

Revista
Española
de

FÍSICA

UNA PUBLICACIÓN DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA
www.rsef.es Volumen 35 • Número 2 • 2021



Real
Sociedad
Española de
Física

R.S.E.F.



- Temas de Física y Notas de clase
- Comentario invitado
- Puntos de interés
- Hemos leído que...

- Mi clásico favorito: Stephen
- Hawking
- 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)

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 Íñiguez 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

Temas de Física

- 1 Las medidas ideales y el problema de entender la mecánica cuántica, Adán Cabello
- 7 Los tres físicos, Chris DeWitt, José Edelstein y Bayram Tekin
- 13 El quark top y su interacción con el bosón de Higgs. Una fuente especial de información sobre posible nueva física en el LHC del CERN, María Moreno Llácer
- 20 SWAN como herramienta para la docencia de física de altas energías, Víctor Rodríguez Bouza y José Enrique Palencia Cortezón
- 22 La cámara termográfica: una fascinante visión de la física, Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia
- 26 Relatividad especial: una interpretación geométrica con sentido físico, Juan Tomé

Comentario invitado

- 31 La evaluación de la investigación: España suspende, Alonso Rodríguez-Navarro

Mi clásico favorito

- 41 Recordando a Stephen Hawking, por Emilio Elizalde

Puntos de interés

- 54 Hemos leído que...

Reseñas de libros de interés

- 56 *A hombros de gigantAs*, Laura Morrón Ruiz de Gordejuela
- 56 *Cosmología moderna desde sus orígenes*, Emilio Elizalde
- 57 *Los físicos y Dios*, Eduardo Battaner

In memoriam

- 59 M.ª Inmaculada de la Rosa García (1961-2021)
- 59 Pavel Winternitz (1936-2021)
- 60 Emiliano Hernández Martín (1941-2021)

Noticias

- 62 La XXXII Olimpiada Española de Física
- 64 XVI Feria-Concurso "Experimenta" ha vuelto, también en streaming
- 65 Teresa Rodrigo Anoro, homenajeada en la Universidad de Cantabria
- 66 José Edelstein recibe el Premio RAICES a científicos argentinos residentes en el exterior
- 66 Sergio Carbajo, premio 2021 SPIE Early Career en reconocimiento a sus logros como investigador joven
- 67 Holografía: 50.º Aniversario del Premio Nobel de Dennis Gabor
- 67 Tercera edición del acto central del Día Internacional de la Luz en la ciudad de Terrasa
- 68 Ángel Rubio, nombrado fellow de la European Physical Society
- 68 Resolución del Premio Salvador Senent 2021

Las medidas ideales y el problema de entender la mecánica cuántica

Adán Cabello

¿Cuál es el origen físico de la mecánica cuántica? Según un resultado reciente, las correlaciones que permite la teoría cuántica para medidas ideales son indistinguibles de las que se observarían en un universo regido por el principio de que «la única ley es que no hay ninguna ley».

Uno de los problemas más antiguos de la física moderna es de dónde viene la mecánica cuántica. La observación de la importancia que tienen en Física las cantidades conservadas y los observables que se pueden medir repetidamente sin que su resultado cambie nos lleva a preguntarnos cuál es la teoría de probabilidades más general posible para los eventos producidos por medidas de observables de este tipo. Aquí introducimos las definiciones y herramientas para demostrar que, sorprendentemente, esa teoría más general posible es la teoría cuántica de probabilidades.

Introducción

En 1964, Richard Feynman pronunció una frase que sigue causando revuelo: “Creo que puedo decir con seguridad que nadie entiende la mecánica cuántica” [1]. Se refería a que nadie es capaz de derivar la mecánica cuántica a partir de unos principios físicos básicos, tal y como sí se puede hacer con, por ejemplo, la teoría de la relatividad especial [2]. La situación ha cambiado bastante en los últimos 20 años.

Un primer paso ha sido darse cuenta de que la mecánica cuántica está formada por dos capas distintas. La primera capa es una teoría abstracta de probabilidades que puede estudiarse y que *debería enseñarse* [3, 4] independientemente de sus aplicaciones en Física. Esta capa fundamental es un conjunto de reglas para predecir las distribuciones de probabilidad de los resultados de una serie de posibles *medidas* futuras sobre (copias similarmente preparadas de) un sistema físico. La teoría no habla de *propiedades* del sistema físico, sino de las distribuciones de probabilidad de *observables* que *podrían* medirse haciendo interaccionar el sistema físico con otros dispositivos. El espacio muestral de esta teoría está formado por sucesos elementales del tipo: “al medir el observable A sobre un sistema preparado en el estado φ el resultado es a ”, que denotaremos por $(A = a|\varphi)$.

Lo raro de esta teoría es cómo se representan matemáticamente en ella los estados, observables y sucesos, y cómo se usan estas representaciones para calcular probabilidades. En su formulación más sencilla, las tres reglas en las que se basa la teoría son (véase, p. ej., [5]):

1. Cada “estado cuántico” de máxima información de un “sistema cuántico”¹ se representa por un rayo en un espacio de Hilbert complejo (vectores proporcionales representan el mismo estado). En ausencia de reglas de superselección, cualquier rayo representa un estado. Cada simetría del espacio de estados cuánticos se representa por una transformación unitaria o antiunitaria.
2. Cada observable se representa por un operador autoadjunto. Los únicos resultados posibles al medir un observable son los autovalores del operador que lo representa (recuérdese que los autovalores de un operador autoadjunto son números reales). En ausencia de reglas de superselección, cualquier operador autoadjunto representa un observable.
3. Regla de Born. Si el estado es el representado por $|\varphi\rangle$ y se hace una medida del observable maximal A (representado por un operador autoadjunto de espectro no degenerado), la probabilidad de que el resultado sea el asociado al autovalor a es $p(A = a|\varphi) = |\langle A = a|\varphi\rangle|^2$, donde $\langle A = a|$ es el transpuesto del complejo conjugado de $|A = a\rangle$, que es al autovector del operador asociado a A correspondiente al resultado/autovalor a (recuérdese que los autovectores de un operador autoadjunto son ortogonales entre sí).

Esta teoría de probabilidades es a lo que, de aquí en adelante, llamaremos *teoría cuántica* (TC) (como, p. ej., [7, 8]).

La segunda capa de la mecánica cuántica está formada por las herramientas que se usan para adaptar la TC a problemas de mecánica y electromagnetismo. En esta capa están, por ejemplo, las reglas de cuantización, las simetrías y cantida-

¹ La definición de un “sistema cuántico” requiere tanto un sistema físico como un dispositivo de medida. El “estado cuántico” que se asocia a un sistema físico es *relativo* al dispositivo de medida con el que podría interactuar el sistema físico en el futuro. Por ejemplo, un fotón individual es un sistema físico, pero todavía no es un sistema cuántico. Si se hiciese pasar el fotón por una matriz de divisores de haz con d salidas con un detector de fotones en cada una de ellas, como se describe en [6], entonces el conjunto fotón-dispositivo definiría un sistema cuántico de dimensión d o *qudit*. Nótese que el que el sistema cuántico sea un qubit ($d = 2$) o un qudit de dimensión superior no es una propiedad intrínseca del fotón, sino que depende del dispositivo que se use.

des conservadas, los hamiltonianos, la ecuación de Schrödinger, y las reglas de superselección. En este artículo nos concentraremos en la primera capa, en la creencia de que es ahí donde reside la rareza de la mecánica cuántica.

Para los que nunca han oído hablar de la mecánica cuántica, toparse con ella por primera vez produce enorme extrañeza. ¿De dónde salen esa representación matemática y esas reglas para calcular probabilidades? La mayoría de los que la usan y la enseñan se han acostumbrado a que la teoría siempre dé respuestas correctas. Quizá por eso, ni cuestionan su validez ni se hacen la pregunta que corroía a John Wheeler: “¿De dónde viene la mecánica cuántica?” [9]. Si no contestamos esa pregunta, seguirá siendo cierto que usamos y enseñamos la mecánica cuántica sin entenderla.

Pero, si es cierto que la rareza de la mecánica cuántica reside en la primera capa, o sea, la TC, ¿es posible derivar la TC a partir de principios físicos?

Desde 2001, existen varias derivaciones o “re-construcciones” de la TC a partir de axiomas más o menos sencillos, p. ej., [7, 8, 10, 11]. Típicamente se critican estas derivaciones diciendo que no se basan en principios físicos [12], que incluyen axiomas dudosos [13], y que no han ayudado a entender de dónde viene la TC, ni resuelven el problema de la interpretación de la mecánica cuántica [14]. Sin embargo, el marco en el que se han realizado estas derivaciones sí que nos ha enseñado muchas cosas interesantes.

La idea común en todos estos trabajos es considerar que la TC es una teoría de probabilidades que forma parte de un universo mucho más grande de posibles teorías de probabilidades. Lo que hacen estas derivaciones es ir parcelando ese universo mediante axiomas, hasta que la única superviviente es la TC. Sin embargo, en ese mismo marco, otros trabajos han seguido una estrategia muy interesante: preguntarse qué significan *operacionalmente* determinadas reglas de la TC cuando se analizan sin saber nada de la TC (p. ej., [15, 16]).

En este artículo vamos a hablar precisamente de un resultado que nace de adoptar esta perspectiva. Dejaremos de lado las matemáticas de la TC y nos preguntaremos qué ve una persona en un universo que se rige por esas matemáticas.

Observables compatibles y medidas ideales

Si medimos el número de extremidades de un ser humano, probablemente obtendremos “cuatro” como resultado. Y este resultado no cambia si repetimos la medida. No cambia incluso cuando, entre la primera y la segunda medida, medimos el número de ojos del ser humano. Podemos, incluso, medir a la vez ambos observables (el número de extremidades y el número de ojos) sin que la medida de uno de ellos afecte al resultado de la medida del otro.

Un observable se puede medir de formas distintas. Por eso hay que distinguir entre el observable y su medida. El observable agrupa a todas las medidas que producen la misma distribución de probabilidad para cada estado inicial. Lo que pase con el sistema físico después de que se haya generado el resultado es otro cantar.

La Ciencia parece tener un particular interés por las cosas que no cambian. Y, en el caso de las medidas, por aquellas que arrojan resultados persistentes y que permiten seguir haciendo medidas que, a su vez, arrojan resultados persistentes.

Este interés es el que lleva a la siguiente definición:

Dos observables, A y B , son *compatibles* si existe un observable C tal que, para todo estado φ , para cada resultado a su probabilidad cumpla $p(A = a|\varphi) = \sum_{c_a} p(C = c_a|\varphi)$, y para cada resultado b su probabilidad cumpla $p(B = b|\varphi) = \sum_{c_b} p(C = c_b|\varphi)$. Si no existe C , entonces se dice que los observables A y B son *incompatibles*.

Si A y B son observables compatibles, se dice que cada uno de ellos es una *versión de menor resolución* del observable C definido antes. Y entonces C se dice que es un *refinamiento* de A (y de B). Dicho de otro modo, dos observables son compatibles cuando tienen un refinamiento común.

Se dice que una medida de un observable *perturba* a otro observable cuando la primera cambia la distribución de probabilidad del segundo. La definición de incompatibilidad implica que cualquier medida de un observable perturba los observables que son incompatibles con él. Pero el que dos observables sean compatibles no garantiza que cualquier medida de uno de ellos no perturbe al otro. Por ello es importante identificar qué observables compatibles se pueden medir uno tras otro sin que la medida (menos perturbativa posible) de cada uno de ellos perturbe (sea cual sea el estado inicial) a los otros, con lo que el orden en que se midan los observables compatibles se volvería irrelevante.

Esto nos lleva a dos conceptos clave. El primero, es el de medida ideal de un observable.

Una *medida ideal* de un observable es aquella que no perturba ningún observable compatible.

Detengámonos a examinar algunas consecuencias de esta definición:

1. Una medida ideal de un observable arroja el mismo resultado al repetirla sobre el mismo sistema físico. Véase la Figura 1 (a).
2. Una medida ideal de un observable no perturba las distribuciones de probabilidad de medidas posteriores de observables compatibles. Véase la Figura 1 (b).
3. En particular, una medida ideal de A no perturba una medida posterior de cualquier refinamiento de A .

El segundo concepto clave es el de observable ideal.

Un *observable ideal* es aquel que cumple que tanto él como sus versiones de menor resolución se pueden medir idealmente.

Una consecuencia de esta definición es que:

4. Un observable ideal X con d posibles resultados, a, b, \dots, c , siempre se puede medir mediante una secuencia de d medidas ideales: una de ellas correspondiente a la versión de menor resolución de X con resultados a y \bar{a} (“no a ”), otra correspondiente a la versión de menor resolución de X con resultados b y \bar{b} ,..., y otra correspondiente a la versión de menor resolución de X con resultados c y \bar{c} . Véase la Figura 1 (c). El orden en el que se miden idealmente las versiones de menor resolución es irrelevante.

Todas las magnitudes de la física clásica son observables ideales.

La teoría de probabilidades para observables ideales

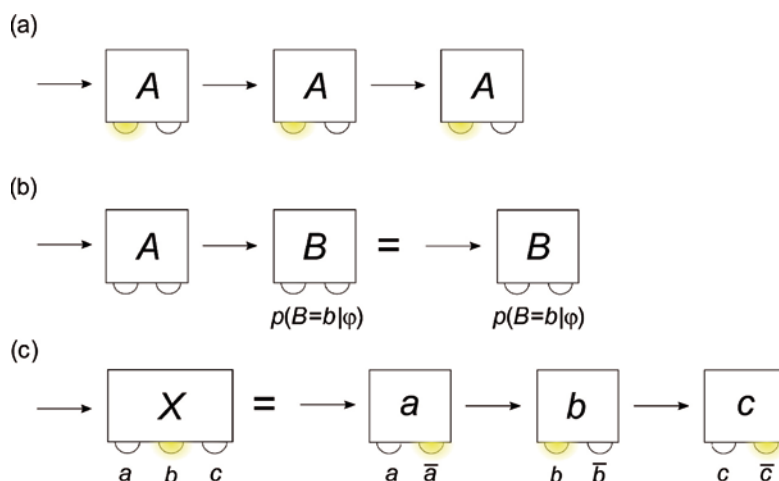
Sin embargo, en principio, la mecánica cuántica es algo completamente distinto de la física clásica. ¿Por qué entonces defendemos la tesis de que, para entender la TC, hay que fijarse en los observables ideales?

Déjenme adelantarles la respuesta: porque la TC es una teoría de probabilidades para los resultados de medidas ideales de observables ideales.

Para demostrar esto, que espero sea una afirmación en la que muchos discrepen, vamos a recordar dos “incidentes”, no muy conocidos y ambos relativamente recientes, en la historia de la mecánica cuántica.

En 1932, John von Neumann publicó la que se considera la biblia de la teoría de la medición en mecánica cuántica [17]. Es ahí donde queda claramente formulada la correspondencia entre probabilidades de eventos y espacios de Hilbert complejos. Curiosamente, no es hasta 1951 que alguien, Gerhart Lüders [18] (Figura 2), se da cuenta de que algo muy importante está mal en el libro de von Neumann: la prescripción de cuál es el estado cuántico tras una medida representada por un operador autoadjunto es inconsistente con la regla de Born. Lüders corrige este error y proporciona la fórmula que, desde entonces, se considera la correcta².

¿Y por qué es tan importante la corrección de Lüders? Porque la transformación del estado que



propone Lüders corresponde al único proceso que puede asociarse a una medición de un observable A que no perturba una medición posterior de cualquier refinamiento de A . Es decir, la transformación de Lüders es la que corresponde a una medida ideal del observable A [15, 16].

Esto implica que no es suficientemente preciso decir, como escribíamos antes, que “cada observable se representa por un operador autoadjunto”. En realidad, el operador autoadjunto no representa el observable, sino una forma concreta de medir el observable. Además, puesto que en TC suponemos que cualquier operador autoadjunto corresponde a un observable, deberíamos decir: “Cada operador autoadjunto representa la medida ideal de un observable ideal”, ya que en TC cualquiera de las versiones de menor resolución de un observable se puede medir idealmente.

Llegados a este punto, alguien podría poner una o varias de las siguientes objeciones:

- i) La forma más general de representar las medidas en mecánica cuántica no es mediante operadores autoadjuntos, sino mediante las denominadas *POVM*. De hecho, los tratados modernos hacen énfasis en este punto (véase, p. ej., [19]).
- ii) La mayoría de las medidas que se hacen en los laboratorios no son ideales, y se describen correctamente mediante *POVM*.
- iii) Las medidas ideales, probablemente, no existen en la naturaleza.

Para responder a i), conviene hablar del segundo “incidente” al que nos referíamos al principio. En los años 1940, Mark A. Naimark (o Neumark, según la transliteración) (Figura 2) demostró el teorema que se llama “de dilatación” [20], que establece que cualquier *POVM* se puede implementar mediante un operador autoadjunto en un espacio de Hilbert de dimensión superior. Esto implica que, si aceptamos la mecánica cuántica, en ausencia de reglas de superselección, todas las medidas no ideales que se hacen en los laboratorios podrían, en principio, hacerse de manera ideal. Dicho de otra manera, la mecánica cuántica no predice nada que no pueda,

Figura 1. (a) Para cualquier estado inicial, una medida ideal de un observable da el mismo resultado cuando se repite. (b) Para cualquier estado inicial, una medida ideal del observable no perturba la distribución de probabilidad de los resultados de cualquier observable compatible B . Por tanto, si solamente se tiene acceso a la distribución de probabilidad de B , entonces no es posible saber si antes se ha hecho o no una medida ideal de A . (c) Una medida ideal de un observable ideal X con tres posibles resultados, a, b, c , se puede implementar mediante una secuencia (en orden arbitrario) de tres medidas ideales, cada una de ellas con dos posibles resultados.

² Por ejemplo, según la regla de Lüders, si el estado inicial es el descrito por $\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ y medimos el observable representado por el proyector sobre $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ y obtenemos el resultado asociado al autovalor 1, entonces el estado después de la medida es el descrito por $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$. Pero si el resultado es el asociado al autovalor 0, entonces el estado después de la medida es el descrito por $\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$. En ambos casos el estado tras la medida es de máxima información. Sin embargo, según von Neumann, en el segundo caso el estado tras la medida sería un estado mezcla.

en principio, conseguirse usando *solamente* medidas ideales de observables ideales.

