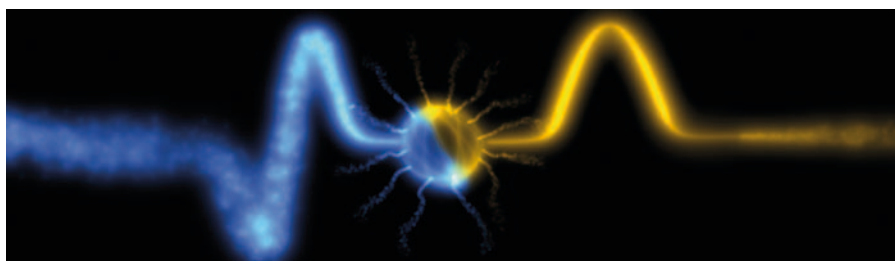
Hemos leído que...

Registro rápido e informal de noticias que, llegadas a nuestro consejo de redacción, hacen pensar o actuar a un/a físico/a¹

Sección coordinada por Elena Pinilla Cienfuegos

En física de partículas, la **supersimetría** (SUSY) fue concebida como una teoría que podría permitir la unificación de todas las interacciones físicas del universo. Se trata de una relación conjeturada entre bosones y fermiones con el objetivo de resolver preguntas fundamentales en la teoría de cuerdas y campos cuánticos. Posteriormente, este formalismo se consiguió aplicar a la **mecánica cuántica** (SUSYQM) y luego llegó a extra-

propiedades únicas de SUSYQM al dominio del tiempo y agregando un grado sin precedentes de comprensión y control sobre los sistemas que varían en el tiempo. Abre la puerta, además, a una miríada de nuevas aplicaciones en el campo de la óptica y la fotónica. Los sistemas ópticos que varían en el tiempo



Representación de estados enlazados temporalmente supersimétricos (crédito: C. García-Meca et al.).

polararse exitosamente a la **fotónica**. Sin embargo, en todos los casos, las transformaciones algebraicas de la supersimetría mecánico-cuántica fueron concebidas en el ámbito espacial. Ahora por primera vez, tres investigadores del Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la Universitat Politècnica de València, Carlos García Meca, Andrés Macho Ortiz y Roberto Llorente Sáez, han demostrado que las ecuaciones de Maxwell, así como las ecuaciones de onda acústica y elástica, también poseen una **supersimetría** subyacente **en el dominio del tiempo**. Publicado en la prestigiosa revista *Nature Communications* (*Nat. Commun.*, 11, 813 (2020)), este hallazgo abre un nuevo campo de investigación dentro de la física, ampliando los fundamentos y las

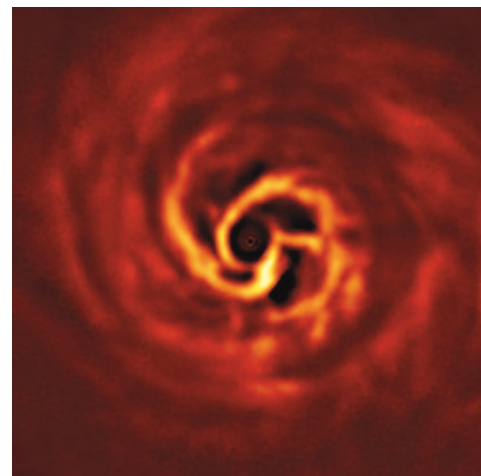
serán cruciales en una amplia gama de escenarios, incluida la modulación óptica, el aislamiento y la no reciprocidad, el procesamiento de señales totalmente ópticas, la información cuántica y la fotónica reconfigurable. Asimismo, las modulaciones temporales permiten nuevas posibilidades para la manipulación del sonido y las oscilaciones mecánicas. <https://bit.ly/2MkXO4N>

Las observaciones realizadas con el Very Large Telescope (VLT) del Observatorio Europeo Austral (ESO) han revelado los indicios de un sistema planetario que está naciendo (A. Boccaletti et al. *A & A*, 637, p. L5, 2020). Alrededor de la joven estrella AB Aurigae (ubicada a 520 años luz de la Tierra) se encuentra un denso disco de polvo y gas en el que los astrónomos han visto una estructura espiral prominente con un “giro” o turbulencia (en amarillo muy brillante en la imagen) que marca el sitio donde se estaría formando un exoplaneta. Este giro se encuentra aproximadamente a la misma distancia de la estrella AB Aurigae que Neptuno del Sol.



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

La característica observada, tomada con el potente instrumento SPHERE (Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch instrument), podría ser la **primera evidencia directa de la existencia del nacimiento de un nuevo planeta**. Observad que la imagen es fruto de observaciones reales, ¡no es una figura artística! <https://www.eso.org/public/news/eso2008/>



Región interna del disco alrededor de la joven estrella AB Aurigae, donde el Very Large Telescope de ESO ha detectado signos de nacimiento del planeta (crédito: ESO/Boccaletti et al.).

Evento Ciencia (@EventoCiencia) es una web donde puedes encontrar un **calendario** completísimo y actualizado con **eventos de divulgación científica**, donde de una forma práctica y sencilla te puedes informar de todas las actividades de divulgación en tu ciudad o de manera *online*. Es un proyecto de Vector Divulgación, una marca especializada en comunicación científica, y

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

está coordinado por dos divulgadores científicos: Santiago Campillo (@Scrutzcampillo) y Paula del Río (La ciencia no se hace sola @hayquehacerla). ¡No os la perdáis si os gusta la divulgación científica! <https://eventociencia.es/>