Ergo se puede decir que la TC es una teoría de probabilidades para los resultados de medidas ideales de observables ideales.

El que la mayoría de las medidas que se hacen en los laboratorios no sean ideales no quiere decir que no se puedan hacer medidas ideales de esos mismos observables. Lo que suele pasar es que esas medidas ideales son mucho más difíciles de hacer.

¿Son posibles las medidas ideales? Por supuesto que sí. No solo ocurre que todas las magnitudes de la física clásica son observables ideales que no es difícil medir de forma ideal, sino que, hoy en día, tenemos un control extremadamente preciso de procesos naturales que implementan medidas ideales de observables ideales no clásicos (véase, p. ej., [21]) y sabemos cómo medir, en principio, todos los observables ideales concebibles en muchos casos (véase, p. ej., [22]).

Además, conviene recordar que el progreso de la Ciencia se ha sustentado, en muchas ocasiones, en idealizaciones.

Experimentos de correlaciones

Para distinguir unas teorías de probabilidades de otras, es importante seleccionar aspectos que sean experimentalmente verificables y que, además, caractericen por sí mismos una buena parte de cada una de las teorías.

Dado el papel central que tienen en TC las medidas ideales de observables ideales, una posible elección es comparar los conjuntos de correlaciones que genera cada teoría para cada escenario compuesto por medidas ideales de observables ideales.

En nuestro caso, el concepto de *escenario* agrupa todos los experimentos en los que hay una fuente que prepara sistemas, un conjunto con un número fijo de medidas ideales de observables ideales, cada uno de ellos con un número de resultados posibles, y las relaciones de compatibilidad entre ellos. Por ejemplo, un escenario es el formado por cuatro observables abstractos A, B, C, D , cada uno con dos resultados posibles, 0 y 1, y en los que los siguientes pares son compatibles: $(A, B), (B, C), (C, D), (A, D)$.

Si consideramos *todos* los pares $(\varphi, \{A, B, C, D\})$, donde φ es un estado posible en la teoría y $\{A, B, C, D\}$ es un conjunto posible en la teoría de cuatro observables dicotómicos con las relaciones de compatibilidad mencionadas antes, generaremos el conjunto de *correlaciones* para ese escenario. Cada uno de los elementos de ese conjunto es una lista de distribuciones de probabilidad. Hay una distribución por cada subconjunto de observables mutuamente compatibles. En nuestro ejemplo, esa lista es $\{p(A = a, B = b | \varphi), p(B = b, C = c | \varphi), p(C = c, D = d | \varphi), p(A = a, D = d | \varphi)\}$, con $a, b, c, d \in \{0, 1\}$. Recuérdese que, como los observables son ideales

y compatibles, el orden en el que se hagan las medidas ideales es irrelevante.

El conjunto de los conjuntos de correlaciones que son posibles en cada escenario caracteriza, en buena medida, la teoría. En la teoría de probabilidades de observables ideales en física clásica, *para cualquier escenario*, el correspondiente conjunto de correlaciones es la envolvente convexa de un conjunto finito de puntos que corresponden a los casos en los que los sistemas físicos *tienen* valores predeterminados para todos los observables. Además, cada una de las distribuciones de probabilidades para un subconjunto de observables compatibles se puede obtener como distribución *marginal* de una única distribución de probabilidades. En nuestro ejemplo, de la distribución $p(A = a, B = b, C = c, D = d | \varphi)$.

Para teorías de probabilidad más generales, un teorema de Nicolai N. Vorob'ev [23] (véase la Figura 2) establece que en ciertos escenarios es posible obtener un conjunto de correlaciones *mayor que el clásico*: aquellos en los que el grafo de compatibilidad sea no cordal. El *grafo de compatibilidad* de un escenario es aquel en el que cada observable se representa por un vértice y cada pareja de observables compatibles está conectada por una arista. En nuestro ejemplo, el grafo de compatibilidad es un cuadrado. El que un grafo sea *no cordal* quiere decir que contiene, como subgrafos inducidos, ciclos de más de tres vértices (es decir, cuadrados, pentágonos, hexágonos, etc.). Por lo tanto, el grafo no cordal más sencillo es, precisamente, el cuadrado.

¿Y en cuáles de los escenarios cuyo grafo de compatibilidad es no cordal puede haber, según la TC, correlaciones *no clásicas*? En todos [24].

¿De dónde viene la teoría cuántica?

Para intentar responder a esta pregunta desde la perspectiva de los conjuntos de correlaciones (para escenarios con medidas ideales de observables ideales), la estrategia es clara: Para cada escenario, construyamos el conjunto de correlaciones mayor posible (i. e., permitido por la definición de medida ideal de un observable ideal y haciendo hipótesis adicionales “razonables”). Luego busquemos leyes físicas que lo parcelen hasta que, para todos los escenarios, el conjunto de correlaciones sea exactamente el que permite la TC. Esas leyes previsiblemente nos dirán algo del origen *físico* de la TC.

Consideremos como hipótesis adicional razonable la siguiente:

(I) Es posible generar copias estadísticamente independientes de cualquier elemento del conjunto de correlaciones.

Se puede demostrar que, para cada escenario, el conjunto de correlaciones para medidas ideales de observables ideales mayor que satisface la hipótesis (I) es indistinguible del de la TC [25].

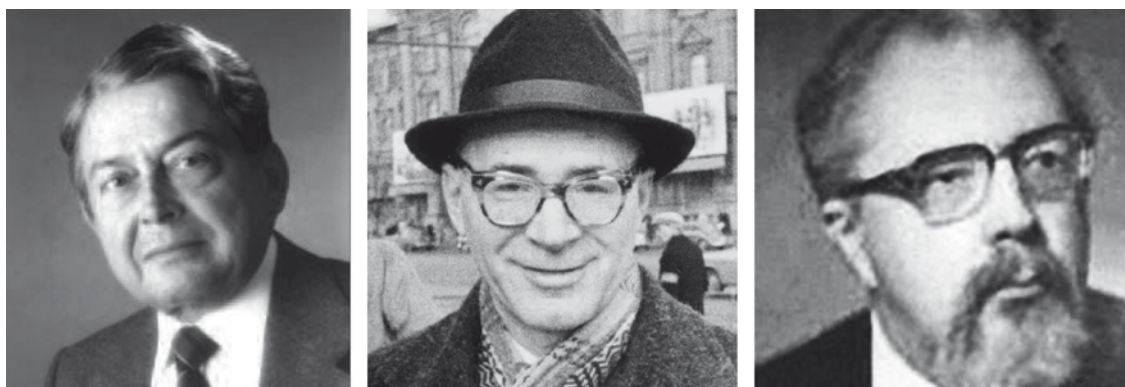


Figura 2. Tres personajes clave para entender la teoría cuántica. Solo uno de ellos, Lüders, trabajó en física cuántica, concretamente en teoría cuántica de campos. Naimark realizó contribuciones importantes en análisis funcional y teoría de grupos. Vorob'ev en teoría de juegos. Izquierda: Gerhart Lüders (1920-1995). Centro: Mark Aronovich Naimark (1909-1978). Derecha: Nicolai Nikolaevich Vorob'ev (1925-1995). (No ha sido posible identificar a los poseedores de estas fotografías).

La demostración

La demostración consta de tres pasos. El primero es un teorema que establece que, si tenemos un conjunto de eventos generados por medidas ideales de observables ideales compatibles y tal que los eventos son excluyentes *dos a dos*, entonces la suma de las probabilidades de los eventos de ese conjunto no puede ser mayor que 1. Esto es lo que, a veces, se llama el *principio de exclusividad*, pero que aquí no es un principio sino un teorema. Dos eventos ($A = a|\varphi\rangle$ y $B = b|\varphi\rangle$) son mutuamente excluyentes si existe un refinamiento común de A y B tal que cada uno de esos eventos corresponde a un resultado *distinto* de ese refinamiento.

El segundo paso consiste en dividir las correlaciones que produce una teoría *no por escenarios sino por grafos de exclusividad*. En un *grafo de exclusividad* los vértices representan eventos y las parejas de eventos mutuamente excluyentes están unidas por una arista. Podemos elegir un grafo arbitrario, por ejemplo, el pentágono, y preguntarnos cómo es el conjunto de asignaciones de probabilidad que permite la teoría, sea cual sea el escenario en el que estos eventos (que tienen que satisfacer las relaciones de exclusividad dadas por el grafo) han sido generados.

En la teoría de probabilidades de observables ideales en física clásica, *para cualquier grafo*, el correspondiente conjunto de correlaciones es la envolvente convexa de los vectores característicos de los conjuntos independientes del grafo. De nuevo, en TC, es un conjunto que, para grafos no perfectos, es mayor ya que es el llamado cuerpo theta del grafo [26], que curiosamente fue introducido en los años 1980 en teoría de grafos, sin referencia alguna a la mecánica cuántica.

Lo interesante es que se puede demostrar que, para cualquier grafo, el conjunto de correlaciones que satisfacen el principio de exclusividad y la hipótesis (I) es exactamente el conjunto de correlaciones de la TC. Y en este paso ya han aparecido los espacios de Hilbert y la regla de Born que tanta extrañeza causan.

El último paso consiste en añadir las condiciones de normalización y no perturbación que son características de cada escenario, junto con el requisito de que la probabilidad de cada evento solo

puede ser función del estado y los resultados que lo definen. Véase [25] para más detalles.

Conclusión

El resultado enunciado antes (“el conjunto de correlaciones para medidas ideales de observables ideales mayor que satisface la hipótesis (I) es indistinguible del de la TC”) no constituye una derivación *completa* de la TC. Pero está muy cerca. Quedan por desarrollar detalles y, sobre todo, responder a la pregunta de por qué el espacio de Hilbert tiene que ser *complejo* (y no basta con espacios de Hilbert reales). Hay muy buenas razones para ello. Por ejemplo, la probable imposibilidad de construir extensiones de la teoría que sean invariantes Lorentz [27, 28] y la demostrada imposibilidad de producir correlaciones en escenarios con dos fuentes independientes usando solo estados producto [29, 30]. Pero son razones que no están relacionadas con el argumento principal que hemos desarrollado en este artículo.

Para terminar, me gustaría enfrentar al lector al siguiente dilema: Supongamos que aceptamos que los observables ideales son elementos esenciales en Física. Supongamos que, efectivamente, la TC fuese la teoría de probabilidades más general posible para medidas ideales de observables ideales. ¿Qué nos estaría diciendo eso sobre el origen físico de la TC?

Una posible respuesta es el argumento de que, si esto es así, cualquier civilización científica acabará encontrando la TC, con independencia de cómo sea el universo en el que viva. Y, consecuentemente, cualquiera que haga una interpretación bayesiana de las probabilidades debería abrazar fervorosamente la TC como herramienta, con independencia de cómo sea el universo [31].

Pero el caso es que, en nuestro universo, hay sistemas físicos e interacciones sobre ellos que permiten generar experimentalmente cualquier correlación entre medidas ideales permitida por la TC. Esa es una forma corta de decir que, en nuestro universo, es posible preparar cualquier estado e implementar cualquier medida ideal de un observable ideal permitida por la TC (véase, p. ej., [22]). Ante esa evidencia, lo más sencillo es concluir que, al menos en lo que se refiere a esos sistemas físicos e interacciones, la única ley de la naturaleza es que no hay ninguna ley [28].

Agradecimientos

El autor quiere dar las gracias a Antonio J. López Tarrida por sus comentarios sobre el texto. Nuestras investigaciones están financiadas por el proyecto Qdisc (US-15097), con fondos FEDER, y el proyecto QuantERA SECRET (MINECO, PCI2019-111885-2).

Referencias

- [1] R. P. FEYNMAN, *The Character of Physical Law* (M.I.T. Press, 1965). El momento en el que Feynman pronuncia la famosa frase se puede ver, en vídeo, en: <https://youtu.be/w3ZRLlWgHI>
- [2] A. EINSTEIN, *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* (Alianza, 2012).
- [3] S. AARONSON, *Quantum Computing since Democritus* (Cambridge University Press, 2013).
- [4] L. MASANES y M. P. MÜLLER, "Information-theoretic Postulates for Quantum Theory", en *Quantum Theory: Informational Foundations and Foils*, Fundamental Theories of Physics 181, editado por G. Chiribella y R. W. Spekkens (Springer, 2016), p. 139.
- [5] C. H. ISHAM, *Lectures on Quantum Theory. Mathematical and Structural Foundations* (Imperial College Press, 1995).
- [6] M. RECK, A. ZEILINGER, H. J. BERNSTEIN y P. BERTANI, "Experimental Realization of any Discrete Unitary Operator", *Phys. Rev. Lett.* 73, 58 (1994).
- [7] L. HARDY, "Quantum Theory from Five Reasonable Axioms", *quant-ph/0101012* (2001).
- [8] G. CHIRIBELLA, G. M. D'ARIANO y P. PERINOTTI, "Informational Derivation of Quantum Theory", *Phys. Rev. A* 84, 012311 (2011).
- [9] J. A. WHEELER, "How Come the Quantum?", en *New Techniques and Ideas in Quantum Measurement Theory*, *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 480, 304 (1986).
- [10] L. MASANES y M. P. MÜLLER, "A Derivation of Quantum Theory from Physical Requirements", *New J. Phys.* 13, 063001 (2011).
- [11] H. BARNUM, M. P. MÜLLER y C. UDUDEC, "Higher-order Interference and Single-System Postulates Characterizing Quantum Theory", *New J. Phys.* 16, 123029 (2014).
- [12] C. A. FUCHS y B. C. STACEY, "Some Negative Remarks on Operational Approaches to Quantum Theory", en *Quantum Theory: Informational Foundations and Foils*, Fundamental Theories of Physics 181, editado por G. Chiribella y R. W. Spekkens (Springer, 2016), p. 283.
- [13] M. NAVASCUÉS, "Teorías supercuánticas", *Investigación y Ciencia* 480, septiembre de 2016, p. 66.
- [14] L. HARDY, en "Quantum Theory Rebuilt from Simple Physical Principles", de P. Ball, *Quanta Magazine*, 2017 (<https://bit.ly/3ua5TOA>)
- [15] M. KLEINMANN, "Sequences of Projective Measurements in Generalized Probabilistic Models", *J. Phys. A* 47, 455304 (2014).
- [16] G. CHIRIBELLA y X. YUAN, "Bridging the Gap Between General Probabilistic Theories and the Device-Independent Framework for Nonlocality and Contextuality", *Information and Computation* 250, 15 (2016).
- [17] J. VON NEUMANN, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer-Verlag, 1932). Edición más reciente en español: *Fundamentos matemáticos de la mecánica cuántica* (CSIC, 2018).
- [18] G. LÜDERS, "Über die Zustandsänderung durch den Meßprozeß", *Ann. Phys. (Leipzig)* 8, 322 (1951). Versión en inglés: "Concerning the State-change Due to the Measurement Process", *Ann. Phys. (Leipzig)* 15, 663 (2006).
- [19] M. A. NIELSEN e I. CHUANG, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000).
- [20] M. A. NEUMARK, "Self-adjoint Extensions of the Second Kind of a Symmetric Operator", *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R. [Bull. Acad. Sci. U.S.S.R.] Sér. Mat.* 4, 53 (1940); "Spectral Functions of a Symmetric Operator", *Izv. Akad. Nauk S.S.S.R. [Bull. Acad. Sci. U.S.S.R.] Sér. Mat.* 4, 277 (1940); "On a Representation of Additive Operator Set Functions", *C. R. (Dokl.) Acad. Sci. U.R.S.S. (N. S.)* 41, 359 (1943).
- [21] F. POKORNY, C. ZHANG, G. HIGGINS, A. CABELLO, M. KLEINMANN y M. HENNRICH, "Tracking the Dynamics of an Ideal Quantum Measurement", *Phys. Rev. Lett.* 124, 080401 (2020).
- [22] B. ROUSSEAUX, S. GUÉRIN y N. V. VITANOV, "Arbitrary Qudit Gates by Adiabatic Passage", *Phys. Rev. A* 87, 032328 (2013).
- [23] N. N. VOROB'EV, "Consistent Families of Measures and their Extensions", *Theory Probab. Appl.* 7, 147 (1962).
- [24] Z.-P. XU y A. CABELLO, "Necessary and Sufficient Condition for Contextuality from Incompatibility", *Phys. Rev. A* 99, 020103 (2019).
- [25] A. CABELLO, "Quantum Correlations from Simple Assumptions", *Phys. Rev. A* 100, 032120 (2019).
- [26] A. CABELLO, S. SEVERINI y A. WINTER, "Graph-theoretic Approach to Quantum Correlations", *Phys. Rev. Lett.* 112, 040401 (2014).
- [27] V. MORETTI y M. OPPIO, "Quantum Theory in Real Hilbert Space: How The Complex Hilbert Space Structure Emerges from Poincaré Symmetry", *Rev. Math. Phys.* 29, 1750021 (2017).
- [28] A. CABELLO, "The Problem of Quantum Correlations and the Totalitarian Principle", *Philos. Trans. R. Soc. A* 377, 2019.0136 (2019).
- [29] M.-O. RENOU, D. TRILLO, M. WEILENMANN, L. P. THINH, A. TAVAKOLI, N. Gisin, A. Acín y M. NAVASCUÉS, "Quantum Physics Needs Complex Numbers", arXiv: 2101.10873 (2021).
- [30] M.-C. CHEN *et al.*, "Ruling Out Real-number Description of Quantum Mechanics", arXiv:2103.08123 (2021).
- [31] G. CHIRIBELLA, A. CABELLO, M. KLEINMANN y M. P. MÜLLER, "General Bayesian Theories and the Emergence of the Exclusivity Principle", *Phys. Rev. Research* 2, 042001(R) (2020).

Adán Cabello

Dpto. de Física Aplicada II
e Instituto Carlos I de Física Teórica
y Computacional, Universidad
de Sevilla



Los tres físicos*

Chris DeWitt, José Edelstein y Bayram Tekin

Desde 1951, la École Normale Supérieure concede el *Premio de los Tres Físicos* en honor a Henri Abraham, Eugène Bloch y Georges Bruhat, directores sucesivos de su prestigioso laboratorio de física en tiempos oscuros. Éstas son sus historias.

Prefacio (Chris DeWitt)

Como hija de dos físicos, Bryce DeWitt y Cécile DeWitt-Morette, siempre he sido consciente del profundo impacto del Holocausto en las vidas de los científicos del siglo xx. Incontables físicos y matemáticos judíos —Albert Einstein, Lise Meitner, Emmy Noether, Edward Teller, Victor Weisskopf y Eugene Wigner, entre ellos— o aquellos casados con judíos, como Enrico Fermi, se vieron obligados a abandonar sus países con el ascenso del Tercer Reich. Otros, como el premio Nobel Georges Charpak y el medallista Fields Alexander Grothendieck, fueron enviados a campos de concentración o internamiento; Charpak a Dachau, en Alemania, y Grothendieck con su madre al Campo de Rieucros, en el sur de Francia.

Muchos de los físicos que lograron hallar refugios seguros no escaparon por ello a un sufrimiento incommensurable. El premio Nobel Walter Kohn, por ejemplo, consiguió huir de Austria cuando era adolescente en un *Kindertransport*, pero sus padres fueron asesinados por los nazis. Otros judíos, como los astrofísicos franceses Évy Schatzman y Jean-Claude Pecker, sobrevivieron al Holocausto escapando, en primer lugar, desde París a la zona desocupada del sur de Francia conocida como «zona libre», y más tarde adoptando identidades falsas. No obstante, el padre de Schatzman fue asesinado en Auschwitz-Birkenau, así como lo fueron ambos padres de Pecker, primo de mi madre.

También hubo víctimas de la barbarie nazi entre las familias de otros científicos prominentes. El hijo de Max Planck, Erwin, fue ejecutado por intentar asesinar a Adolf Hitler, y el hijo físico de Élie Cartan, Louis, fue decapitado por los nazis por pertenecer a la Resistencia Francesa. Los casos trágicos son incontables.

Debido a las propias experiencias de mi madre durante la Segunda Guerra Mundial y el bombardeo del «Día D» a la casa de su familia en Normandía, mis hermanas y yo nos

criamos escuchando historias sobre la guerra y sus secuelas. Pero algunas historias de guerra a menudo se olvidan, se pasan por alto, o sólo son contadas, en ciertas ocasiones, en tonos bajos y sombríos. La historia que se cuenta aquí es una de ellas. Me tropecé con ella casi al azar, debido a que uno de los protagonistas era el padre de una amiga íntima y coautora de mi madre, la matemática francesa Yvonne Choquet-Bruhat.

Esta no es una historia que deba relegarse a una nota a pie de página. Los destinos trágicos compartidos por los físicos franceses Henri Abraham, Eugène Bloch y Georges Bruhat merecen ser conocidos. Científicos talentosos y apasionados, maestros que dejaron su impronta en la educación de varias generaciones de físicos, comprometidos con el futuro de su país, los tres fueron traicionados por el gobierno de Vichy cuando la pestilencia del fascismo arrasó Francia.

Los tres fueron directores sucesivos del famoso Laboratorio de Física de la École Normale Supérieure (ENS), una de las instituciones más prestigiosas de Francia. Una fachada, que fue la entrada original de la ENS, se muestra en la Figura 1, mientras que la entrada del Laboratorio de Física, que da a la calle, se ve en la Figura 2. Por más de tres décadas, durante las revoluciones científicas de la mecánica cuántica y la relatividad, primero Abraham, luego Bloch y finalmente Bruhat dirigieron el laboratorio. Son conocidos en la comunidad de la física francesa como «les trois physiciens», los tres físicos [1].

La universidad bajo amenaza

El 4 de agosto de 1944, en París, la Gestapo irrumpió en el campus de la ENS. La derrota de Alemania ya era inevitable, pero sus líderes seguían determinados a llevar a cabo la «solución final» —el plan nazi para exterminar a todas las personas judías— a cualquier precio. Buscaban a un estudiante de literatura sospechoso de formar parte de la Resistencia Francesa, pero el director adjunto de la ENS, Georges Bruhat, y el secretario general, Jean Baillou, se negaron a revelar su paradero.

Cinco meses antes, Bruhat (Figura 3) ya había sido arrestado por defender a varios empleados que fueron detenidos

* Versión en español del artículo de Chris DeWitt, José Edelstein y Bayram Tekin “The three physicists”, *Physics Today* 74(3), 42-48 (2021). Publicado con el permiso del American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/PT.3.4700>

Figura 1. Entrada principal de la École Normale Supérieure. (Wikimedia Commons).



por la Gestapo acusados de haber puesto a cubierto a paracaidistas aliados en los sótanos de la ENS, pero finalmente fue liberado. Esta vez los alemanes fueron absolutamente brutales: detuvieron a las esposas, Berthe Hubert Bruhat y Aline Baillou, y amenazaron con matarlas al día siguiente si sus demandas en relación al paradero del estudiante no eran satisfechas [2]. Yvonne Choquet-Bruhat suplicó que le permitieran ocupar el lugar de su madre, pero los alemanes se negaron [3].

La Gestapo no cumplió con sus amenazas contra las mujeres, pero Georges Bruhat y Jean Baillou fueron llevados al sur de París, a la prisión de Fresnes, que los alemanes solían utilizar para retener y torturar a agentes británicos y miembros de la Resistencia Francesa. A medida que las fuerzas

aliadas se acercaban a París, los alemanes mataron o trasladaron apresuradamente a sus prisioneros. Uno de los últimos trenes que salieron de Fresnes partió rumbo a Alemania el 15 de agosto. Llevaba a Bruhat y Baillou. París fue liberada la semana siguiente.

Bruhat no tenía autocompasión. Apoyó resueltamente la moral de otros prisioneros. Fue trasladado al campo de concentración de Sachsenhausen, donde el mayor de los hijos de Joseph Stalin había sido asesinado el año anterior, junto con varias decenas de miles de personas, en su mayoría presos políticos. Algunos supervivientes relataron que Bruhat reunió a un grupo de estudiantes, ingenieros y oficiales encarcelados en Sachsenhausen, ávidos de actividad intelectual, y se puso a enseñarles la física del Sol. Pero enfermó de bronconeumonía, trágicamente, y murió en el hospital del campo en la víspera del año nuevo, cuando la mayor parte de Francia ya había sido liberada. Baillou, que era más joven y fuerte, consiguió sobrevivir y regresó a París en la primavera de 1945.

Una vez que Bruhat entró en la delirante maquinaria de la Gestapo, ya no había salida. Ninguno de sus captores sabía que este hombre, debilitado por las condiciones inhumanas de su detención, era un físico muy notable, un profesor venerado por sus alumnos y el autor de cuatro volúmenes de un colosal curso de física general, traducido a varios idiomas y obra de referencia obligatoria en muchas universidades europeas. Pero la historia de Georges Bruhat y su trágico destino no puede contarse sin empezar por las de otros dos físicos franceses: Henri Abraham y Eugène Bloch.

Henri Abraham: El gran inventor

Henri Abraham (Figura 4) nació en París el 12 de julio de 1868; era el quinto de seis hijos en una familia judía. Entró a la ENS como estudiante en 1886. Como tantos físicos franceses en aquellos tiempos, comenzó su carrera enseñando en una prestigiosa escuela secundaria, Louis-le-Grand, que está a un corto paseo de la ENS y cuenta entre sus exalumnos a gigantes como Henri Poincaré, Victor Hugo y Jean-Paul Sartre. También enseñó durante un período en la escuela secundaria donde él mismo había sido estudiante —el Collège Chaptal, entre cuyos exalumnos estaba Alfred Dreyfus, el oficial judío francés que fue falsamente condenado por presunta traición al calor del virulento antisemitismo de la época.

Abraham estaba interesado en los trabajos de Heinrich Hertz, quien buscaba probar la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por las ecuaciones de Maxwell. En su tesis doctoral decidió verificar otra de las predicciones del escocés: que la velocidad de propagación de las ondas debía ser igual a la relación entre las unidades

Figura 2. El Laboratorio de Física de la École Normale Supérieure. Construido en 1937, ha sido objeto de varias reformas y una ampliación. (Fotografía cortesía de Sebastien Balibar).



de carga eléctrica definidas en los dos sistemas en uso (electrostáticas y electromagnéticas). En 1892 obtuvo un resultado preciso, dentro del 1 % de los encontrados por Joseph John Thomson en la Universidad de Cambridge. En ese momento, pocos conocían la conexión entre las ondas electromagnéticas y la luz. El acuerdo general entre las mediciones de la velocidad de propagación de ambas ayudó a confirmar la teoría electromagnética y colocó a Abraham, a la edad de 24 años, al mismo nivel que los mejores físicos experimentales de su época. El resto de su carrera científica estuvo dedicada a las verificaciones y aplicaciones de la teoría electromagnética.

En 1912, Henri Abraham se convirtió en profesor titular de la Universidad de París y asumió la dirección del laboratorio de física de la ENS. Su carrera fue interrumpida por la Primera Guerra Mundial, durante la cual fue designado en el servicio de telegrafía militar junto a otros científicos de renombre, como Léon Brillouin y los hermanos Eugène y Léon Bloch. Trabajando juntos desde el laboratorio de la ENS, inventaron una serie de nuevos dispositivos de transmisión de radio que tuvieron una enorme relevancia.

A Abraham se le atribuye la mejora del sistema de lámparas de tres electrodos usada por el ejército de Estados Unidos, perfeccionando la técnica utilizada para obtener un vacío alto y duradero; sus lámparas pasaron a ser el estándar y se distribuyeron a todos los ejércitos aliados. Poco tiempo después, junto a Eugène Bloch, ambos construyeron los primeros amplificadores de radio que hacían uso de estas lámparas. Posteriormente desarrollaron otros dispositivos electrónicos esenciales para la transmisión de radio y, en última instancia, el éxito del esfuerzo de los aliados en la guerra. Además, Abraham estuvo a cargo del «aparato Walzer», un notable detector sonar submarino que desarrolló conjuntamente con Charles Fabry y Paul Langevin. Por todos estos logros, Abraham fue condecorado con la membresía de la Legión de Honor militar.

Abraham fue un inventor prodigioso y un maestro respetado. Tenía un interés especial en lograr registrar fenómenos rápidos. Su dominio de las técnicas de vacío y su uso del entonces recientemente establecido sistema intercontinental de transmisión de ondas de radio para obtener un valor aún más preciso de la velocidad de las ondas electromagnéticas lo convirtieron en un protagonista vital para la comunidad científica francesa. Fue secretario general de la Sociedad Francesa de Física, amplió el laboratorio de física de la ENS durante su mandato y lo mantuvo funcionando durante los tiempos difíciles de la Gran Depresión, hasta retirarse en 1937. El *gran inventor* estuvo tan involucrado en el diseño de los planos de construcción y las especificaciones técnicas del laboratorio que el director de la ENS sugirió agregar

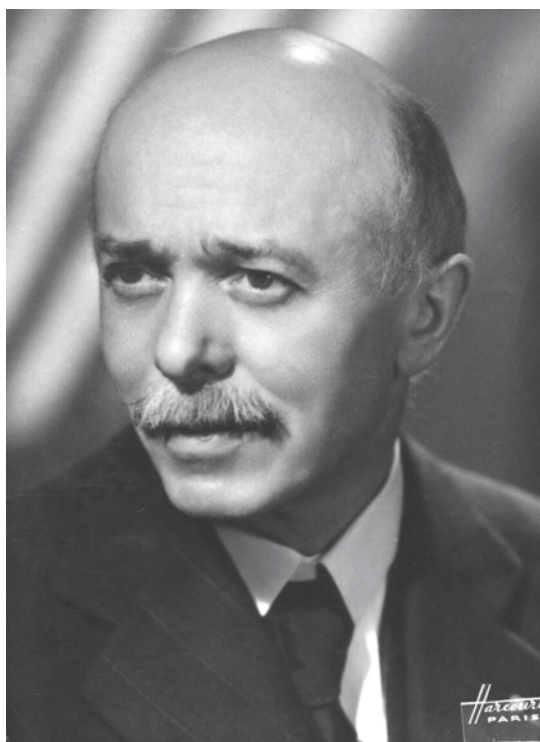


Figura 3. Georges Bruhat (1887-1945). Retrato realizado en el Studio Harcourt de París alrededor de 1930. (Fotografía cortesía de École Normale Supérieure).

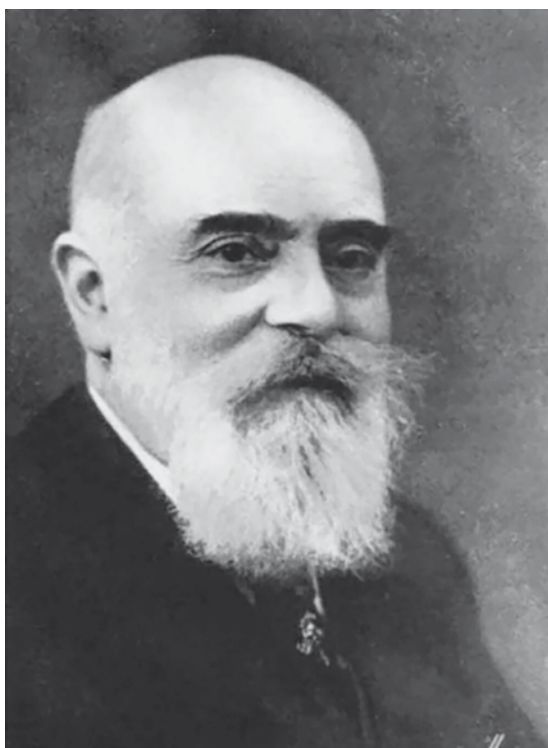
un certificado de arquitectura a la lista de títulos académicos de Abraham.

El 1 de septiembre de 1939 la Alemania nazi invadió Polonia y el 10 de mayo de 1940 atacó Francia y los Países Bajos. Abraham salió de París con órdenes de unirse a la sección técnica de artillería en Burdeos. Después del armisticio de junio de 1940 entre Alemania y Francia, se reunió con su familia en Aix-en-Provence. En 1942, las tropas alemanas ocuparon el resto de Francia. Henri Abraham fue arrestado la noche del 23 de junio de 1943. Fue llevado a Marsella con su hija mayor, quien no quiso dejar a su padre enfermo. De allí fueron trasladados a Drancy, una ciudad al noreste de París con un campo de internamiento por el que pasaron la mayoría de los judíos franceses y otros deportados antes de ser enviados a los campos de exterminio en Alemania y Polonia. Padre e hija permanecieron allí brevemente antes de ser deportados a Auschwitz. Al llegar, lo más probable es que Abraham fuera enviado directamente a las cámaras de gas.

Eugène Bloch: Bajo el hechizo de la cuántica

Eugène Bloch (Figura 5) nació el 10 de junio de 1878, dos años después que su hermano mayor, Léon, en el pequeño pueblo de Soultz, en Alsacia. Nacieron pocos años después de la anexión de Alsacia a Alemania. Debido a que su padre quería que sus hijos recibieran una educación francesa, vendió su pequeña fábrica de tejido de seda y se mudaron a París. Los dos hermanos sobresalieron durante el bachillerato en Louis-le-Grand, en el que Abraham enseñó, y ambos entraron más tarde a la ENS. Exploraron diferentes campos, como la

Figura 4. Henri Abraham (1868-1943). Retrato realizado en el Studio Harcourt de París hacia 1935. (Tomado de la ref. 1; disponible en Wikimedia Commons).



filosofía y la botánica, antes de dedicarse ambos a la física. Tras ser profesor del Lycée Saint-Louis por más de una década —en medio de la cual fue designado al servicio de telegrafía militar junto a Abraham— Eugène se convirtió en profesor de Física y Química de la ENS en 1920.

Bloch fue un profesor excepcional. Fue él quien incitó a Alfred Kastler a estudiar los trabajos de Arnold Sommerfeld en el entonces naciente campo de la mecánica cuántica. Las clases de Bloch eran

claras y llenas de ingenio. En un período de diez años escribió cuatro libros: sobre la teoría cinética de los gases, sobre los fenómenos termoiónicos, sobre su experiencia de física aplicada trabajando en el servicio de telegrafía militar y, quizás el más notable de ellos, sobre la teoría cuántica. Esta obra temprana sobre la mecánica cuántica fue considerada «la biblia» entre los físicos franceses durante las décadas siguientes.

Eugène Bloch llevó a cabo sus primeras investigaciones en la floreciente área de la física atómica, dentro de la cual se enfocó en la conexión entre los fenómenos de ionización y fosforescencia. Aquel trabajo estimuló su interés por la ionización producida por la luz ultravioleta —el efecto fotoeléctrico descubierto por Hertz en 1887. Bloch fue uno de los primeros en demostrar la importancia de operar con luz monocromática. Sus publicaciones de 1908 y 1910 brindaron un apoyo sustancial a la explicación teórica del efecto fotoeléctrico propuesta por Albert Einstein en 1905, la que acabaría siendo reconocida con el premio Nobel unos años más tarde.

Debido a su amplia experiencia en el manejo de la luz ultravioleta, Bloch dedicó el resto de su carrera a la espectroscopía. A partir de 1912 orientó su trabajo a proveer datos experimentales precisos que sirvieran a la nueva teoría cuántica. Desarrolló con notable ingenio el primer espectrógrafo de vacío que usaba una red de difracción de reflexión cóncava, lo que le permitió alcanzar longitudes de onda de 20 nanómetros, más allá del ultravioleta lejano. Las tablas de longitudes de onda hechas con el espectrógrafo, de 30 elementos químicos y sus diversos iones, siguen en uso en la actualidad.