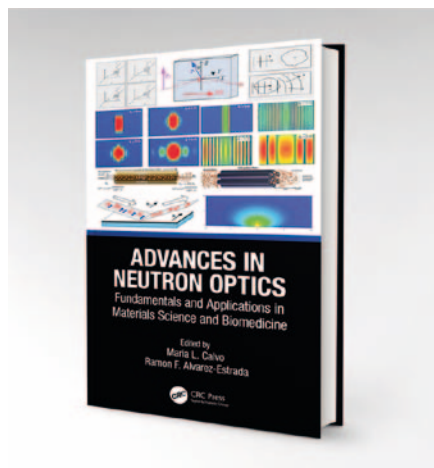
Hasta la fecha el **Modelo Estándar (ME)** explica extraordinariamente bien un enorme número de datos experimentales de **física de partículas elementales** y sus interacciones fundamentales. Sin embargo, la detección experimental de las llamadas oscilaciones de neutrinos requiere que al menos dos de las tres especies conocidas tengan masa (aunque minúscula), lo cual no encaja dentro de ME, constituyendo un atisbo de física más allá del paradigma actual. Siendo los neutrinos partículas sumamente elusivas, y con el fin de evitar en lo posible fuentes de contaminación, los detectores de neutrinos se sitúan a profundidades considerables, sea en antiguas minas, en el fondo del mar, o incluso en el interior del hielo de la Antártida, como el experimento IceCube. Por un lado, los neutrinos con energías bajas o moderadas son perfectamente capaces de atravesar la Tierra de punta a punta y alcanzar los detectores al otro lado dando señal. Sin embargo, la probabilidad de interacción de los neutrinos con la materia crece con su energía, por

Son numerosos los **proyectos de investigación en física** que se están desarrollando en todo el mundo para la lucha contra el **coronavirus**. En nuestro país podemos encontrar muchos ejemplos de investigaciones innovadoras para luchar contra la pandemia, tales como el desarrollo de un **sensor** para identificar la presencia del coronavirus SARS-CoV-2 mediante nanopartículas de oro con ADN, llevado a cabo por investigadores del Instituto IMDEA Nanociencia (Madrid) (<https://bit.ly/2ABeXV5>), métodos basados en técnicas de **inteligencia artificial** para acelerar el triaje de enfermos con COVID-19, donde ha participado Verónica Sanz, investigadora distinguida del programa Beatriz Galindo en el Instituto de Física Corpuscular (Valencia) (https://bit.ly/1A_triaje), o el desarrollo de un **dispositivo portátil** para el **diagnóstico precoz y seguimiento de la COVID-19**, basado en una matriz de **biosensores de grafeno**. Este dispositivo detectará anticuerpos en las diferentes etapas de la enfermedad, lo que permitirá identificar pacientes asintomáticos, estudiar la evolución de los que tienen síntomas y determinar la inmunidad de los curados, y será desarrollado por un equipo investigador de la Universidad de Granada (<https://bit.ly/3clowol>).

lo que no se esperaba detectar **neutrinos ultra-energéticos**. Sin embargo, en 2016 se observó que partículas de muy alta energía habían activado los detectores en el experimento ANITA (Antena Antártica de Impulso Transitorio, por sus siglas en inglés). ANITA consiste en un globo con detectores que sobrevuela la Antártida y cuyo objetivo es **detectar neutrinos de elevadísima energía** tras atravesar el planeta entero. Tales neutrinos podrían generarse en intensísimos “fogonazos cósmicos”, consecuencia de la interacción de rayos cósmicos ultra-energéticos con los fotones del fondo cósmico de microondas. Ahora bien, de ser cierta esa explicación, también deberían haberse producido neutrinos de mucha menor energía con idéntica procedencia, detectables por el citado experimento IceCube al “mirar” en la misma dirección del espacio exterior. Pero tras un análisis exhaustivo, el resultado combinado ha sido negativo, eliminando la posibilidad de una fuente cósmica dentro del ME. Una explicación alternativa de esa anomalía consiste en suponer otra especie de neutrinos distinta de las tres generaciones del ME ya conocidas. No obstante, es preciso **comprobar** detenidamente posibles errores sistemáticos de ANITA antes de poder afirmar, de nuevo, **que la física de neutrinos es el portal hacia una Nueva Física más allá del ME**. <https://bit.ly/36R3AV6>



Reseñas de libros de interés



Advances in Neutron Optics

María L. Calvo y Ramón F. Álvarez-Estrada (eds.)

CRC Press (2020), 289 págs.

El libro *Advances in Neutron Optics*, que acaba de ser publicado por la editorial CRC Press es una magnífica contribución a este interesante campo interdisciplinar. La Óptica de Neutrones es Óptica en un sentido muy amplio y comparte con esta disciplina principios, herramientas teóricas y técnicas experimentales. Pero no se trata de ondas electromagnéticas, sino de una de las partículas que componen el núcleo atómico y, por tanto, también es Física Nuclear, y la Física Cuántica es su lenguaje natural. En pocas disciplinas la dualidad onda-corpúsculo está tan presente.

El libro está editado por los profesores María L. Calvo y Ramón F. Álvarez-Estrada. Ambos son profesores de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) que han desarrollado una brillante trayectoria investigadora, no solo en España, sino a nivel internacional. La Prof.^a Calvo es Catedrática de Óptica, reconocida entre otras cosas por sus aportaciones en campos como la holografía, las guías de onda y los dispositivos fotónicos. El Prof. Álvarez-Estrada es Catedrático de Física Teórica y su campo de investigación va desde las Partículas Elementales hasta la Mecánica Estadística de macromoléculas. Y por supuesto, como se puede comprobar en este libro, ambos son expertos en Óptica de Neutrones. Aunque una parte significativa del libro está escrito por los propios editores, estos han invitado a participar en este proyecto

a investigadores muy reconocidos, que aportan su experiencia en campos especializados.

El libro comienza con un capítulo dedicado a los fundamentos, escrito por los propios editores. Después de una breve introducción histórica y un repaso a las propiedades generales del neutrón, la sección se centra en los neutrones lentos en su sentido más amplio, que incluye desde los epitérmicos a los ultrafríos. Se presenta de manera rigurosa la descripción mecanocuántica de sus propiedades, la interpretación probabilística de su función de ondas (fundamental en experimentos de interferometría), las propiedades de reflexión y refracción y sus interacciones magnéticas. A continuación se dan los fundamentos de las aplicaciones de los neutrones térmicos que serán la base de muchas de las técnicas que después se describirán. Se aborda el problema de la difracción en distintos medios (con una interesante comparación con el caso de los rayos X) y la holografía de neutrones. Este primer capítulo viene ilustrado con un conjunto de problemas.