Eugène Bloch sucedió a Abraham como director del laboratorio de física y supervisó la finalización de su nuevo edificio, en el que ambos habían trabajado, en 1937. Tres años más tarde el régimen de Vichy decretó que los judíos ya no podían ocupar cargos públicos, por lo que Bloch tuvo que irse. En octubre de 1941, él y su hermano Léon abandonaron rápidamente París y lograron cruzar clandestinamente la línea de demarcación para refugiarse en Lyon, que estaba en la «Zona Libre». Fueron recibidos calurosamente por sus colegas científicos de la Universidad de Lyon.

Léon escribió un panfleto satírico dirigido a Philippe Pétain, jefe de estado del régimen de Vichy, por el cual fue arrestado. Aquel arresto finalmente salvó su vida. Eugène, mientras tanto, se refugió en diferentes lugares bajo una identidad falsa. Intentó sin éxito cruzar la frontera suiza y acabó ocultándose en las montañas. El 24 de junio de 1944 fue arrestado por la Gestapo y enviado a Drancy. Unas semanas más tarde fue deportado a Auschwitz, donde encontró el mismo fatídico destino que Henri Abraham.

Figura 5. Eugène Bloch (1878-1944). (Fotografía cortesía de la École Normale Supérieure).



Georges Bruhat: Maestro de la luz

Los tres directores fundadores del laboratorio de física de la ENS se siguen unos a otros en edad en aproximadamente una década. Bloch nació diez años después de Abraham, y Bruhat lo hizo el 21 de diciembre de 1887, nueve años más tarde que el primero. Ingresó en la ENS en 1906 y acabó su tesis doctoral en 1914, poco antes de que comenzara la Primera Guerra Mundial. Mientras completaba su trabajo de tesis sobre la dispersión anómala del poder rotatorio molecular, bajo la dirección de Aimé Cotton, enseñó en el Lycée Buffon de la *Rive gauche* parisina. Bruhat entró al ejército francés en 1915 y recibió la *Croix de Guerre* por sus contribuciones a la detección acústica de cañones.

Después de la guerra, Bruhat fue contratado en la Universidad de Lille, unos cientos de kilómetros al norte de París, y fue promovido a catedrático en 1921. Un año más tarde, su esposa Berthe, profesora de filosofía, dio a luz a su hija Jeanne, y poco después, en 1923, a Yvonne, quien también acabó convirtiéndose en física. No fue hasta 1927 que Bruhat obtuvo una cátedra de física estelar en París, en la Sorbona. Su preferencia por esa área de la astronomía le llevó a escribir dos libros de divulgación de alto nivel: *Le soleil* (El Sol) y *Les étoiles* (Las estrellas). Su hijo, el matemático François Bruhat, nació en 1929. Tras el retiro de Abraham, Bruhat se convirtió en el director adjunto del laboratorio de física de la ENS, bajo la dirección de Bloch. Y cuando éste fue despedido con el pretexto de las leyes antisemitas del régimen de Vichy, Bruhat, quien no era judío, se convirtió en el director en funciones.

Georges Bruhat era un experto de primer nivel en óptica y estaba especializado en medios cristalinis anisotrópicos, que se volvieron importantes para el desarrollo de la física del estado sólido después de la Segunda Guerra Mundial. Preparó varios experimentos con luz polarizada circularmente, tanto visible como ultravioleta, y estudió fenómenos como el dicroísmo circular y la birrefringencia por compresión. Se interesó en la termodinámica y, pese a ser esencialmente un físico experimental, también fue un teórico consumado; de hecho, en 1926 recibió un premio de la Fundación Becquerel por su trabajo en física teórica.

Además de sus importantes contribuciones a diferentes campos de la física, Bruhat dejó un precioso legado a la comunidad científica. Fue un prolífico escritor de libros de texto, y en el lapso de una década escribió un tratado de cuatro volúmenes sobre electricidad (1924), termodinámica (1926), óptica (1930, con la sexta edición publicada en 1965 por Kastler) y mecánica (1934). Juntos constituyeron su curso de física general. El libro de óptica, sin duda el más completo de todos, continúa sirviendo de referencia en muchos aspectos de óptica experimental. Los físicos franceses siguen considerando que estos volúmenes están en-

tre los libros más importantes de su educación; los llaman, sencillamente, los *Bruhats*.

En el verano de 1944, el director de la ENS Jérôme Carcopino, quien había colaborado con el régimen de Vichy, decidió abandonar París en previsión de la llegada de las fuerzas aliadas. Puso a Bruhat, entonces director adjunto de la ENS, a cargo de la misma. Y ésta es la razón por la que acabó siendo interrogado por la Gestapo en relación al paradero del estudiante de literatura. La hija de Bruhat, Yvonne, nunca tuvo la oportunidad de despedirse de su amado padre [4].

La familia de Bruhat se aferró a la esperanza de que regresaría eventualmente a casa en algún momento. Yvonne continuó con sus estudios mientras intentaba obtener información sobre el paradero de su padre. Debido a que era católica en aquel momento, acudió al capellán de la ENS en busca de ayuda. El capellán le preguntó «¿Tu padre era católico practicante?». Cuando Yvonne respondió que no lo era, el clérigo respondió: «Bueno, entonces rezaré por él» [5]. No fue hasta la primavera de 1945 cuando el nuevo director de la ENS informó a

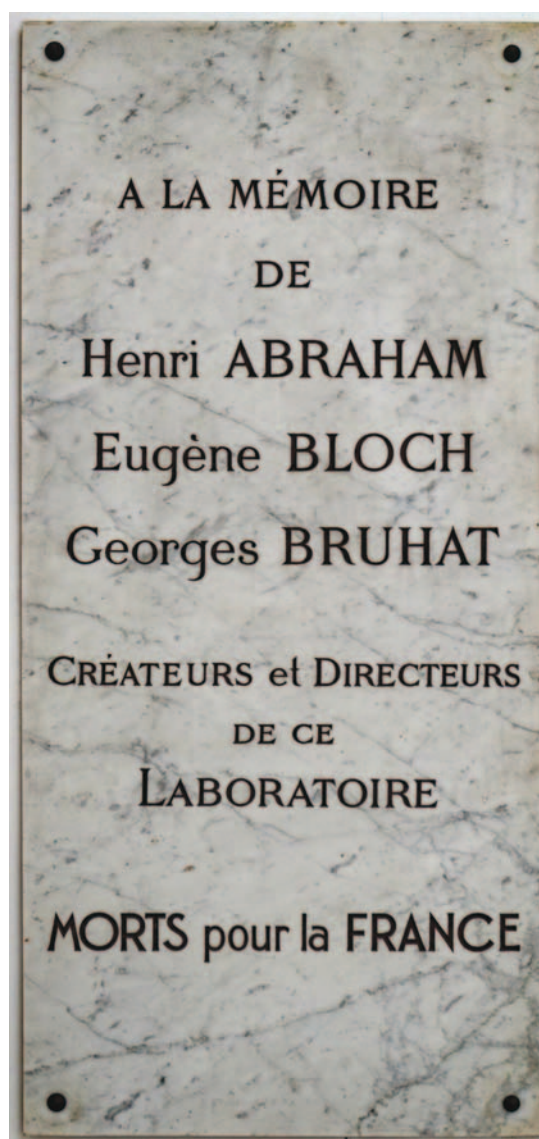


Figura 6. Memorial para “los tres físicos”. La placa se encuentra a la entrada del Laboratorio de Física de la École Normale Supérieure. (Fotografía cortesía de Sebastien Balibar).

la familia que Georges Bruhat había sucumbido a la inmundicia y las enfermedades del campo de concentración.

El premio de “los tres físicos”

El horrendo destino común que enfrentaron estos tres físicos pasó los primeros años tras la Segunda Guerra Mundial virtualmente sin ser mencionado. En particular, pocos reconocieron la desinteresada y valiente negativa de Bruhat de ceder a las demandas nazis. El silencio se debió, al menos en parte, al hecho de que en la posguerra los franceses colocaron a todos en tres categorías: miembros de la Resistencia, víctimas judías del Holocausto o colaboradores vilipendiados.

Pero Bruhat no encajaba del todo en ninguna de esas categorías y algunas personas incluso difundieron rumores de que, dado que no se había unido a Charles de Gaulle en el Reino Unido, debió haber sido un colaborador nazi. Eso era falso, por supuesto. Se había sentido en el deber de permanecer en París para mantener el laboratorio en funcionamiento y ayudar a los estudiantes a escapar de los nazis y encontrar trabajos con nombres falsos. Como Abraham y Bloch, lo pagó con su vida.

Para resguardar del olvido esta historia y honrar la memoria de los tres grandes físicos, Hélène Bloch, viuda de Eugène, aportó el capital inicial para un premio denominado, sencillamente, *le prix des trois physiciens*, “el premio de los tres físicos”. Desde 1951 este premio se entrega anualmente (y principalmente) a físicos afiliados a la ENS. Para los galardonados, el premio significa no sólo un reconocimiento al valor del trabajo realizado, sino también una distinción cargada de simbolismo y muy preciada dentro de la familia de la ENS. De hecho, los premiados lo perciben, más que como un premio de gran respeto, como un legado para seguir adelante en la permanente lucha contra el racismo y el fascismo.

Comenzando con Jean Cabannes en 1951, los galardonados incluyen a Robert Oppenheimer en 1958, los premios Nobel Louis Néel en 1963, Alfred Kastler en 1965, Claude Cohen-Tannoudji en 1986 y Walter Kohn en 2002, Jean-Claude Pecker en 1969, Edith Falgarone en 2018, y, más recientemente, Vincent Hakim en 2019, entre otros [6].

Para conmemorar a los tres físicos, la ENS ha instalado una placa (Figura 6) en la entrada del laboratorio de física que cada uno de ellos ayudó a diseñar y construir. Está destinada a recordar a los alumnos de la ENS que los tres físicos presentaron lo mejor de Francia. Tres hombres unidos en la muerte así como lo estuvieron en la vida. Su laboratorio se erige hoy como el producto de sus logros conjuntos y como un recordatorio de los brutales crímenes de los nazis contra la humanidad.

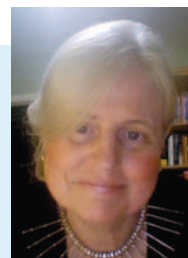
Agradecimientos

La idea de este artículo surgió de las conversaciones que una de nosotros (DeWitt) tuvo con Jean-Claude Pecker e Yvonne Choquet-Bruhat, a quienes está dedicado. Agradecemos a Christophe Salomon y Sébastien Balibar, ambos físicos de la École Normale Supérieure, galardonados con el premio de los tres físicos en, respectivamente, 2004 y 2007, y a Daniel Choquet, nieto de Georges Bruhat e hijo de Yvonne Choquet-Bruhat. Sin su valiosa ayuda este artículo no habría sido posible.

Referencias

- [1] B. CAGNAC, *Les trois physiciens: Henri Abraham, Eugène Bloch, Georges Bruhat, fondateurs du Laboratoire de physique de l'École Normale Supérieure* (Éditions Rue d'Ulm, 2009).
- [2] S. ISRAËL, *Les études et la guerre: Les normaliens dans la tourmente (1939-1945)* (Éditions Rue d'Ulm, 2005).
- [3] Y. CHOQUET-BRUHAT, *Une mathématicienne dans cet étrange univers: Mémoires*, Odile Jacob (2016); *A lady mathematician in this strange universe*, World Scientific (2018).
- [4] Conversaciones privadas con Chris DeWitt.
- [5] Y. CHOQUET-BRUHAT, *Une mathématicienne dans cet étrange univers: Mémoires*, Odile Jacob (2016); *A lady mathematician in this strange universe* (World Scientific, 2018).
- [6] La lista completa está disponible en www.phys.ens.fr/spip.php?article2180.

Chris DeWitt
Abogada
Austin, Texas (EE. UU.)



José Edelstein
Instituto Galego de Física de Altas
Energías,
Dpto de Física de Partículas,
Universidad de Santiago
de Compostela



Bayram Tekin
Dpto. de Física, Middle East
Technical University, Ankara
(Turquía)



El quark top y su interacción con el bosón de Higgs

Una fuente especial de información sobre posible nueva física en el LHC del CERN

María Moreno Llácer*

Al ser el quark top tan masivo, incluso más que el propio bosón de Higgs, el estudio de sus propiedades e interacciones pueden aportar indicios de posible nueva física más allá del Modelo Estándar, aunque las desviaciones están aún dentro de las incertidumbres experimentales y teóricas.

Las propiedades del quark top son especialmente interesantes, pues participa en las cuatro fuerzas fundamentales. Además, es la partícula elemental más masiva, más incluso que el propio bosón de Higgs, por lo que interacciona intensamente con éste. Sólo podemos estudiarlo en fenómenos de altas energías, mediante aceleradores de partículas. Su enorme masa se traduce en una vida media muy corta (inferior a la escala temporal típica de la interacción fuerte), de modo que se desintegra casi instantáneamente antes de formar hadrones. Todo esto lo convierten en una pieza clave para probar el Modelo Estándar. La gran cantidad de datos del Gran Colisionador de Hadrones del CERN ha permitido medir sus propiedades, como la masa, con gran precisión, así como estudiar los parámetros de sus interacciones con otras partículas.

Introducción

La teoría más aceptada en la actualidad para describir los componentes más fundamentales de la materia es el denominado Modelo Estándar (ME) de Física de Partículas. Aunque el ME no describe la interacción gravitatoria, la incorporación de sus efectos introduce correcciones muy pequeñas en las interacciones entre las partículas elementales, siendo éstas dominadas por las interacciones fuerte, electromagnética y débil. Las partículas elementales del ME se clasifican en fermiones (constituyentes de la materia) y bosones (mediadores de las fuerzas), que se presentan en las Tablas 1 y 2. Hay varias clases de bosones según el tipo de fuerza en la que actúan: los gluones, responsables de la interacción nuclear fuerte; el fotón, mediador de la interacción electromagnética; los bosones W^\pm y Z de la interacción débil, responsables entre otras de las desintegraciones beta de los núcleos atómicos; y el bosón de Higgs, la partícula asociada a un campo de energía gracias al cual las demás partículas elementales adquieren masa. Los gluones, los fotones y los bosones W^\pm y Z

tienen espín (propiedad física de las partículas elementales por la que tienen un momento angular intrínseco de valor fijo) igual a 1. El bosón de Higgs no posee espín, ni carga eléctrica o de color. Los fermiones tienen espín $\frac{1}{2}$ y hay doce tipos: seis de éstos se clasifican como quarks (d , u , s , c , b y t) y los otros seis como leptones (electrón, muón, tau, y sus correspondientes neutrinos), que se agrupan en tres familias o generaciones, como una especie de tabla periódica. Los quarks tienen carga de color pero los leptones no. La materia ordinaria está constituida por las partículas de la primera familia: los quarks d y u , el electrón y su neutrino asociado. Las otras familias están formadas por partículas con propiedades semejantes a las de la primera pero mucho más masivas, es decir diferentes acoplamientos al bosón de Higgs, y sólo pueden producirse en procesos de altas energías en aceleradores de partículas y debido a la radiación cósmica. Los quarks son el único tipo de partículas elementales que interactúan con las cuatro fuerzas fundamentales, mientras que los leptones no están sometidos a la interacción nuclear fuerte, y la interacción electromagnética solo afecta a las partículas que poseen carga eléctrica. Los quarks, debido a la dependencia de la interacción fuerte con la energía, están confinados dentro de hadrones (partículas compuestas por varios quarks fuertemente ligados y que constituyen un estado con carga de color nula, como los protones y los neutrones) a baja energía y se comportan como partículas libres a altas energías (distancias muy cortas dentro de los hadrones). Debido al confinamiento a bajas energías, sus masas no pueden definirse con tanta facilidad como las de las partículas libres, y para hacerlo es necesario tener en cuenta las propias interacciones mutuas entre los gluones, que también tienen carga de color. Además, para cada fermión existe una antipartícula, que posee la misma masa y el mismo espín, pero las cargas tienen signo contrario. Las antipartículas son estables por sí solas, aunque apenas hay en nuestro universo actual. Según el ME, las partículas de materia y las de antimateria deberían haberse creado en cantidades iguales y, a

* Premio Investigador Novel en Física Experimental 2018. RSEF y FBBVA.

continuación, deberían haberse aniquilado entre sí en su práctica totalidad. Sin embargo, esto no es así; algo sucedió al principio del universo, dando lugar a una “asimetría” entre materia y antimateria, dejando sólo un residuo de materia, uno de los grandes interrogantes de la Física de Partículas. Para una descripción más detallada del ME, veáanse los artículos de la referencia [1].

Tabla 1. Las tres familias de fermiones (masas en GeV y Q corresponde a su carga eléctrica)

Familia	Quarks		Leptones	
	$Q = -1/3$	$Q = 2/3$	$Q = -1$	$Q = 0$
Primera	d $m_d \sim 5 \cdot 10^{-3}$	u $m_u \sim 3 \cdot 10^{-3}$	e $m_e \sim 5 \cdot 10^{-4}$	$\nu_e < 10^{-9}$
Segunda	s $m_s \sim 0.1$	c $m_c \sim 1.3$	μ $m_\mu \sim 0.1$	$\nu_\mu < 2 \cdot 10^{-4}$
Tercera	b $m_b \sim 4.2$	t $m_t \sim 173$	τ $m_\tau \sim 1.8$	$\nu_\tau < 2 \cdot 10^{-2}$

Tabla 2. Masas y características de los bosones del ME

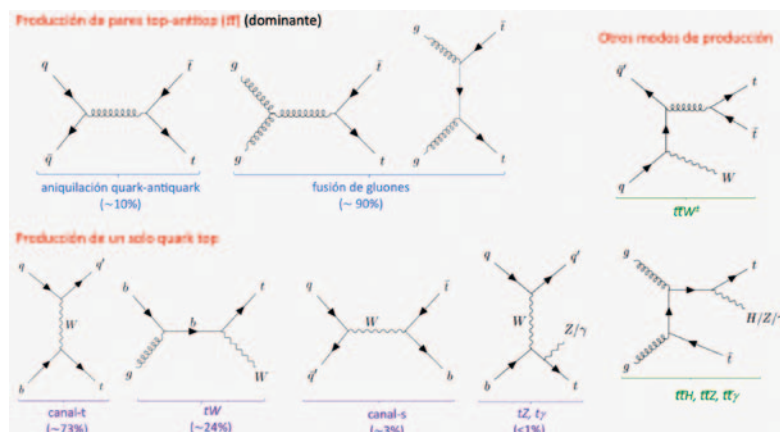
Bosones	Espín	Masa (GeV/c ²)	Interacción (Intensidad relativa a la interacción fuerte)
Gluones (g) (ocho tipos)	1	0	Fuerte (1)
Fotón (γ)	1	0	Electromagnética (10 ⁻³)
Z, W [±]	1	M _W = 80.4 M _Z = 91.2	Débil (10 ⁻⁸)
Gravitón	2	0	Gravitatoria (10 ⁻³⁷)
Higgs	0	M _H ~ 125	campo de vacío generador de masas

El quark t (top, o cima) forma parte de la tercera generación y es la partícula elemental más masiva (~173 GeV, casi tanto como un átomo de oro) del ME descubierta hasta la fecha, más incluso que el propio bosón de Higgs. Su existencia se predijo en 1973. Sin embargo, no fue hasta 1995 cuando se observó por primera vez en el acelerador Tevatrón del laboratorio Fermilab, en Chicago (Estados Unidos) [2], aunque se tenían evidencias indirectas y una estimación de su masa del Gran

Colisionador Electrón-Positrón (en inglés LEP, de Large Electron-Positron collider) del CERN (Suiza) [3]. Su enorme masa se traduce en una vida media muy corta (10⁻²⁵ segundos, dos órdenes de magnitud más pequeña que la escala temporal típica de la interacción fuerte que confina los quarks en hadrones), de modo que se desintegra casi instantáneamente antes de formar hadrones. Es el único quark no sujeto a confinamiento, puede “observarse” de forma aislada, y es por tanto del que podemos medir mejor su masa. Esta característica permite estudiar sus propiedades directamente a partir de sus productos de desintegración. El 99.8 % de las veces, el quark top (t) se desintegra en un bosón W^+ y un quark bottom (b), $t \rightarrow W^+ b$ o bien $\bar{t} \rightarrow W^- \bar{b}$ (llamado acoplamiento tWb), y podemos reconstruirlo a partir de sus señales en los detectores de partículas. Dependiendo de la posterior desintegración del bosón W^\pm , se puede clasificar en desintegración hadrónica (si se desintegra a dos quarks que se observan como chorros de hadrones llamados “jets”) o leptónica (si se desintegra en un leptón cargado y su correspondiente neutrino). Puesto que la intensidad con la que una partícula elemental interactúa con el bosón de Higgs resulta proporcional a su masa, el quark top, debido a su elevada masa, se acopla muy fuertemente a él. Además, muchos modelos de física más allá del ME¹ predicen la existencia de nuevas partículas que se acoplan preferentemente al quark top. Por tanto, es esencial medir con alta precisión su masa y sus interacciones con otras partículas, para comprobar la consistencia de las predicciones teóricas o bien acotar escenarios de física que no son descritos por el ME.

Desde su descubrimiento en el Tevatrón y gracias al actual Gran Colisionador de Hadrones (en inglés LHC, de Large Hadron Collider) del CERN se han producido más de cien millones de pares de quarks top y antitop (su antipartícula). Gracias a ello, hemos podido llevar a cabo una gran cantidad de medidas [4-6] muy precisas sobre la manera en que estas partículas se producen y se desintegran, así como estudios muy detallados de su masa y sus acoplamientos con los diferentes tipos de bosones.

Figura 1. Diagramas de Feynman a orden más bajo en la teoría de interacción fuerte (QCD).



Producción de quarks top

En las colisiones de protones del LHC, el quark top se produce predominantemente en parejas top-antitop ($t\bar{t}$) mediante interacción fuerte a través de la fusión de gluones o la aniquilación quark-antiquark. Sin embargo, también se puede produ-

¹ El ME explica satisfactoriamente una multitud de observaciones, incluso ha predicho la existencia de partículas que luego se han descubierto experimentalmente. Sin embargo, tiene muchos (~20) parámetros libres por ajustar. Además, es incompleto, ya que no tiene en cuenta la gravedad, no explica la materia y energía oscuras, ni explica por qué el universo está hecho de materia y no de antimateria.

cir mediante la interacción electrodébil, aunque con menor probabilidad y únicamente un quark top o antitop, vía el intercambio de un bosón W^\pm virtual (canales- t y - s) o bien asociado a un bosón W^\pm real (canal- tW). En la Figura 1 se muestran los procesos dominantes de producción de quarks top en el LHC, representados mediante diagramas de Feynman.

La Figura 2 muestra las secciones eficaces medidas para estos procesos en los experimentos del LHC a diferentes energías de las colisiones de protones (7, 8 y 13 TeV, en azul, naranja y morado respectivamente). Estos resultados experimentales han sido comparados con las predicciones teóricas más precisas hasta la fecha (en gris) y, en general, se observa un buen acuerdo, aunque las incertidumbres (anchura vertical de cada marcador), tanto experimentales como teóricas, son relativamente grandes para algunos procesos.

La sección eficaz de producción de pares de quarks top ($t\bar{t}$) también se midió en los experimentos del Tevatrón. Las medidas de los dos colisionadores se han comparado con predicciones del ME que incluyen correcciones a segundo orden de la serie perturbativa de Cromodinámica Cuántica (QCD) (es decir, a next-to-next-to-leading-order NNLO). La incertidumbre total en las predicciones (del 5 %) viene dominada por aquella debida al valor de las escalas de renormalización y factorización usadas en los cálculos, y que permiten estimar el impacto de las contribuciones de orden superior no incluidas. Las medidas experimentales, que alcanzan precisiones del 2.4 %, están limitadas por las incertidumbres sistemáticas experimentales, en particular la luminosidad integrada (número de colisiones por unidad de superficie).

Las secciones eficaces de quarks top producidos individualmente alcanzan precisiones del 7-30 %, según el canal de producción. Estas secciones eficaces son sensibles a posibles alteraciones en las interacciones débiles en las que un quark se convierte en otro de su misma generación (e.g. $t \rightarrow W^+ b$ que, con una precisión del 4 %, se sabe que ocurre casi el 100 % de las veces) o bien se transforma en otro quark de una generación diferente, pero siempre con cambio de carga eléctrica (debido a que los estados de masa no se corresponden con los estados de interacción débil²), ya que transiciones a orden cero (leading-order LO) entre quarks de generaciones diferentes, pero con la misma carga eléctrica, no se han observado en la naturaleza³.

² Los acoplamientos entre los diferentes quarks vienen descritos por la matriz Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM), que es una matriz 3×3 que relaciona los estados de quarks de las tres generaciones.

³ Las corrientes neutras (sin cambio de carga eléctrica) que cambian el sabor (Flavour Changing Neutral Currents [FCNC]) están prohibidas a orden cero y fuertemente suprimidas a órdenes superiores de interacciones.

Top Quark Production Cross Section Measurements

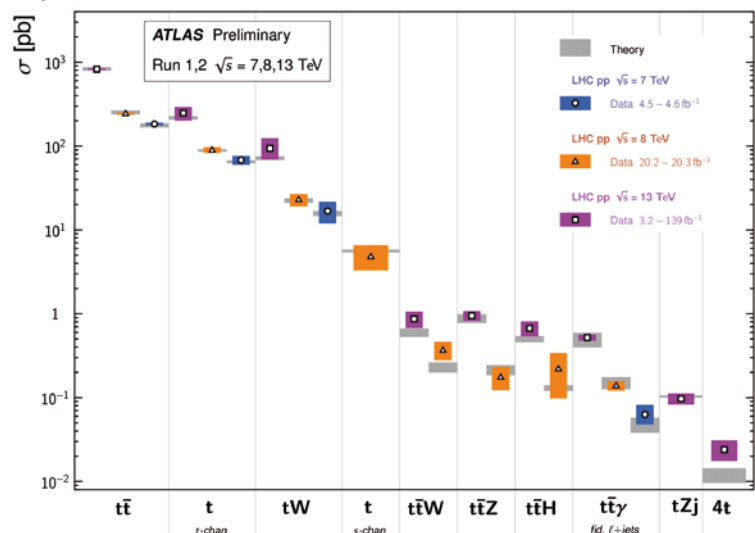


Figura 2. Secciones eficaces (eje-y) para varios procesos de producción de quarks top (eje-x) medidas en el LHC en las colisiones de protones a diferentes energías (7, 8 y 13 TeV, en azul, naranja y morado respectivamente) y comparadas con las predicciones del ME (en gris) [4-6].

Para la producción de pares $t\bar{t}$, así como para los canales- t y tW , la gran cantidad de sucesos recopilados ha permitido que se realicen medidas de la tasa de producción en función de ciertas variables cinemáticas (medidas diferenciales). Las medidas con datos reales se comparan con varias predicciones simuladas con métodos de Monte-Carlo, que típicamente tienen una precisión a primer orden en QCD (next-to-leading-order NLO). Las desviaciones entre las simulaciones y las distribuciones medidas pueden ser debidas a efectos de “nueva física” más allá del ME, pero deben estudiarse cuidadosamente, ya que algunas de las diferencias observadas pueden estar relacionadas con ciertos parámetros de la propia simulación que necesitan mejor ajuste o con correcciones de órdenes superiores no consideradas. La gran cantidad de datos del LHC permitirá realizar estudios más detallados y conducirán a un progreso significativo para la modelización de sucesos de quarks top.

Propiedades del quark top: masa, asimetría de carga, correlaciones de espín y polarización

Masa

Las medidas de la masa del quark top que tienen menor incertidumbre experimental alcanzan errores experimentales de 0.4 GeV, equivalente a un error relativo del 0.2 %. Estos métodos, llamados medidas directas o de “masa cinemática”, miden la masa del quark top a través de las propiedades de sus productos de desintegración. Con medidas tan precisas, hay aspectos teóricos que empiezan a ser relevantes. En el caso de la masa cinemática, no existe una relación conocida entre las masas medidas en los experimentos y la masa definida en la teoría. Por ello, se ha estimado que la incertidumbre debida a la interpretación de las masas medidas puede ser del orden de 0.3-0.5 GeV. Así, el error total de las medidas directas tendría que

incluir dicha incertidumbre, del mismo orden de magnitud que los errores evaluados en los experimentos.

Otra posibilidad para medir la masa del quark top es a través de su dependencia de las secciones eficaces. Puesto que éstas son obtenidas con cálculos puramente perturbativos (teoría QCD) a órdenes superiores, es necesario definir un esquema de renormalización, que relaciona los parámetros extraídos a partir de la sección eficaz medida con aquellos del ME. Además, los generadores de sucesos de Monte-Carlo incorporan las interacciones fuertes a bajas energías a través de modelos de hadronización y, en consecuencia, la masa del quark top no es una cantidad bien definida en QCD: no es una masa calculada en un esquema de renormalización concreto, y tampoco se trata de la “masa polo” (conceptualmente más cercana a la masa en reposo de una partícula libre), que es la que se relaciona directamente con su acoplamiento al Higgs. Debido a las grandes correcciones de QCD a bajas energías, la masa obtenida a partir de secciones eficaces tiene una ambigüedad intrínseca (incertidumbre teórica) de unos 0.25 GeV. Puesto que las secciones eficaces inclusivas son poco sensibles a la masa del quark top, en los últimos años se han desarrollado cálculos de secciones eficaces diferenciales y nuevos métodos que permiten estudiar regiones del espacio fásico que tienen una fuerte dependencia con la masa (e.g. sucesos $t\bar{t}$ con un “jet” extra) obteniendo una incertidumbre total de aproximadamente 1 GeV (precisión del 0.6 %).

Asimetría de carga

A orden más bajo (dominante) en teoría de QCD, la producción de pares de quarks top-antitop es simétrica bajo la conjugación de carga (operación que cambia los signos de todas las cargas de una partícula, es decir, intercambia una partícula por su antipartícula $t \leftrightarrow \bar{t}$). Sin embargo, a órdenes superiores, existe una asimetría debido a la radiación o intercambio de gluones. Esta pequeña asimetría es un buen test para comprobar la validez y completitud del ME. En Tevatrón, donde se colisionaban protones y antiprotones, la consecuencia de esta asimetría es que los quarks top (antitop) se producen preferentemente en la dirección del quark (antiquark) inicial. En el LHC, que es un colisionador de protones, los haces son simétricos, por lo que no hay una dirección preferencial. Sin embargo, debido a la composición de los protones, los quarks principales u y d (llamados quarks de valencia) llevan, en promedio, una fracción mayor del momento del protón que el conjunto de gluones y pares de quark-antiquark que hay dentro de los mismos. Esto resulta en que los quarks top se producen preferentemente con mayor velocidad (en concreto mayor rapidez) que los quarks antitop. Aunque esta asimetría es pequeña (0.64 ± 0.05 % a NNLO), podría variar en

caso de nuevas partículas no predichas en el ME (axigluones o bosones Z' pesados). En el LHC se ha medido esta asimetría tanto de forma inclusiva (con un error del 25 %) como diferencial y los resultados son compatibles con las predicciones del ME a NNLO en QCD con correcciones electro-débiles a NLO.

Correlaciones de espín

La vida media del quark top es más corta que el tiempo de hadronización y, por tanto, su información de espín se transfiere directamente a sus productos de desintegración. La producción de pares de quarks top y antitop vía interacción fuerte en el LHC es invariante bajo paridad, de modo que no se espera que estén polarizados. Sin embargo, se predice que sus espines estén correlacionados en una cantidad que varía en función de la masa invariante del sistema $t\bar{t}$. Esta cantidad podría verse afectada por física más allá del ME, como por ejemplo la presencia de partículas supersimétricas. Para estudiar las correlaciones de espín de forma experimental, el observable más simple y sensible en el canal dileptónico es la diferencia entre el ángulo azimutal de los dos leptones cargados provenientes de los quark top y antitop medidos en el sistema de referencia del laboratorio, $\Delta\phi(l, \bar{l})$. En la Figura 3 se muestra la sección eficaz (normalizada) de pares $t\bar{t}$ en función de $\Delta\phi(l, \bar{l})$ medida en uno de los experimentos del LHC (en negro) y comparada con predicciones del ME a diferentes órdenes en QCD (LO, NLO y NNLO, en verde, morado y rojo respectivamente). La parte superior corresponde a secciones eficaces totales (inclusivas, definidas en todo el espacio de fases) mientras que la parte inferior corresponde a secciones eficaces definidas en una zona fiducial (es decir, en una cierta región del espacio fásico). Las incertidumbres teóricas de las predicciones a NLO y NNLO también se muestran, y puede verse la importancia de mejorar la precisión de los cálculos para disminuir la incertidumbre asociada. Puede observarse también que el cociente NNLO/NLO es mucho más pronunciado para la predicción a nivel fiducial que inclusiva, siendo mejor el acuerdo con los datos, aunque las incertidumbres asociadas son mayores. Aunque, a priori, no hay un motivo por el que las predicciones a NNLO solo reproduzcan los datos en un volumen fiducial, una posible explicación estaría relacionada con la extrapolación de las medidas a todo el espacio fásico. Esto requiere más investigaciones, pues efectos similares se han visto en otras distribuciones, como el momento transversal del quark top o la asimetría de carga. En lugar de utilizar un solo observable, también es posible estudiar el estado de espín del sistema $t\bar{t}$ descrito por sus polarizaciones individuales y las correlaciones entre ellos, lo que conduce a 15 coeficientes. En este caso, es necesario reconstruir el quark top y su antiquark a partir de

sus productos de desintegración, lo que da lugar a grandes incertidumbres en el canal dileptónico debido a la presencia de dos neutrinos, que no se detectan directamente. Los valores medidos de los coeficientes son compatibles con las predicciones del ME y se utilizan para establecer límites en escenarios hipotéticos de nueva física.

Polarización del bosón W^* (en el acoplamiento tWb) y del quark top

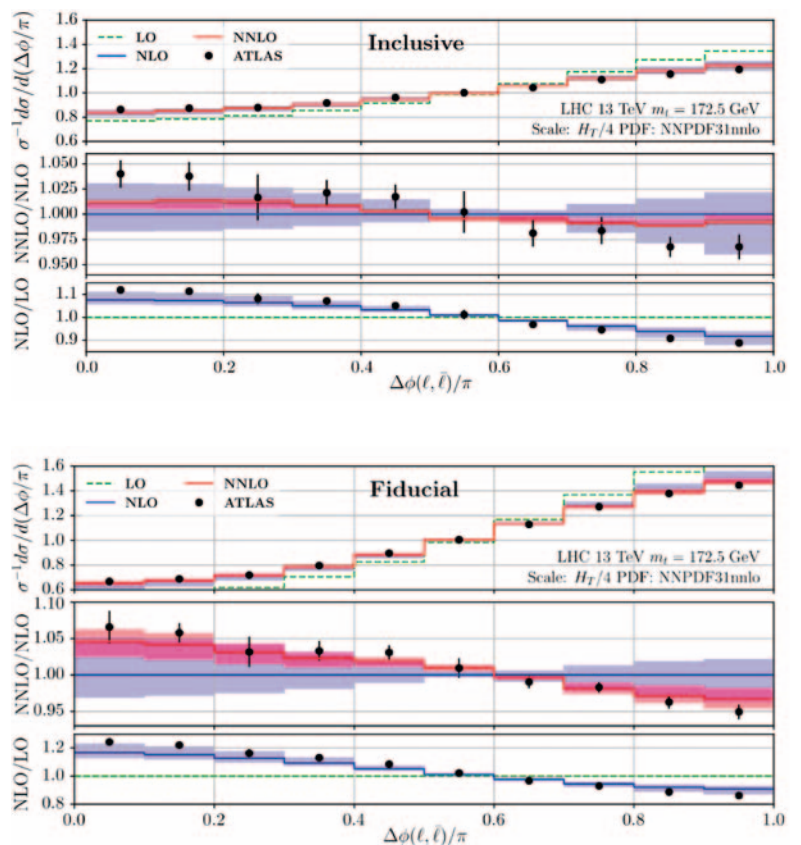
Otro ejemplo de medidas que han mejorado considerablemente en el LHC gracias a contar con más estadística es la polarización del bosón W^\pm producido en la desintegración del quark top. Analizando distribuciones angulares del leptón cargado, se han medido las fracciones de helicidad del bosón W^\pm con precisiones del 3-5 %.