El Prof. Ángel Sanz es autor del capítulo 2, que tiene como objetivo ser un tutorial de modelización numérica y simulación en óptica de neutrones. Entre otras cosas se muestra cómo herramientas disponibles para óptica convencional pueden ser de gran ayuda para el caso de los neutrones, manteniendo siempre presente la diferencia fundamental entre ambas partículas, fotones y neutrones.

El capítulo 3, en el que, además de los editores, participa Ignacio Molina, trata el confinamiento de neutrones y su propagación en guías de onda. Aparte de su interés teórico, viene motivado por la gran demanda en importantes áreas tecnológicas de control y manejo de haces de neutrones. Además de ser una revisión y puesta al día del campo, se hacen propuestas originales para mejorar la focalización al nivel de 1 μm con guías de ondas de hasta un metro. Se discuten posibles aplicaciones en numerosos campos que llegan hasta la medicina, como la técnica BNCT, que se desarrolla más tarde en el capítulo 6.

El capítulo 4 ha sido redactado por el Prof. Markus Strobl. Está dedicado a las técnicas de imagen con neutrones.

Conceptos clásicos en imagen como el de resolución espacial y contraste se desarrollan aquí para el caso de los neutrones. Para poder “hacer” imagen se requieren haces de neutrones con requisitos que se muestran con detalle en este capítulo. Finalmente, se desarrollan las soluciones ópticas, ilustradas con numerosos ejemplos de casos prácticos reales.

El Prof. Nikolay Pleshanov se ha encargado del capítulo 5, dedicado a la técnica NSO (*Neutron Spin Optics*). El estudio de muestras con haces de neutrones polarizados permite obtener información más detallada de muchos materiales. En primer lugar, se describen las técnicas de selección de spin y de manipulación de neutrones polarizados, tanto en sus aspectos teóricos como experimentales. Finalmente, se avanza las perspectivas de este campo emergente, incluyendo algunos desarrollos innovadores.

En el último capítulo el Prof. Ignacio Porras describe con detalle la técnica de terapia por captura neutrónica en Boro (BNCT), en la que un neutrón térmico interacciona con un núcleo de ^{10}B alojado en una célula tumoral, lo que produce una partícula alfa que la destruye. Se describe la evolución histórica de esta técnica, terminando con el estado actual y sus perspectivas futuras. A continuación se discute sobre las fuentes de neutrones y los compuesto de Boro susceptibles de ser usados, así como el papel fundamental de la simulaciones MC en los planificadores. Finalmente, se muestra la utilidad en esta técnica de las guías y lentes de neutrones descritas más arriba.

En resumen, se trata de un libro altamente recomendable, tanto para aquellos que estén interesados en los fundamentos teóricos de la óptica de neutrones como para los que quieran conocer la gran variedad de aplicaciones que van desde la Ciencia de Materiales a la biomedicina. Es adecuado tanto para investigadores ya formados como para estudiantes; cada uno podrá encontrar en el libro secciones adecuadas a su nivel e interés.

Fernando Arqueros Martínez
*Instituto de Física de Partículas
y del Cosmos, Universidad
Complutense de Madrid*



The Hunt for Vulcan: ... And How Albert Einstein Destroyed a Planet, Discovered Relativity, and Deciphered the Universe

Thomas Levenson

Random House (2015), 256 págs.

La historia de Vulcano es fascinante, y supone una buena lección de cómo funcionan las cosas en ciencia. Si mencionamos el nombre de Vulcano, a los más cultos les sugerirá el dios romano encargado del fuego y los volcanes, hijo de Júpiter y Juno y esposo a su vez de Venus y encargado de forjar el hierro. Pero también nos recordará el famoso cuadro de Diego Velázquez *La fragua de Vulcano*, que se encuentra en el Museo del Prado desde 1819, año de su inauguración.

Nos retrotraemos al siglo xvi, cuando Newton publica en 1686 sus *Principia* y con ella una teoría que explicaba el sistema del mundo y el movimiento de los planetas. En ese momento se conocían los planetas Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. Pero resulta que en 1781 William Herschel, a la sazón director de la Orquesta de Bath, y astrónomo aficionado, encuentra un nuevo planeta que acaba llamándose Urano. Se trataba del mayor descubrimiento después de Newton, y por tanto constituía un verdadero test a la teoría de la gravitación de Newton. Inmediatamente después, Pierre-Simon Laplace comenzó a estudiar la observación de Herschel y construyó el edificio de la *Mécanique Céleste* en cinco volúmenes de más de 1.500 páginas, analizando en profundidad las órbitas tanto de Urano como de Júpiter y Saturno. Probó la estabilidad del sistema solar y demostró la resonancia gravitacional 2:5 de Júpiter y Saturno, lo que indica que la línea

de conjunciones avanza despacio, de tal modo que sus configuraciones vuelven a la original al cabo de un ciclo de 929 años.

El matemático francés Urbain-Jean-Joseph Le Verrier continuó el trabajo sobre la dinámica del sistema solar que había dejado Laplace a su muerte en 1827. Le Verrier es un estudiante brillante de la *École Polytechnique* y como astrónomo matemático uno de sus objetivos era el estudio de los planetas menores. Comenzó a pensar que no estaba clara la estabilidad del sistema solar, en contra de lo que había afirmado Laplace. Sus cálculos matemáticos le llevaron a encontrar problemas en la predicción de la órbita de Urano, que le llevaba a examinar de nuevo la teoría gravitatoria. Incluso el alemán Friedrich Bessel llegó a pensar que pudiera ser que la constante gravitacional no lo fuera y dependiera de la distancia. Los cálculos de Le Verrier le llevaron a pensar en la existencia de un planeta más allá de Urano que explicara las anomalías de su órbita, lo que para el astrónomo inglés George Airy era plausible. A finales de mayo de 1846 ya había comunicado a la *Académie des Sciences* la posibilidad de un nuevo planeta, y finalmente el astrónomo alemán Galle encontró el 23 de septiembre de 1846 en Berlín lo que le había pedido Le Verrier. En realidad, hubo un problema entre Francia e Inglaterra por la cuestión de los nombres, y finalmente se tomó la decisión de llamarle Neptuno. El descubrimiento hizo coronar a Le Verrier como el más grande físico francés de la época y a ocupar la dirección del Observatorio de París, que había dirigido François Arago.