Además, en el caso de producción electrodébil, los quarks top están altamente polarizados. Esta característica permite definir una dirección privilegiada en el espacio sobre la cual se definen varios sistemas de referencia en los que se pueden medir diferentes distribuciones angulares de los productos de desintegración del quark top. Éstas son sensibles a posibles momentos anómalos del quark top e incluso a nuevas fuentes de violación de la simetría entre materia y antimateria. Por el momento, las medidas (con incertidumbres del 14-20 %) son consistentes con las predicciones del ME.

Acoplamientos a bosones y procesos de baja tasa de producción

Los datos del LHC han permitido establecer y estudiar el quark top en procesos que no eran accesibles previamente debido a su baja tasa de producción, con uno o dos quarks top asociado(s) con el bosón Z (proceso tZ o $t\bar{t}Z$), el W^\pm ($t\bar{t}W^\pm$), el de Higgs ($t\bar{t}H$) o un fotón ($t\gamma$ o $t\bar{t}\gamma$). Las secciones eficaces de estos procesos (0.1-1 pb, tres órdenes de magnitud inferior que la producción de pares $t\bar{t}$ como puede verse en la Figura 2) son proporcionales a los acoplamientos de quark top a dichos bosones, permitiendo estudiar si siguen las predicciones del ME o hay desviaciones significativas.

Para acceder a los procesos $t\bar{t}Z$ y $t\bar{t}W^\pm$ se estudian estados finales con varios leptones cargados y que no existan en el proceso $t\bar{t}$, para poder distinguir las señales sobre este fondo. Los sucesos que contienen dos leptones de la misma carga se utilizan para distinguir la señal $t\bar{t}W^\pm$, mientras que los sucesos con tres o cuatro leptones cargados (que incluyen un par de leptones del mismo sabor compatibles con la desintegración de un bosón Z) se utilizan para caracterizar el proceso $t\bar{t}Z$. En estos análisis, la eficiencia y los requisitos de selección de leptones aislados son cruciales. La señal $t\bar{t}W^\pm$ es mucho más difícil de aislar que la de $t\bar{t}Z$ debido al elevado fondo de sucesos $t\bar{t}$ en los que la carga de uno de los leptones se identifica incorrectamente o de leptones que no provienen de la desintegra-



ción de un bosón W^\pm sino de desintegraciones de hadrones, conversiones de fotones o “jets” identificados erróneamente como leptones. En el caso de $t\bar{t}Z$, el fondo principal proviene de sucesos con un quark top producido en asociación con uno o varios bosones Z o W^\pm , o bien directamente con dos bosones $W^\pm Z$ o ZZ (dibosones). En los análisis, se definen diferentes categorías de sucesos según la multiplicidad de leptones cargados y “jets” (distinguiendo si provienen de un quark b , “ b -jets”). En el caso de $t\bar{t}W$, la sección eficaz medida usando solo una fracción de los datos del LHC a 13 TeV tiene una incertidumbre del 22 % (dominadas por incertidumbres estadísticas), mientras que en el caso de $t\bar{t}Z$ se alcanza el 8 % (con contribuciones iguales de incertidumbres aleatorias y sistemáticas) y se han realizado también medidas diferenciales (en función del momento transversal del bosón Z y otras variables cinemáticas). Después de corregir los efectos del detector y selección, las medidas se han comparado con las predicciones del ME, sin verse desviaciones significativas.

La producción electrodébil de un solo quark top en asociación con un bosón Z (tZ), donde también se estudian sucesos con tres leptones cargados, es aún más difícil de aislar de los fondos de dibosones, $t\bar{t}Z$ y leptones que no provienen de la desintegración de un bosón W^\pm . Sin embargo, su estudio es muy interesante ya que también proporciona sensibilidad al acoplamiento triple $W^\pm W^\mp Z$. El proceso tZ se ha observado experimentalmente por primera vez recientemente y su sección eficaz se ha medido con una incertidumbre del 15 %.

Figura 3. Sección eficaz de $t\bar{t}$ en función de $\Delta\phi(l, \bar{l})$ normalizada (área bajo la curva igual a uno) [7].

El proceso $t\bar{t}H$ permite estudiar el acoplamiento del Higgs con el quark top. Observar este proceso ha sido todo un reto, puesto que es muy infrecuente: solo un 1 % de los bosones de Higgs que se producen en el LHC lo hacen junto a un par de quarks top y antitop y, además, tanto el bosón como los quarks se desintegran en otras partículas de muchos modos complejos. Los experimentos ATLAS y CMS han llevado a cabo varios análisis independientes y con diferentes estrategias experimentales, según el modo de desintegración del bosón de Higgs: $b\bar{b}$, $W^\pm W^\mp$, ZZ^* o $\gamma\gamma$, de mayor a menor probabilidad de desintegración, pero de menor a mayor cociente señal/fondo. En el caso de $H \rightarrow b\bar{b}$ y $H \rightarrow W^\pm W^\mp$, la incertidumbre total está limitada por aquellas asociadas a los fondos más dominantes ($t\bar{t}$ + jets en concreto $t\bar{t} + b\bar{b}$ y $t\bar{t}W^\pm$, respectivamente), mientras que en el caso de $H \rightarrow \gamma\gamma$ por la incertidumbre estadística. Combinando las medidas de los diferentes canales, en 2018 los experimentos ATLAS y CMS anunciaron la observación del proceso $t\bar{t}H$ y midieron su sección eficaz con una precisión del 25 %. Además, en los canales $H \rightarrow b\bar{b}$ y $H \rightarrow \gamma\gamma$, donde es posible reconstruir el bosón de Higgs a partir de sus productos de desintegración, también se ha medido la sección eficaz de $t\bar{t}H$ en función del momento transversal del bosón. Esta distribución podría variar en caso de modificaciones con respecto al ME en el acoplamiento del Higgs con el quark top o incluso consigo mismo. Recientemente, también se han buscado posibles anomalías en este acoplamiento debidas a la violación de la simetría entre materia y antimateria. Por el momento, no se han visto desviaciones con respecto a las predicciones, pero la precisión es todavía relativamente modesta.

Los procesos $t\bar{t}\gamma$ y $t\gamma$ permiten estudiar el acoplamiento del quark top con el fotón y explorar

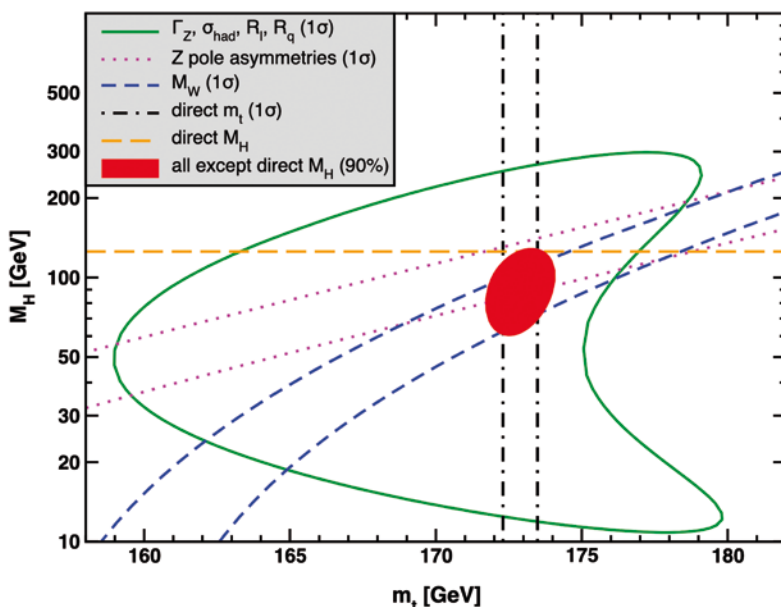
posibles modificaciones con respecto al ME a través, por ejemplo, de un momento dipolar anómalo del quark top. En estos procesos, los fondos surgen de electrones o procesos hadrónicos que se reconstruyen como fotones. En el caso de $t\bar{t}\gamma$, la sección eficaz se ha medido con una precisión de 6 % y también se ha medido a nivel diferencial, observándose buen acuerdo con las simulaciones de Monte-Carlo y predicciones a NLO. También se tiene evidencia de la señal $t\gamma$.

La producción de cuatro quarks top ($t\bar{t}t\bar{t}$ o 4tops) es uno de los procesos predichos por el ME más espectaculares y energéticos que puede estudiarse en el LHC, aunque aún no se ha observado experimentalmente. El ME predice una sección eficaz de solo unos 0.012 pb, aunque se podría producir copiosamente en muchos modelos de nueva física. Las búsquedas del proceso $t\bar{t}t\bar{t}$ se llevan a cabo explorando diversos estados finales que tienen grandes desafíos. El canal con un leptón cargado o dos leptones con carga opuesta, aunque corresponde al 50 % de los sucesos $t\bar{t}t\bar{t}$, sufre de un gran fondo proveniente principalmente de $t\bar{t}$ + jets y $t\bar{t} + b\bar{b}$. Este fondo generalmente se evalúa utilizando técnicas basadas en datos reales y simulaciones y se usan regiones de control en el espacio de fases para acotar las incertidumbres asociadas a los mismos, que suelen ser grandes. Los canales con dos leptones de la misma carga o con al menos tres leptones, aunque son menos frecuentes (12 %), se benefician de un nivel de fondo más bajo debido principalmente a leptones que no provienen de la desintegración de un bosón W^\pm o de la producción de $t\bar{t}W$ y $t\bar{t}Z$, siendo por tanto el canal más sensible. Los últimos resultados de los experimentos ATLAS y CMS apuntan a la evidencia de este proceso. Futuros datos del LHC permitirán la observación del mismo, en caso de que el ME sea correcto.

Como ya se ha comentado, las corrientes neutras con cambio de sabor están fuertemente suprimidas en el ME, con anchuras de desintegraciones de FCNC del quark top del orden de 10^{-12} – 10^{-16} , mientras que varias extensiones de este modelo predicen tasas mucho más altas. Por lo tanto, cualquier desviación de estas tasas con respecto al ME sería un signo de nueva física. Los vértices anómalos, $t \rightarrow qH$, $t \rightarrow qZ$, $t \rightarrow qg$ y $t \rightarrow q\gamma$, se están estudiando en el LHC. De momento, no hay suficiente estadística para medir esas anchuras de desintegración, pero se han acotado con límites superiores de 10^{-3} – 10^{-4} . Futuros datos del LHC, en particular durante la fase de alta luminosidad prevista entorno al 2027, permitirán obtener resultados más precisos o bien un posible descubrimiento.

El ME no predice la masa del bosón de Higgs, pero gracias a su influencia en otros parámetros (a través de correcciones radiativas), los resultados de precisión de la teoría electrodébil permiten estimar su masa. La Figura 4 muestra los valores de

Figura 4. Comparación entre las medidas directas de la masa del bosón de Higgs (M_H) y la del quark top (m_t) y la determinación indirecta de estas masas a partir de ajustes globales con medidas de precisión del sector electrodébil [8].



la masa del bosón de Higgs y la del quark top obtenidos mediante medidas experimentales directas (líneas en naranja y negro, respectivamente) y la determinación indirecta de estas masas a partir de ajustes que incluyen medidas de precisión del sector electrodébil [8]. El resultado del ajuste global sin incluir el valor de M_H medido en el LHC se muestra en rojo. El valor de M_H obtenido en el ajuste está de acuerdo (algo inferior pero dentro del error asociado) con la medida directa, aunque tiene una incertidumbre mayor.

En general, en todos estos análisis experimentales se utilizan técnicas de análisis multivariante e inteligencia artificial (con árboles de decisión o redes neuronales) para reconstruir las partículas a partir de las señales que dejan en los detectores, así como para separar la señal del fondo y mejorar la sensibilidad. Dada la dificultad en encontrar soluciones para cualquier orden en los modelos teóricos, estos análisis tienen mucho potencial para acotar posibles efectos de “nueva física” más allá del ME y parametrizar posibles desviaciones, bien mediante desarrollos perturbativos o mediante teorías de campos efectivas.

Perspectivas

Tras diez años desde el comienzo de la toma de datos del LHC y gracias a su excelente rendimiento, una gran variedad de propiedades del quark top han podido medirse con gran precisión, con la mayoría de los resultados ya dominados por incertidumbres sistemáticas. La masa de este quark se conoce con una incertidumbre del 0.2 %, y se ha visto que el quark top se acopla a los bosones de acuerdo con las predicciones del ME. Se trata de un éxito colectivo en el que trabajan varios miles de científicos (físicos, así como ingenieros e informáticos) a nivel internacional. Hasta la fecha no se ha encontrado ninguna señal de nueva física más allá de lo que el ME predice. Sin embargo, sabemos que el modelo no es completo, y requiere algunas modificaciones, ya que no es capaz de explicar algunos fenómenos ya observados, como por ejemplo las masas de los neutrinos. El quark top, así como el bosón de Higgs, son considerados los dos principales candidatos del ME para “comunicarse” con esta posible física desconocida que falta por descubrir. La relación entre las masas del quark top y del bosón de Higgs permite estudiar incluso aspectos cosmológicos, mediante la posible inestabilidad del estado actual de más baja energía del vacío electrodébil.

En 2022 comenzará una nueva fase de toma de datos del LHC (Run 3) en el que se espera un aumento de al menos un factor 2 de luminosidad y, posteriormente, habrá otras fases (Run 4 y 5) con aún más alta luminosidad (factor 10). Esto permitirá acceder a procesos ya contemplados en el ME pero muy singulares, como la producción de dos bosones de Higgs (lo que permitiría me-

dir su autoacoplamiento y, por tanto, estudiar si el potencial del Higgs es el predicho por el ME). Esta nueva fase del LHC también podría dar lugar a nuevos descubrimientos inesperados. Por otro lado, también hay que tratar de reducir las incertidumbres sistemáticas que ya están limitando algunos de los resultados actuales. En este contexto, en el que la precisión experimental se acerca a la incertidumbre teórica actual, es necesario un formalismo para calcular las correcciones de QCD a órdenes NNLO para todos los procesos que involucran quarks top. Se trata de un desafío a la vez teórico y experimental.

Agradecimientos

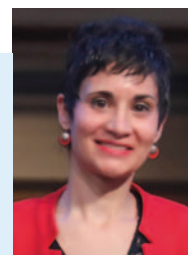
La autora agradece a los Profesores Miguel A. F. Sanjuan y Augusto Beléndez la invitación a presentar este trabajo, así como a la Fundación “la Caixa” y la Generalitat Valenciana por subvencionar los proyectos LCF/BQ/PI19/11690014 y SEJI/2020/037.

Referencias

- [1] Para descripciones del Modelo Estándar más detalladas, véase: el “Monográfico sobre la División de Física Teórica y de Partículas”, *REF*, vol. 32-1 (2018), “Cincuenta años del modelo estándar” *REF*, vol. 33-2 (2019) y “La evidencia experimental del modelo estándar”, *REF*, vol. 26-3 (2012).
 - [2] CDF Collaboration, “Observation of Top Quark Production in pp Collisions with the Collider Detector at Fermilab”, *Physical Review Letters* 74, 14, págs. 2626–2631 (1995); DØ Collaboration, “Observation of the Top Quark”, *Physical Review Letters* 74, 13, págs. 2422–2426 (1995).
 - [3] The LEP electroweak working group, LEPWWG/94-01 (CERN, mayo de 1994).
- Para más información sobre los resultados experimentales:
- [4] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/TopPublicResults>
 - [5] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsTOP>
 - [6] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCTopWGSummaryPlots>
 - [7] A. BEHRING *et al.*, “Higher Order Corrections to Spin Correlations in Top Quark Pair Production at the LHC”, *Phys. Rev. Lett.* 123, no.8, 082001 (2019).
 - [8] P.A. ZYLA *et al.* (Particle Data Group), “Progress of Theoretical and Experimental Physics”, vol. 2020-8, 083C01 (2020).

María Moreno Llácer

Docente del Dpto. de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universitat de València e investigadora del Instituto de Física Corpuscular (IFIC, CSIC-UV)



Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

SWAN como herramienta para la docencia de física de altas energías

Víctor Rodríguez Bouza

Universidad de Oviedo - Instituto de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA)



José Enrique Palencia Cortezón

Universidad de Oviedo - Instituto de Ciencias y Tecnologías Espaciales de Asturias (ICTEA)



El uso de la herramienta SWAN (*Service for Web-based ANalysis*) desarrollada por el CERN se ha utilizado en la docencia de la asignatura Física de Altas Energías y Aceleradores de cuarto curso del Grado en Física. Consiste en un análisis del proceso de desintegración de un bosón de Higgs usando datos abiertos de la Colaboración CMS y técnicas de aprendizaje automático. El alumnado aprecia la inclusión de estos contenidos y evalúa favorablemente el uso de SWAN.

Introducción

Hoy en día muchas herramientas informáticas empleadas tanto en ciencia y tecnología como en casi cualquier área profesional están “deslocalizándose” de nuestros ordenadores personales para ubicarse en la nube. Este movimiento presenta una serie de ventajas incuestionables, entre las que podemos contar la eliminación de la necesidad de poseer la herramienta (*software* y *hardware*) individualmente, a cambio de tener una conexión a Internet. Esto presenta oportunidades no solo para el día a día, en el uso productivo de estos instrumentos, sino también para, por ejemplo, la docencia y la divulgación científica.

Una de las herramientas que se han hecho populares en los últimos tiempos han sido los cuadernos de Jupyter [1], que permiten programar en varios lenguajes (aunque sobre todo se emplea con Python) a través de casillas de código (celdas), de un modo similar al de otro *software* como wxMaxima o Mathematica. Además, se accede al programa a través de un navegador de Internet, estando el editor embebido en una página web que se puede ejecutar en el mismo ordenador desde el que se accede, o se puede correr en un servidor dedicado. Y aquí radica una de sus mayores potencialidades: el poder “externalizar” la ejecución del código y la necesidad de, tan solo, un navegador web para programar. La gran popularidad de este tipo de cuadernos está bastante correlacionada con el auge de la ciencia de datos, el big data, aprendizaje automático



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

o inteligencia artificial en los últimos años, siendo casi omnipresente en estas áreas el uso de cuadernos Jupyter, y muy especialmente en el aprendizaje de las mismas.