A partir de ese momento comienza una de las partes más fascinantes de esta historia. Fruto de la enorme confianza en sus cálculos matemáticos y en la teoría de Newton, encontró en 1843 la precesión del perihelio de la órbita de Mercurio con respecto al Sol como una anomalía de la teoría newtoniana. El error era de 38 segundos de arco por siglo, cuando actualmente se sabe que es 43 segundos de arco por siglo. Su experiencia previa con Neptuno le llevó a postular la existencia de un nuevo planeta cuya órbita estaría entre Mercurio y el Sol que explicara esta anomalía entre las órbitas predichas y las observadas. Es

a principios de 1860 cuando se fija el nombre de Vulcano, tomándolo de la mitología romana como el dios del fuego por su proximidad al Sol. En los años posteriores se desató una auténtica fiebre para buscarlo. Se llegaron a publicar noticias en la prensa de diversos países en alguna de las ocasiones en que se creyó que se había encontrado, incluyendo artículos en *Nature*. Lo cierto es que todos los encuentros fueron fallidos y, tras numerosos intentos y fracasos, desde julio de 1878 la comunidad científica se dio por rendida y prácticamente se abandonó la idea de encontrarlo.

El final de la historia llega a comienzos del siglo xx con Albert Einstein, que era muy consciente del problema del avance del perihelio de Mercurio que la teoría newtoniana no lograba explicar. El 18 de noviembre de 1915 es cuando Einstein presenta en la Academia Prusiana de Ciencias los cálculos del perihelio de Mercurio de 43 segundos de arco por siglo, explicando por tanto la discrepancia entre las predicciones teóricas y las observaciones, quedando explicada mediante la teoría general de la relatividad la precesión del perihelio de Mercurio. Automáticamente hacía la hipótesis de Vulcano innecesaria. La no existencia de Vulcano no destruyó el universo newtoniano, y finalmente la teoría de Einstein acabó con Vulcano. Einstein simplemente probó que no había nada chocante en el aparente extraño movimiento de Mercurio, sino que simplemente seguía su trayectoria de acuerdo a las leyes de la relatividad general.

Una de las lecciones que hemos aprendido del movimiento anómalo de Mercurio ha sido que, si bien no parece que fuera de una trascendencia que hiciera romper la cabeza a los científicos, lo que en realidad nos estaba diciendo es que Newton se había equivocado con la gravedad. También nos enseña cómo afrontar un fracaso en la ciencia. Ningún científico es inmune a ellos. Pero a la vez nos da la oportunidad de considerar lo difícil de comprender la naturaleza y desaprender lo adquirido. Y, por último, la satisfacción que recibimos cuando encontramos una solución a un problema irresuelto.

Miguel A. F. Sanjuán
Universidad Rey Juan Carlos

In memoriam

Teresa Rodrigo Anoro (1956-2020)

Teresa Rodrigo Anoro, Catedrática de la Universidad de Cantabria y miembro de la Real Sociedad Española de Física, nos ha dejado el 20 de abril tras un largo período de enfermedad, en el que nunca dejó su actividad científica. Teresa ha dejado una huella imborrable en la comunidad científica internacional por sus enormes aportaciones e ideas.

Teresa tuvo una visión internacional desde sus comienzos como investigadora. Nació en Lérida, en 1956, y se licenció en Física por la Universidad de Zaragoza, y realizó su doctorado, dirigido por Antonio Ferrando, en 1985, en la Universidad Autónoma de Madrid, tras incorporarse al grupo de Física de Altas Energías del CIEMAT, concretamente en el experimento NA23 del CERN de producción de partículas extrañas. Tras su tesis obtuvo una beca del CERN para participar en el desarrollo del calorímetro de Uranio-TMP del experimento UA1, poco después de haberse descubierto, en dicho experimento, los bosones W y Z de la interacción electro débil. De allí viajó a Fermilab, y se incorporó a la colaboración CDF del Tevatron, donde participó activamente en el descubrimiento del quark top.

En 1994 se incorporó a nuestro grupo del IFCA, tras lograr una plaza de profesora titular de la Universidad de Cantabria. Ella siguió trabajando en CDF, donde se publicó, en 1995, el descubrimiento del quark top. El impacto científico y social fue enorme, lo que le valió en los medios el apelativo de “científica top”, por su contribución al mismo.

Teresa, que era bien conocida en la creciente comunidad científica española de altas energías, lideró la incorporación del grupo del IFCA al experimento CMS del LHC del CERN y propició la participación del IFCA y otros grupos españoles a la colaboración CDF, en su segunda fase, CDF-II. Los logros científicos y de formación de investigadores de ambos experimentos fueron muy sobresalientes. El grupo del IFCA consolidó su actividad científica, tanto en análisis como en



Fotografía de David Bustamante

instrumentación. Teresa fue fundamental en este desarrollo del grupo que se incrementó numéricamente y, sobre todo, en calidad científica, adquiriendo una madurez importante para las etapas siguientes. En CMS, presidiendo Teresa la “Collaboration Board”, con representación de más de 180 institutos de todo el mundo, que englobaban a 2.500 científicos e ingenieros, se logró, en 2012, el descubrimiento del bosón de Higgs, cuanto del campo que dota de masa a las partículas elementales por su interacción con el mismo.

Siempre inquieta por la ciencia, en la última etapa de su vida promovió la investigación y discusión sobre materia oscura participando, asimismo, en el experimento DAMIC de detección directa de la misma.

Los logros científicos de Teresa han ido parejos a las distinciones y representaciones internacionales en comités tan importantes como la Junta de Física de Altas Energías de la Sociedad Europea de Física y el Comité de Política Científica del CERN. En los últimos años recibió el primer premio Julio Peláez a Pioneras de las Ciencias

Físicas, Químicas y Matemáticas y fue designada Doctor Honoris Causa por la Universidad Internacional Menéndez y Pelayo, y Medalla de Plata de la Universidad de Cantabria.

Teresa ha sido una entusiasta de la divulgación científica y de la formación de nuevos investigadores apoyando siempre con fuerza y rigor el papel de los jóvenes, particularmente de las mujeres en la ciencia. Tuvo un papel muy significativo para que el IFCA adquiriera la calificación de Centro de Excelencia María de Maeztu por parte del Gobierno de España, siendo directora del mismo en sus últimos años de vida.

Su carácter generoso y, al mismo tiempo, riguroso, su tesón y voluntad fueron una impronta que permanecerá entre nosotros.

Quiero mostrar en mi nombre, en el del grupo del IFCA y en nombre de la Junta de Gobierno de la RSEF nuestro profundo pesar y apoyo a Antonio y el resto de su familia.

Alberto Ruiz Jimeno
*Instituto de Física de Cantabria
CSIC-Universidad de Cantabria*

Juan José Sáenz (1960-2020)

Científico, mentor y amigo

El domingo 22 de marzo nos sorprendió con la muerte inesperada de Juan José Sáenz, Mole para sus amigos y conocidos. Juanjo fue catedrático de la Universidad Autónoma de Madrid. Formó parte de la generación de físicos teóricos de la materia condensada más brillante que ha conocido la ciencia en España. Juanjo fue un heredero del legado científico de Nicolás Cabrera, con quién solía conversar durante el desarrollo de su tesis doctoral. Como profesor de la UAM, supo transmitir el entusiasmo por la física a muchos de sus estudiantes.

Juanjo formó parte del grupo de pioneros que desarrollaron las microscopías de efecto túnel y de fuerzas durante los años 80. Posteriormente, sus trabajos sobre el transporte de electrones en constricciones atómicas y de fotones en guías de onda ganaron el favor de los grupos experimentales por proporcionar explicaciones que facilitaron la comprensión de la nueva ciencia que emergía del mundo nanoscópico.

Juanjo es internacionalmente conocido por sus contribuciones en el campo de la nano-óptica. Sus trabajos sobre fuerzas ópticas desvelaron nuevos modos de manipulación de cuerpos nanométricos con



luz que fueron de gran relevancia en el desarrollo de las pinzas ópticas. En esta línea, Juanjo desarrolló una fenomenología compleja para modelar la dispersión de campos ópticos en sistemas no periódicos necesaria para entender la respuesta óptica de materiales.

En el año 2015, Juanjo se mudó a San Sebastián junto a su inseparable compañera, Mercedes, para ejercer de Profesor de Investigación Ikerbasque en la Fundación Donostia International Physics Center. Sus trabajos más recientes destacan por la originalidad en el diseño de nuevos materiales ópticos desordenados altamente correla-

cionados, sistemas ópticos iluminados por campos electromagnéticos no convencionales, y en la comprensión de los mecanismos de dispersión de la luz en nanopartículas y nanohilos dieléctricos, metálicos o magneto-ópticos, lo que le permitió desvelar una rica fenomenología en nanofotónica.

Juanjo fue un apasionado de la física y amante de largas discusiones científicas en pizarra de tiza. Los que le conocimos lo recordaremos por su generosidad para compartir ideas y conocimientos; por su disposición para afrontar el siguiente reto científico, y por su humildad. Su fallecimiento representa una gran pérdida para la física, para sus estudiantes, amigos y colegas, que de repente nos hemos visto privados de su humanidad y conocimientos. Sirva nuestro recuerdo más entrañable para ayudar a su familia a sobrellevar su pérdida. Descanse en paz.

Ricardo García y Pedro A. Serena
*Instituto de Ciencia de Materiales
de Madrid, CSIC*

José I. Pascual
CIC nanoGune, San Sebastián

Nuno de Sousa
*Donostia International Physics Center,
San Sebastián*

Manuel Carreira Vérez (1931-2020)

Recientemente hemos conocido la noticia del fallecimiento del astrofísico y jesuita gallego Manuel Carreira Vérez, doctor en Ciencias Físicas. El doctor Carreira nació el 31 de mayo de 1931 en un pintoresco lugar de la costa gallega llamado Vilarrube, en Valdoviño (A Coruña).

Cursó sus primeros estudios en el Instituto de Villalba (Lugo) y en el Colegio Apóstol Santiago en Teis (Vigo). Obtuvo el título de bachiller en la Universidad de Santiago en 1948 con "Premio Extraordinario" y el Bachillerato en Estudios Clásicos en el Colegio San Estanislao de Salamanca. Entró en



la Orden de los Jesuitas en 1948, y fue ordenado sacerdote en 1960. Licenciado en Filosofía con *magna cum laude* (1957) por la Universidad Pontificia de Comillas (Santander), y licenciado en Teología por la Loyola University Chicago con *summa cum laude* (1961) en el seminario de West Baden Springs (Indiana).

Estudió el Máster en Física en la Universidad John Carroll (Cleveland) de 1962 a 1966 y el doctorado en Ciencias Físicas en la Universidad Católica de América (Washington) de 1967 a 1971. En Cleveland trabajó sobre el efecto del láser en líquidos con E. Carome y C. J. Prochaska. El título de

su tesis de máster fue “Shadow Photography Studies of Laser-Induced Shock Waves in Liquids”. Resultado de este trabajo fue un artículo científico en el *Applied Physics Letters* de julio de 1967. Su director de tesis doctoral fue nada menos que el Premio Nobel Clyde Cowan, codescubridor del neutrino. El título de su tesis fue “A Search for Anisotropies in Cosmic Ray Sources between 9 Degrees and 69 Degrees Declination”. De su trabajo con Cowan conocemos un avance que dejaron publicado en las Actas de la XII Conferencia Internacional sobre Rayos Cósmicos, celebrada en Tasmania (Australia) en agosto de 1971. El trabajo versaba sobre la distribución anisotrópica de las direcciones de llegada de los muones al nivel del mar.