En este contexto, el CERN [2], el centro europeo de investigación en física de altas energías, ha desarrollado una nueva herramienta: SWAN (*Service for Web-based ANalysis*) [3]. Un programa que, basándose en los cuadernos Jupyter, permite crear un servidor de los mismos modificado y mejorado, que está internamente conectado con su *software* de almacenamiento en la nube, CERN-Box [4], y que emplea EOS [5] como gestor interno de datos: el mismo programa que se usa para almacenar y mover todos los datos de colisiones del Large Hadron Collider, el mayor colisionador de partículas del planeta, ubicado en el CERN. Además de la interrelación con CERNBox y EOS, SWAN incluye mejoras en el editor de los cuadernos Jupyter normales, nuevos kernel que permiten correr por ejemplo el intérprete de C++ de ROOT [6] (la librería informática por excelencia para física experimental de partículas), así como acceso a todo el *software* necesario en este campo a través de CernVM-FS [7].

Siguiendo la filosofía respecto al *software* del CERN, SWAN es *software* gratuito y abierto. Junto a la gran cantidad de datos de acceso público que el CERN, dentro de su portal de ciencia abierta [8], ha sacado a la luz, esto muestra una gran potencialidad para el uso de estos datos y de la herramienta para fines divulgativos y docentes. Todo ello unido a otras características de la misma: facilidad de uso (solo se necesita un navegador y conexión a Internet), herramienta popular en la industria y la academia (sobre todo en el campo de ciencia de datos) y que permite una mayor interactividad a través de la ejecución por celdas con el código o lo que se quiera transmitir con un cuaderno.

Debido a estas características, nos propusimos el pasado curso 2019-2020 desarrollar un proyecto piloto para explorar el uso de herramientas como esta en la docencia de física de altas energías.

Aplicación a la docencia y desarrollo del plan

El proyecto se implementó en la asignatura de forma voluntaria, de modo que los alumnos interesados no tendrían que llevar a cabo las entregas de los trabajos habituales. Los estudiantes tenían que realizar varios ejercicios empleando

las herramientas, que les fueron explicadas en clase expositiva brevemente. Para hacer uso de ellas, tan solo debían conectarse a través de su navegador web a la plataforma en línea OpenUp2U [9], que fue el medio escogido para realizar el proyecto. En esa plataforma, haciéndose una cuenta de usuario, tenían acceso a un servidor de SWAN para poder hacer las tareas.

Los ejercicios que el estudiantado tuvo que hacer están basados en un análisis realizado con datos en abierto del experimento CMS [10] de búsqueda de desintegraciones de bosones de Higgs a dos leptones tau [11]. Aprovechando el trabajo realizado, creamos cuadernos de Jupyter en los que los estudiantes tenían parcialmente desarrollados ejemplos de código con los que trabajar y entender la física de los procesos que aparecían, los observables físicos, ejemplos de uso de modelos de aprendizaje automático, etc. Los cuadernos venían con ejemplos preconfigurados y explicaciones intercaladas en Markdown con vínculos a más referencias para entender mejor el código y las herramientas. Ejemplos de estos cuadernos, tal y como se observan en el navegador, se muestran en la figura 1.

Los ejercicios eran principalmente dos: en el primero, se hacían distintas preguntas en referencia al análisis que se estudiaba (la desintegración de bosones de Higgs a dos leptones tau), pidiéndoles entender distintos observables físicos y que intentaran entender cómo afectaba la física de cada proceso físico de fondo en cada uno de ellos. En el segundo ejercicio, se les pedía que intentaran aplicar un modelo de aprendizaje automático a estas simulaciones, para intentar clasificar los sucesos recogidos, que eran en efecto desintegraciones de bosones de Higgs a leptones tau (la señal) de los procesos de fondo.

Al final del curso, se pidió que hicieran una breve presentación con lo que habían realizado y aprendido. Para hacer las exposiciones más interesantes para el alumnado, se hicieron variantes de cada ejercicio (cambiando e. g. el modelo de aprendizaje automático que entrenar o los observables físicos que estudiar), de forma que la sesión de presentaciones fuera más atractiva. Finalmente, solicitamos que rellenaran una encuesta para recoger su experiencia con el proyecto.

Resultados

Antes de comentar las valoraciones recibidas, cabe destacar que el curso en el que se hizo estuvo claramente caracterizado por la pandemia por COVID-19, que afectó a las clases y vidas tanto de alumnado como profesorado. En nuestro caso, pudimos continuar a distancia con la asignatura, pero con un ritmo más lento. Tampoco se pueden eliminar los efectos indirectos (físicos o psíquicos) que sobre las personas mismas pudo tener la pandemia.

En cuanto a la propia realización de los ejercicios, los estudiantes en general consiguieron terminarlos, y las puntuaciones globales de los mismos arrojan una media de 8 sobre 10. Cabe destacar que debido a cuestiones técnicas, y también indirectamente por la pandemia, el alumnado dispuso de menos tiempo del que en principio se quería para hacer los ejercicios, pero, para compensar por ello y por el contexto global, se redujeron los requisitos de los mismos y se amplió en el tiempo todo lo posible la fecha de entrega.

Respecto a las presentaciones, cabe mencionar positivamente la sesión de defensa (por videollamada) y la

diversificación de los ejercicios con el uso de distintas técnicas y el estudio de diferentes observables, pues al final apreciamos cierto interés por todo el alumnado en comprender lo que sus compañeros/as habían visto.

Las respuestas de la encuesta propuesta como parte del proyecto (todo el alumnado contestó a la misma) muestran valoraciones globalmente positivas. A la pregunta “en una escala del uno al cinco (siendo uno lo peor y cinco lo mejor), ¿cuán útiles te parecen, globalmente, las siguientes herramientas para hacer prácticas de clase?”, de media respondieron con un 3.8 en el caso de SWAN y en el caso de los cuadernos Jupyter con un 4.0. Resulta significativo también que a la pregunta “¿cuán positivo o útil crees que es que enseñemos herramientas de aprendizaje automático o intelligen-

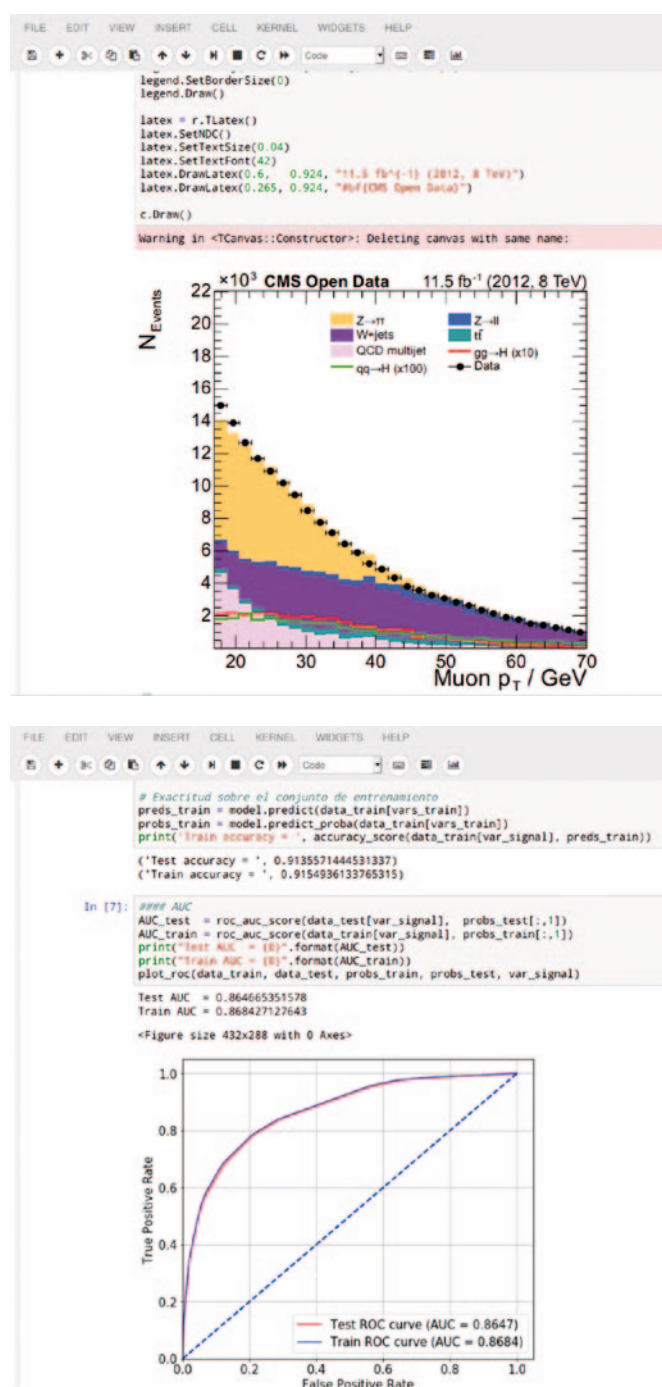


Figura 1. Visualización de los cuadernos de Jupyter dados a los estudiantes para realizar el proyecto.

cia artificial...” de media se respondiera con un 4.2 en el caso de “... en esta asignatura?” y 4.6 en el caso de “... en alguna asignatura optativa/de último curso del Grado en Física?”, lo que es muestra del interés por el alumnado por los contenidos de aprendizaje automático. En la Figura 2 se pueden observar resumidos los resultados.

Finalmente, la encuesta incluía un recuadro para incluir sugerencias o comentarios de forma optativa. Un estudiante hace referencia a la falta de tiempo para hacer estos ejercicios, diciendo en un caso que “le dedicamos una parte muy pequeña del semestre cuando realmente no estamos familiarizados con ello”. Otro destaca que esta herramienta es “muy útil para pensar un poco menos en la programación y mucho más en la física detrás de los procesos con los que se trabaja”. Otro se congratula del cambio de método pedagógico, frente al tradicional informe de práctica o trabajo (“me parece muy ‘refrescante’ que [...] se haya propuesto sustituir el enésimo informe que haríamos por algo distinto y más liviano”), y menciona que le haya motivado para aprender autónomamente sobre los contenidos de los ejercicios (“he acabado dedicando bastante tiempo a leer sobre ello solo movido por la propia curiosidad, cosa que llevaba mucho tiempo sin ocurrirme, y he conseguido comprender conceptos fundamentales a la par que importantes simplemente por el afán de saber”).

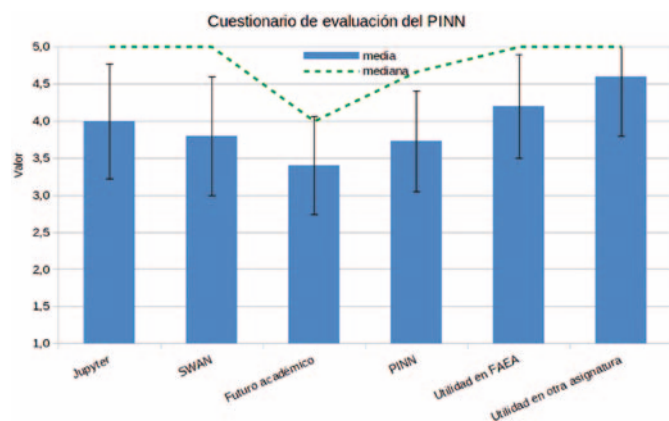


Figura 2. Gráfico de barras que muestra la media y la mediana de las respuestas a la valoración del uno al cinco de distintos aspectos del proyecto: los cuadernos Jupyter, SWAN, si cree que será útil para su futuro académico, el proyecto en general, la utilidad de contenidos de aprendizaje automático en la asignatura (Física de Altas Energías y Aceleradores) y la utilidad en otra asignatura.

Los comentarios recogidos vienen a corroborar en cierta forma algunas apreciaciones que ya hicimos en párrafos anteriores de esta sección, como el poco tiempo que finalmente dispusieron para hacer los ejercicios, frente al inicialmente contemplado. También el interés que suscitaron los contenidos en el alumnado y el hecho de que a través de estos cuadernos Jupyter ciertos aspectos de la física experimental de altas energías podrían ser más accesibles a quien los lee (y ejecuta).

Conclusiones

La retroalimentación recibida y explicada en la sección anterior, así como el desarrollo del propio proyecto, nos permite decir que lo hemos culminado de forma exitosa, a pesar de los impedimentos directos e indirectos de la pandemia por COVID-19.

SWAN y los cuadernos de Jupyter no constituyen una “revolución” para enseñar física experimental de altas energías,

ni mucho menos, ni tampoco constituyen una guía sobre la que hacer docencia de esta área científica. Sin embargo, hemos constatado que sí pueden ser buenas herramientas para ayudar en esta labor. Las buenas valoraciones recibidas nos animan a intentar explorar más utilidades de estas herramientas en cursos próximos.

Referencias

- [1] Página web oficial del proyecto Jupyter: <https://jupyter.org>
- [2] Página web oficial del CERN: <https://cern.ch>
- [3] Página web oficial de SWAN: <https://swan.web.cern.ch/>
- [4] Página web oficial de CERNBox: <https://cernbox.web.cern.ch>
- [5] Página web oficial de EOS: <https://eos-web.web.cern.ch>
- [6] Página web oficial de ROOT: <https://root.cern.ch/>
- [7] Página web oficial de CernVM-FS: <https://cernvm.cern.ch/portal/filesystem>
- [8] Portal oficial de ciencia abierta del CERN: opendata.cern.ch
- [9] Portal oficial de OpenUp2U: <https://up2university.eu/open/>
- [10] CMS Collaboration, “The CMS experiment at the CERN LHC”, JINST 3 (2008) S08004, doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08004.
- [11] Analysis of Higgs boson decays to two tau leptons using data and simulation of events at the CMS detector from 2012 [<http://opendata.cern.ch/record/12350>].

La cámara termográfica: una fascinante visión de la física

Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia
Dpto. de Física y Química. IES Las Lagunas (Madrid)



Una imagen vale más que mil palabras
(Aforismo popular)

Las cámaras termográficas son un innovador recurso didáctico que permite visibilizar y mejorar la comprensión de fenómenos relacionados con la materia, la temperatura y la energía térmica. Para mostrar las aplicaciones de esta tecnología, las demostraciones didácticas se complementan con ejemplos prácticos relacionados con las inspecciones que realizan los técnicos con el fin de localizar problemas en edificios (sobrecalentamiento en conexiones y sistemas eléctricos, fugas de agua y filtración de humedades, pérdidas de calor y aislamientos deficientes) y tramitar certificados de eficiencia energética.

La cámara termográfica en el aula

La facilidad de manejo de las cámaras termográficas (térmicas o de infrarrojos), y su precio cada vez más asequible, hace muy recomendable que los docentes aprovechen este nuevo

recurso tecnológico que facilita su trabajo y fomenta la innovación. Por un lado, mejora la comprensión de fenómenos en los que están implicadas transferencias de energía térmica, mediante la asombrosa perspectiva infrarroja. Por otro lado, estimula la curiosidad y ganas de aprender del estudiante, e impulsa la generación de vocaciones científicas.

La cámara termográfica puede ser utilizada para analizar e investigar procesos térmicos empleando distintas metodologías. Ya sea mediante la proyección de imágenes en pantalla grande a toda la clase, o de forma personalizada, acercando la pantalla de la cámara a grupos reducidos. De esta forma, puede ser útil tanto en el aula, como ilustración a las explicaciones, como en el laboratorio, para realizar experiencias, o en cualquier otro espacio, para realizar investigaciones de campo. Si bien el manejo de la cámara es muy sencillo, para interpretar las imágenes térmicas es recomendable realizar previamente un curso básico de formación, ya que son varios los factores que pueden influir en su análisis correcto (emisividad, atenuación, reflexiones, etc.).

Los contenidos incluidos en las experiencias (efecto Joule, cambios de estado, transferencias de energía térmica, efecto invernadero) se encuentran, en diferente grado de profundidad, dentro de los currículos de la asignatura de Física y Química, desde los primeros cursos de la ESO hasta los de Bachillerato, por lo que las actividades mostradas son susceptibles de ser aprovechadas por el docente en diferentes niveles. Especialmente, en asignaturas como Ampliación de Física y Química de 4.º de la ESO, normalmente de grupo reducido e impartido en el laboratorio, la más adecuada para desarrollar proyectos científicos.

Con el fin de divulgar el trabajo realizado por los escolares, una interesante opción es mostrarlo, en forma de carteles ilustrativos, en una exposición organizada en un espacio común del centro educativo y presentarlo en ferias científicas divulgativas (Figura 1), donde los propios alumnos actúan de monitores frente al público y compañeros, enseñando lo aprendido.



Figura 1. Alumno mostrando aplicaciones de la termografía durante el VI Finde Científico, MNCYT de Madrid.

¿Cómo funciona una cámara termográfica?

Toda la materia, incluso la que se encuentra a temperatura tan baja como el hielo, al estar por encima del cero absoluto de temperatura, emite radiación infrarroja. Pero nuestros ojos no la puedan ver; al igual que sucede con la mayor parte del espectro electromagnético (ultravioleta, rayos X, etc.). A mayor temperatura mayor radiación infrarroja emitida (Ley de Stefan-Boltzmann). Las cámaras termográficas ofrecen la oportunidad de visibilizar la radiación infrarroja que emite la superficie de los cuerpos, mostrando una imagen con distintas gamas de color, que se corresponden con la diferente distribu-

ción de la radiación infrarroja y de la temperatura. Cada pixel corresponde a un valor de temperatura, al que se le asocia un tono determinado. El modelo de cámara utilizado (Flir i7) tiene una sensibilidad térmica de $0,1^{\circ}\text{C}$ y una resolución de 140×140 , equivalente a utilizar 19.600 termómetros simultáneamente. Entre los modelos más económicos se encuentran las minicámaras térmicas (sin pantalla propia) conectables al puerto USB de teléfonos smartphones (Flir One, sobre 300 €) y las compactas de bolsillo (Flir Cx-3, alrededor de 600 €).