Tras doctorarse comenzó a impartir clases de Física y Astronomía en la Católica de América —de 1972 a 1975—, en el Bohannon Science Center de la Universidad John Carroll, y de Filosofía de la Naturaleza y de las Ciencias en la Universidad de Comillas en Madrid de 1971 a 2002 —las tres Universidades de las que había

sido alumno—, pasando un semestre en cada país. Por sus méritos en Cleveland la Universidad John Carroll le otorgó en 1987 la *centennial medal*. Durante los siguientes años continuó su labor científica e investigadora, compaginándola con su actividad religiosa y sus tareas como divulgador científico, estas últimas por las que es más conocido. Colaboró con los doctores Hall Crannell y Klaus Fritsch, del Departamento de Física de la Universidad Católica de América y de la Universidad John Carroll, respectivamente, desarrollando un sistema de control y detectores para sondas espaciales de la NASA. Con Crannell publicó un artículo científico en *Nuclear Instruments and Methods* en mayo de 1977 en el campo de los detectores de partículas, más concretamente sobre una cámara proporcional de multihilos.

El 3 de julio de 1989, la estrella 28 Sgr fue ocultada por la luna más grande de Saturno, Titán. Este evento ofreció una oportunidad única para explorar la extensa atmósfera rica en nitrógeno de Titán en un rango de altitud no investigado por la sonda

espacial Voyager. Un grupo de investigación entre los que se encontraba Carreira observó la ocultación, derivando las temperaturas mesosféricas y encontrando evidencias de in-homogeneidades atmosféricas. Los resultados preliminares fueron publicados en el Boletín de la Sociedad Americana de Astronomía ese mismo año, y los resultados finales fueron publicados en *Nature* en junio de 1990. Sus investigaciones sobre Titán continuaron varios años más, publicando otro artículo en *Astronomy & Astrophysics* en el número de marzo de 1993, y otro más en *Icarus* en el número de diciembre de 1999.

Fue nombrado *adjunct astronomer* del Observatorio Astronómico Vaticano en 1994. También fue miembro de la junta directiva del Vatican Observatory Foundation desde 1988 al 2002. Falleció en Salamanca el 3 de febrero de 2020, casualmente unos pocos días antes que su amigo el también astrónomo jesuita George V. Coyne (1933-2020).

Carlos Viscasillas Vázquez
Instituto de Física Teórica y Astronomía. Universidad de Vilnius. Lituania.

¿te gusta investigar?

ATI

La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

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

info@atisistemas.com

Noticias

Laura Lechuga lidera el proyecto CoNVat de la UE para la lucha contra la COVID-19

El proyecto “Combating 2019-nCoV: Advanced Nanobiosensing platforms for POC global diagnostics and surveillance” (CoNVat) ha sido financiado por la convocatoria exprés de la Unión Europea para la lucha contra la COVID-19. Este proyecto está liderado y coordinado por la Prof. Laura M. Lechuga, miembro de la RSEF, Premio Física, Innovación y Tecnología 2016 de la RSEF y la Fundación BBVA y perteneciente al Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (ICN2, Barcelona). Además de este instituto de investigación, en el proyecto participan la Universidad de Barcelona, la Universidad de Aix-Marsella en Francia y el Instituto Nacional de Enfermedades Infecciosas en Italia. CoNVat pondrá a punto una nueva plataforma biosensora basada en nanotecnología óptica para proporcionar un diagnóstico de COVID-19 preciso, de forma rápida y sin necesidad de



instrumentación compleja y laboratorios clínicos centralizados.

La tecnología sensora nanofotónica, previamente optimizada, que se empleará en este proyecto consiste en un microchip con guías de onda interferométricas de dimensiones nanométricas, que actualmente ofrecen la más alta sensibilidad en detecciones en tiempo real sin marcapjes (límites de detección de

10^{-7} - 10^{-8} unidades de índice de refracción o nivel pM-fM), pudiendo fabricarse a gran escala mediante técnicas de microelectrónica convencional. Estos microchips permiten la detección y cuantificación de biomoléculas como proteína, bacterias o virus en una única etapa de análisis, sin necesidad de amplificación previa o posterior, por lo que el análisis completo puede realizarse en menos de 30 minutos.

En el proyecto se abordarán dos estrategias principales para el diagnóstico de COVID-19: la detección directa del virus entero y la identificación del ARN viral.

CoNVat además incluye el uso de las plataformas biosensoras para el análisis de diferentes tipos de coronavirus presentes en animales reservorios (como murciélagos y roedores), de manera que se puedan llevar a cabo eficientes campañas de monitorización y vigilancia de una posible evolución de estos virus y prevenir futuros brotes infecciosos en humanos.

Javier Urchueguía, nuevo presidente del grupo europeo de Climatización Renovable

Javier Urchueguía, miembro de la RSEF y catedrático e investigador de la Universitat Politècnica de València (UPV), es el nuevo presidente de la Plataforma Tecnológica Europea de Calor y Frío Renovable (RHC-ETIP). Se trata del primer español que dirige esta institución, que aglutina más de 800 entidades, empresas y centros de investigación de Europa referentes en el campo de las tecnologías de energía renovables aplicadas a calefacción y refrigeración.

La RHC-ETIP es un órgano consultivo de la Comisión Europea de la Energía que trabaja en la investigación y el desarrollo de fuentes de calor renovables tanto para climatización como para la industria. El Prof. Urchueguía ha dedicado buena parte de su carrera investigadora al uso de la geotermia como fuente de energía, aunque también se



ha interesado por otros campos de la Física y la Ingeniería, como la óptica o el modelado de los procesos metabólicos relacionados con la producción de energía en organismos simples. En la actualidad Javier es uno de los directores del grupo de investigación TIC contra el cambio climático, en el Instituto ITACA de la UPV.

El Prof. Urchueguía es autor de más de 150 artículos de revistas y conferencias en el campo de la física y la ingeniería. Ha coordinado varios proyectos europeos en el campo de la energía y también es presidente del Panel de Tecnología Geotérmica del RHC-ETIP. Además, dirige la Cátedra de Transición Energética de la Comunidad Valenciana, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industria (ETSII) de la UPV y patrocinada por la Consejería de Industria y Energía de la Generalitat Valenciana.

Bajo su mandato, la Plataforma está trabajando en la nueva Agenda Estratégica de Investigación e Innovación para el sector RHC, que se publicará a finales de año y se presentará en el marco de la conferencia internacional ISEC 2020, que tendrá lugar en Graz (Austria).

Augusto Beléndez reconocido en la Universidad de Alicante por su excelencia docente

Augusto Beléndez Vázquez, catedrático de Física Aplicada de la Universidad de Alicante (UA), miembro de la RSEF y director de la *Revista Española de Física*, ha sido reconocido por la UA en el marco del programa DOCENTIA de la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y la Acreditación (ANECA), al ser uno de los profesores de esta universidad con una calificación global de “excelente” en el curso 2018-19. Este curso ha sido el primero en que se ha implantado el programa DOCENTIA en la UA.

La entrega del diploma acreditativo a los profesores que habían alcanzado esta calificación global de “excelente” estaba programada para el pasado 13 de marzo en un acto público presidido por el rector de la UA. Este acto fue suspendido inicialmente debido a la crisis de la COVID-19. El pasado 11 de junio se celebró en el paraninfo de la UA el Acto de Clausura del curso 2019-20 con una asistencia muy reducida debido a la situación originada por la COVID-19, pero emitido por vídeo en *streaming* a toda la comunidad universitaria. En este acto se incluyó el reconocimiento público a estos “excelentes” docentes



de la UA y fue el Prof. Beléndez, en representación de todos los profesores de la UA reconocidos, quien pronunció el discurso de agradecimiento.

El Prof. Beléndez es licenciado (1986) y doctor (1990) en Física por la Universidad de Valencia. En 1986 comenzó su carrera docente e investigadora en la Universidad Politécnica de Valencia y desde 1990 pertenece a la UA, de la que es catedrático de universidad desde 1996. En la UA fue director del Departamento de Física, Ingeniería

de Sistemas y Teoría de la Señal (1993-2007) y del Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías (2009-18), del que fue además su principal impulsor y promotor.

Su labor investigadora se desarrolla en los campos de la óptica y la fotónica, fundamentalmente en materiales de registro holográfico, elementos ópticos holográficos y almacenamiento óptico de la información. En estas líneas de investigación ha publicado más de 350 artículos en revistas especializadas y ha presentado un gran número de comunicaciones y ponencias en congresos nacionales e internacionales. Es director del Grupo de Holografía y Procesado Óptico (GHPO), grupo de investigación consolidado de la UA. Es *Fellow Member* de la International Society for Optics and Photonics (SPIE).

En 2009 recibió el Premio a la Excelencia Docente de la Consellería de Educación de la Generalitat Valenciana y el Consejo Social de la UA, y en 2015 fue galardonado con el Premio Enseñanza y Divulgación de la Física (Modalidad Enseñanza Universitaria) de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA.

Ante una nueva Ley Orgánica de Educación (la LOMLOE)

En el futuro próximo el Gobierno piensa aprobar una nueva Ley Orgánica de Educación, la Ley Orgánica de Modificación de la Ley Orgánica de Educación (LOMLOE), según el proyecto presentado por la ministra de Educación y Formación Profesional, Isabel Celaá, el pasado 20 de febrero en el Congreso de Diputados (ver <https://bit.ly/2U6plv0>). Este proyecto tiene previsto derogar la actual Ley Orgánica para la Mejora de la Calidad Educativa (LOMCE) y volver a los planteamientos de la Ley Orgánica de Educación (LOE) de 2006.

En estas circunstancias y tal como se hizo en el pasado ante la promulgación de nuevas leyes educativas, desde la División de Enseñanza y Divulgación de la

Física (DEDF) se tomó la iniciativa, con el apoyo del Presidente de la RSEF, de enviar un informe a la ministra haciendo propuestas de mejora para las materias de Educación Secundaria en relación con la Física. El origen de este informe está pues en la propuesta de la nueva ley para la organización de los cursos de ESO y Bachillerato y, en consecuencia, los cambios que puedan producirse en la presencia de la Física (y de la Química) en ambas etapas educativas. En síntesis, las peticiones realizadas son:

1. Establecer que la Física y la Química sea materia obligatoria en el 1.º curso de la modalidad de Ciencias y Tecnología y aprovechar la nueva Ley para desdoblirla, ya en 1.º de Bachillerato,

en dos asignaturas independientes, una de Física y otra de Química.

2. Establecer que la Física sea materia obligatoria en 2.º curso de Bachillerato para las modalidades científico-tecnológicas y preferente en el itinerario biosanitario.

El informe completo, que la RSEF envió al MEyFP dentro del periodo de información pública de la LOMLOE, se puede encontrar en la sección de Noticias de la página web de la RSEF, <http://rsef.es/> (noticia del 20-V-20) y también en la página web de la DEDF: <https://www.dedfísica-rsef.com/>.

José María Pastor Benavides
Presidente de la DEDF

Pilar Hernández, miembro del Comité de Política Científica del CERN

La catedrática de Física Teórica de la Universitat de València e investigadora del Instituto de Física Corpuscular (IFIC), centro mixto del CSIC y la UV, Pilar Hernández Gamazo, ha sido nombrada miembro del Comité de Política Científica (Scientific Policy Committee, SPC) del CERN, el mayor centro de investigación de física fundamental del mundo. Este comité fue creado en los orígenes del CERN en 1954 como órgano consultivo para establecer los objetivos científicos del laboratorio, y está integrado por científicos de gran prestigio de todo el mundo. El nombramiento es por tres años (2020-2023), y se produce en un momento crucial para la física de altas energías, cuando se decide cuál será el próximo gran proyecto que sucederá al Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el mayor acelerador de partículas del mundo. A SPC pertenece también, en este caso desde diciembre de 2016, la directora del Sincrotrón ALBA Caterina Biscari, también miembro de la RSEF.



El SPC está formado por 25 miembros, entre ellos su presidente, y varios miembros de oficio, entre los que están la directora del CERN, Fabiola Gianotti, y la presidenta del Consejo, el máximo órgano de gobierno del laboratorio, Ursula Bässler. Los miembros del SPC se eligen a propuesta del presidente por al menos dos tercios de los miembros del Consejo del CERN, basándose únicamente en sus méritos científicos. Su

nombramiento se produce *ad personam*, por un periodo de tres años renovable una vez.

La Prof.^a Pilar Hernández se licenció en Física en la UAM en 1990, obteniendo el primer Premio Nacional de Licenciatura. En 1993 se doctoró por la UAM con premio extraordinario. Entre 1993-1996 fue Junior Fellow en la Universidad de Harvard (EE. UU.) y a continuación se incorporó al Departamento de Teoría del CERN, primero como Fellow y después como Staff. En 2003 volvió a España y se integró en el IFIC.

La Prof.^a Hernández ha hecho contribuciones de gran relevancia a la física de neutrinos; la aplicación de teorías efectivas en la búsqueda de nueva física; el origen de la asimetría entre materia y antimateria en el Universo; y al estudio de la cromodinámica cuántica en un retículo espacio-temporal. Tiene además un gran número de publicaciones científicas y ha impartido numerosas conferencias y cursos invitados en congresos científicos internacionales.

María Moreno Llácer, Premio Científico-Técnico de Algemesis

María Moreno Llácer, investigadora del Instituto de Física Corpuscular (IFIC, centro mixto CSIC-Universidad de Valencia, UV) y miembro de la RSEF, ha sido galardonada con el primer premio de la XV edición del Premio Científico-Técnico de Algemesis. El trabajo presentado por la Dra. Moreno se centra en la física de partículas elementales, aquellas ya indivisibles, en concreto en entender el origen de la masa. El objetivo es estudiar la interacción del bosón de Higgs, el responsable de la masa de las partículas elementales, con el quark top, la partícula fundamental más pesada que se conoce. La dificultad para observar tal interacción consiste en que hay que descartar muchos otros procesos que dejan señales semejantes en el detector



ATLAS, que se producen en las colisiones del Gran Colisionador de Hadrones (LHC). Por ello, se han utilizado avanzadas técnicas estadísticas, como el aprendizaje automatizado para el

análisis de los datos, para así poder distinguir las interacciones que interesan entre las muchas que se producen.

La Dra. Moreno es licenciada en Física por la UV, universidad en la que se doctoró en 2014. Tras una estancia postdoctoral en la Universidad de Gotinga (Alemania), obtuvo una research fellow en el CERN (Suiza), donde coordinó varios grupos de investigación en física del quark top dentro de la colaboración ATLAS. En 2018 obtuvo el Premio Investigador Novel en Física Experimental de la RSEF y la Fundación BBVA, y el Leona Woods Lectureship Award del Laboratorio Nacional Brookhaven (EE. UU.). La Dra. Moreno regresó el año pasado al IFIC con una beca postdoctoral Junior Leader de La Caixa y también es IP de una ayuda SEJI de la Generalitat Valenciana.

revistadefisica.es



Los trabajos publicados pueden optar a los **Premios de Física RSEF-Fundación BBVA.**

PRESIDENTE

VICEPRESIDENTES

SECRETARIO GENERAL

TESORERA

EDITOR GENERAL

VOCAL

PRESIDENTES DE SECCIONES LOCALES

PRESIDENTES DE DIVISIONES Y GRUPOS ESPECIALIZADOS

R. García Herrera (Física de la Atmósfera y de Océano, GEFAO)
J. A. Fernández González (Física Atómica y Molecular, GEFAM)
J. José Suñol (Calorimetría y Análisis Térmico, GECAT)
F. Monroy Muñoz (Coloides e Interfases, GECI)
P. Gómez Sal (Cristalografía y Crecimiento Cristalino, GE3C)
G. Pinto Cañón (Didáctica e Historia de la Física y la Química, GEDH)
P. Palacios Clemente (Energía, GEE)
R. M.^a Benito Zafradilla (Física Estadística y No Lineal, GEFENOL)
R. Orús Lacort (Información Cuántica, GEIC)
L. Bañares Morcillo (Láseres Ultrarrápidos, GELUR)
R. Vilaseca Alavedra (Óptica Cuántica y Óptica No Lineal, GECONL)
A. Sastre Santos (Nanociencia y Materiales Moleculares, GENAM)
P. García Martínez (Mujeres en Física, GEMF)
D. Cortina Gil (Física Nuclear, GEFN)
L. T. Oriol Langa (Polímeros, GEPO)
F. L. Tabares Vázquez (Física de Plasmas, GEFP)
A. Guerrero Conejo (Reología, GEREO)
M. Martínez Piñeiro (Termodinámica, GET)
G. Lloás Llácer (Física Médica, GEFM)

Equipos para investigación en conductividad térmica

El método Hot Disk Transient Plane Source (TPS) permite realizar pruebas rápidas, precisas y no destructivas de la conductividad térmica, la difusividad térmica y la capacidad de calor específico de la mayoría de materiales, todo en una sola medición.

La conductividad y la difusividad se analizan directamente y el calor específico es calculado a partir de los dos anteriores.

TPS 3500



Para condiciones extremas de tamaño y conductividad

TPS 2500S



Máxima precisión y acorde a ISO 22007-2

TPS 2200



Trabajos diarios de análisis y acorde a ISO 22007-2

TPS 1500



Para materiales de construcción y aislamientos

TPS 500(S)



Análisis rápidos en pequeños laboratorios

HOT DISK M1



Analizador básico pero preciso y con amplio rango

+ sensores + módulos de medida + apps +.....

EJEMPLOS DE APLICACION ANISOTROPIA

Las baterías (Li-ion) tienen conductividad térmica drásticamente diferente en diferentes direcciones. El uso de HOT DISK hace que sea fácil y preciso medir estas propiedades, en un único transitorio.

ESTRUCTURAS DE GRAFITO

La prueba de grafito de alta conductividad con el método HOT DISK proporciona resultados rápidos y precisos.

LÍQUIDOS

Para el análisis de líquidos de baja viscosidad en los que se requieren tiempos cortos para evitar la transferencia de calor por convección

POLVO

Las mediciones en polvo dependen de la presión aplicada así como de la presión del gas intersticial. HOT DISK aporta soluciones

SILICONAS

Medir la conductividad de los líquidos puede ser un desafío. La razón de esto es la transferencia por convección durante la medición. Hot Disk aporta las soluciones

RESISTENCIAS DE CONTACTO

La resistencia de contacto térmico siempre está presente en la interfaz entre dos superficies sólidas. HOT DISK permite su análisis