En este tipo de cámaras termográficas el funcionamiento es semejante. La radiación infrarroja que emiten los cuerpos (a) es recibida por la cámara a través de una lente especial de germanio que permite su paso (b). La lente enfoca la radiación sobre un detector de infrarrojos (c), que envía la información a un sensor (d), el cual convierte los datos en una imagen dentro del espectro visible, en la que la escala de colores refleja las distintas intensidades de radiación infrarroja y de temperatura. La imagen puede verse en una pantalla LCD (e), junto a la temperatura puntual, el rango de temperatura y la escala de temperatura en función del color (Figura 2).

El *software* disponible ofrece diferentes herramientas y paletas de color para visualizar y analizar mejor las variaciones térmicas. En las figuras mostradas se han empleado paletas donde el color azul indica la temperatura más baja y el blanco o rojo la más alta.

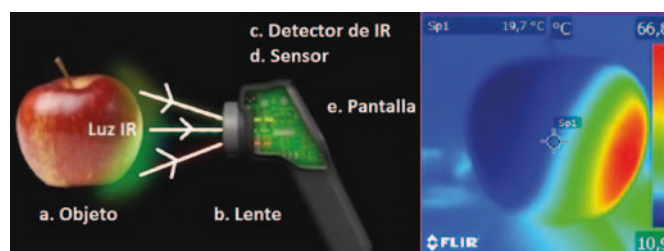


Figura 2. Cámara Flir i7 e imagen termográfica de una manzana calentada por una lámpara incandescente: la zona roja, indica la temperatura máxima (67°C) y la zona azul, la mínima (11°C).

Las imágenes se almacenan, incluyendo todos los datos de temperatura, en una tarjeta mini SD que permite transferir toda la información a un ordenador, mediante interfaz USB, para su tratamiento y posterior análisis.

La termografía, además de ser muy práctica en medicina y veterinaria para detectar de forma rápida y no invasiva fiebre, lesiones, inflamaciones, puntos de dolor y tumores superficiales, tiene aplicaciones en numerosos sectores, como investigación, industria, eficiencia energética, seguridad, vigilancia y docencia [1].

A continuación, se muestran algunas experiencias que pueden ser útiles a los docentes que se inicien en esta sorprendente tecnología.

Visibilización del efecto Joule e inspección eléctrica

En todos los dispositivos conectados a un enchufe eléctrico, una parte de la energía eléctrica se transforma en energía calorífica, debido a colisiones de los electrones con los átomos del conductor; lo que se traduce en un aumento de la temperatura (Efecto Joule). En la imagen termográfica de la Figura 3 se muestra cómo el cargador de un teléfono móvil presenta mayor temperatura (35°C) que el resto de conexiones a la misma toma (sobre 20°C). La cantidad de calor liberado por el

circuito es una media del trabajo que ha realizado. Joule comprobó que el trabajo eléctrico es proporcional al cuadrado de la intensidad de corriente, a la resistencia y al tiempo que esté conectado el circuito. Como la mayoría de los móviles trabajan a un voltaje de 5 V, y su resistencia es similar (el material, la sección y la longitud del conductor son semejantes), la intensidad es la magnitud que afecta a la energía calorífica disipada al medio ambiente por un cargador. Los dispositivos inalámbricos de carga no necesitan conectarse directamente, pero disipan más energía térmica y, por tanto, son menos eficientes.

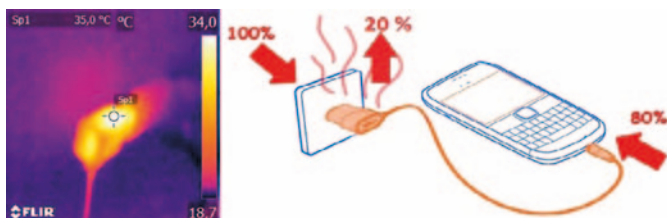


Figura 3. Efecto Joule de recalentamiento en el cargador de un teléfono.

La rapidez con la que se carga un teléfono también depende de la intensidad. Así, un cargador de teléfono móvil que lleve la inscripción de salida (*output*) 5,0 V y 1,0 A, tendrá una potencia de salida de 5 W (Potencia = Voltaje · Intensidad = 5 V · 1,0 A = 5 W), lo que corresponde a una carga de 5 julios por cada segundo que está conectado el cargador. Si la intensidad se duplica, la energía que suministra por segundo se duplica, por lo que se cargará en menos tiempo, pero disipando más energía térmica.

Como aplicación al mundo profesional, los alumnos pueden realizar con la cámara de IR una inspección de instalaciones eléctricas del instituto (equipos, cuadros eléctricos, transformadores, fusibles, enchufes, tomas de corriente, etc.) para detectar calentamientos excesivos debido a malas conexiones, sobrecargas de tensión, recalentamientos en fusibles, que conllevan riesgos de cortocircuitos e incendios. En la imagen termográfica de la Figura 4, se observa un punto caliente (34 °C) en la conexión de un diferencial de un cuadro eléctrico, comparado con los otros que indican menor temperatura (26 °C). Esta anomalía indica que es necesario revisar la línea regulada por el dispositivo sobrecalentado para evitar problemas mayores.

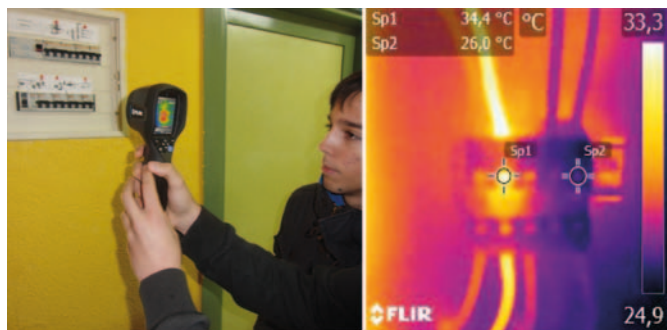


Figura 4. Inspección de un cuadro eléctrico y ejemplo de línea sobrecalentada.

Visibilización de la evaporación y detección de humedades

Con la cámara infrarroja, los estudiantes pueden visualizar de forma recreativa variaciones de energía térmica y tempe-

ratura asociados a los cambios de estado, como consecuencia de la absorción o desprendimiento de energía térmica que se produce en su entorno [2]. Así por ejemplo, al dibujar con un pincel mojado en agua sobre una hoja de papel (Figura 5), a simple vista no veremos nada. Sin embargo, con la cámara térmica se aprecia una intensa coloración en la zona humedecida, que se corresponde con una disminución de la temperatura superficial, pasando de una temperatura ambiente de 20 °C a 17 °C. Este efecto se debe a la evaporación de las moléculas de agua en la zona donde se ha trazado el dibujo y es el responsable de la sensación de frescor que sentimos al evaporarse el sudor; proceso que mantiene constante la temperatura del organismo.

Si el dibujo se realiza con un pincel impregnado en etanol, se produce un efecto refrigerante de diferente intensidad, y la temperatura que muestra el dibujo trazado es todavía más baja (14 °C).



Figura 5. Diferente efecto refrigerante de la evaporación del agua y del etanol, mostrado en la V Jornada Con Ciencia en la Escuela, Círculo de Bellas Artes de Madrid.

Aunque el etanol presenta un calor de vaporización (879 kJ · kg⁻¹) bastante menor que el del agua (2257 kJ · kg⁻¹), en la imagen termográfica se aprecia un mayor descenso de temperatura en su dibujo, a pesar de que absorbe menos energía térmica. Este resultado, aparentemente contradictorio, se explica por la mayor volatilidad del etanol, que se evapora mucho más rápidamente que el agua. Si midiésemos el calor total absorbido por la evaporación del agua sería mayor que el calor total absorbido por la misma masa de etanol. Si el dibujo se pinta con un líquido no volátil, como la glicerina o el aceite, al ser despreciable su evaporación, no se detecta variación de temperatura en la imagen térmica.

Como aplicación al mundo laboral, los alumnos pueden realizar con la cámara inspecciones reales en las instalaciones del instituto, con el fin de detectar filtraciones de humedad y fugas de agua no visibles a simple vista, sin necesidad de romper paredes o destrozar el suelo. De esta forma es posible prevenir graves daños (inundaciones, cortocircuitos, corrosión, derrumbamientos, etc.) e importantes pérdidas económicas. En la imagen termográfica de la figura 6 se detectan en el techo de una sala diferencias de temperatura de 6 °C (máxima de 31 °C y mínima de 25 °C). Las zonas de menor temperatura indican la presencia de humedad debida al agua, que al evaporarse a través del techo absorbe energía del entorno, enfriando la superficie que impregna. En este caso, es recomendable revisar las tuberías de agua y desagües, que son la causa de muchas filtraciones y condensaciones, así como comprobar el aislamiento y la impermeabilización de paredes y techo.

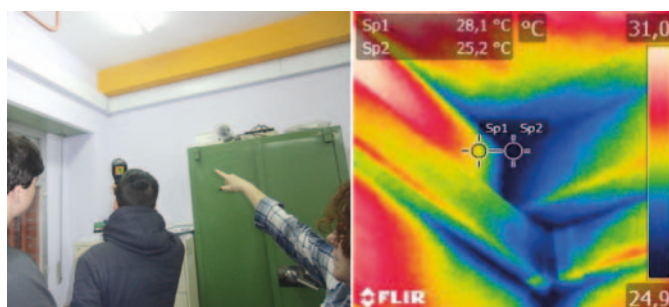


Figura 6. Detección de filtraciones de agua no visibles a simple vista.

Visibilización de fugas térmicas y análisis de eficiencia energética

Los materiales clasificados como malos conductores del calor, o aislantes térmicos, se caracterizan porque ofrecen mucha resistencia al paso de la energía térmica, por ello son adecuados para reducir sus fugas en distintas situaciones. Por ejemplo, si queremos conservar la leche caliente con un calentador eléctrico hay que mantenerlo encendido, gastando energía y cediendo buena una parte al entorno. Pero si la introducimos dentro de un recipiente de material aislante (termo) se mantiene la temperatura durante mucho tiempo, no siendo necesario consumir energía. Otro ejemplo cotidiano de aislante térmico lo encontramos en la ropa, que evita el enfriamiento del cuerpo cuando la temperatura ambiente es inferior a la del organismo. La cámara termográfica permite comparar de una forma rápida la eficacia aislante de diferentes tejidos utilizados, tanto en la ropa normal como en prendas térmicas específicas para combatir las bajas temperaturas, que reducen la transferencia de energía calorífica con el ambiente y evitan que el cuerpo se enfríe. En la imagen termográfica de la Figura 7 se detecta cómo la pérdida de energía térmica es mucho mayor en la mano con guante normal de poliéster (31° C) que en la mano con guante de esquí de tejido técnico (25° C), siendo la temperatura ambiente de 21° C.

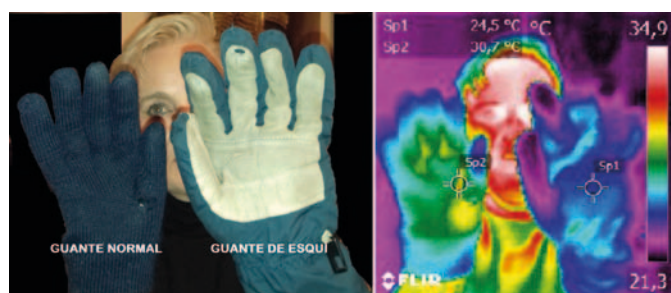


Figura 7. Comparativa del aislamiento térmico entre dos guantes de diferente tejido: el guante de esquí es mejor aislante del calor y evita las fugas térmicas de las manos.

De forma semejante a lo que sucede con el termo y los guantes, ocurre con el aislamiento y consumo energético de las viviendas. Cuando están bien aisladas, nos protegerán tanto del frío en invierno como del calor en verano, evitando un excesivo consumo de energía en la calefacción o el aire acondicionado. Los técnicos que realizan auditorías energéticas de edificios utilizan las cámaras termográficas para detectar fugas térmicas debidas a un aislamiento deficiente en puertas y ventanas, lo que disminuye la eficiencia

energética de la instalación. Como aplicación práctica, los alumnos pueden realizar con la cámara una inspección de sistemas de cerramientos del instituto para detectar fugas de energía y así poder mejorar el rendimiento energético de la calefacción [3]. En la imagen termográfica de la Figura 8, tomada un día en que la temperatura ambiente era de unos 5° C, se observan zonas de fugas térmicas en las ventanas (11° C), siendo bastante menores cuando las persianas están bajadas (7° C). La causa de las fugas es un deficiente aislamiento de los sistemas y materiales empleados, que se traduce en pérdidas económicas al tener que quemar un exceso de combustible en la calefacción para compensar las pérdidas de energía calorífica y mantener una temperatura constante en el interior de las instalaciones. Para optimizar la eficiencia energética y reducir fugas de energía, es recomendable mejorar el aislamiento de las ventanas, instalando un sistema de doble acristalamiento con cámara de aire o gas argón.

En la misma fachada, se detectan entre las plantas unas franjas horizontales que corresponden a pequeñas fugas térmicas procedentes de las tuberías generales de agua caliente de la calefacción, causadas por un deficiente aislamiento.

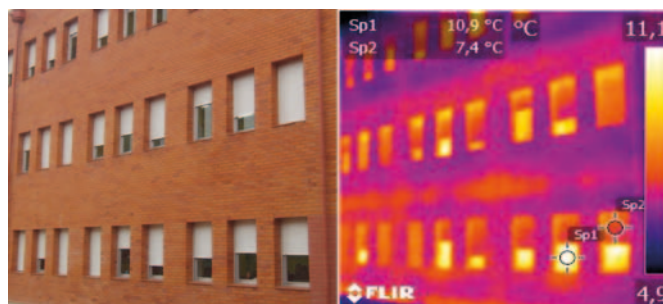


Figura 8. Fugas de energía térmica a través de las ventanas de las aulas.

Visibilización del efecto invernadero

Los materiales transparentes, como el vidrio de una ventana o las lentes de unas gafas, dejan pasar la luz visible, pero no son transmisores de la radiación infrarroja, la mayor parte de esta radiación es reflejada. La cámara térmica solo puede medir la temperatura de la superficie del vidrio, no de la que hay detrás de él, siendo necesario un contacto visual directo con el objeto para obtener su imagen térmica. Sin embargo, las longitudes de onda de la radiación infrarroja sí pueden atravesar finas láminas de plástico negro, como el utilizado en las bolsas de basura, pero absorben las longitudes de onda de la luz visible, y como resultado son opacas a la visión normal. Por esta razón, las cámaras de IR son muy eficaces para rescatar personas atrapadas por el humo de un incendio o desorientadas por la niebla en la montaña.

El proceso por el que la mayor parte de la radiación emitida por el Sol penetra a través de un vidrio, y es absorbida por los materiales del interior que al calentarse emite radiación infrarroja, es el fundamento del denominado efecto invernadero. Una parte de la radiación absorbida por el vidrio es radiada hacia el interior, lo que hace que aumente la temperatura respecto al exterior.

El efecto invernadero se puede comprobar introduciendo dos coches iguales en dos vasos de plástico transparente, uno de ellos con la parte superior recortada y abierta, y colocándolos cerca de una bombilla de incandescencia encendida

de 100 W. Al cabo de una hora, la imagen térmica (Figura 9) muestra cómo el coche del vaso cerrado alcanza mayor temperatura (42°C) comparado con el situado dentro del vaso abierto (39°C), que permite salir a parte de la radiación infrarroja y del calor por convección.



Figura 9. Demostración del efecto invernadero: el coche del interior del vaso cerrado alcanza mayor temperatura que el coche situado dentro del vaso abierto.

Es posible comprobar la diferente absorción de radiación IR entre el aire y un gas de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, a partir de un globo lleno de aire y otro de CO_2 , gas obtenido de un cartucho de sifón para carbonatar bebidas. Para ello, detrás de cada globo se colocan sendos muñecos de plástico, previamente introducidos en un frigorífico durante una hora para que estén a la misma temperatura. En la imagen térmica (Figura 10) se observa cómo la temperatura aparente que marca la superficie del muñeco situado detrás del globo lleno de CO_2 (15°C) es menor que la del muñeco colocado detrás del globo de aire (14°C), lo que indica que el CO_2 ha absorbido mayor cantidad de radiación infrarroja. Resultado lógico, si tenemos en cuenta que los principales gases que constituyen el aire (nitrógeno, oxígeno, argón) no absorben ni emiten radiación IR.

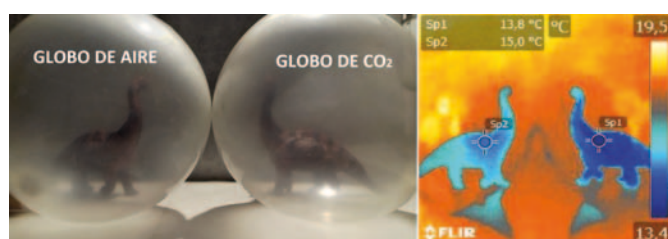


Figura 10. Comparativa de la absorción de la radiación IR entre el aire y el dióxido de carbono: el CO_2 absorbe mayor cantidad de radiación IR.

Los sensores de CO_2 utilizados para comprobar la correcta ventilación de estancias, y controlar la propagación de epidemias como la COVID-19, constan de un emisor de radiación infrarroja y un receptor que recibe la radiación atenuada de forma proporcional a la concentración de CO_2 contenido en el aire.

Estas, y otras demostraciones termográficas que se pueden consultar en las referencias [4], han sido expuestas en diferentes eventos: al público en general, en el *stand* de la RSEF durante la Feria Madrid por la Ciencia y la Innovación 2019 (IFEMA), a los docentes, en un taller patrocinado por la RSEF durante las X Jornadas de la Enseñanza de la Física (Caixaforum-Madrid), y presentadas al XVI Concurso Ciencia en Acción, donde obtuvieron el primer premio en la sección Demostraciones de Física.

Conclusiones

La existencia en el mercado de modelos de cámaras termográficas cada vez más económicas hace que sea una buena ocasión para que los docentes incorporen a sus departamentos didácticos este instrumento científico con un gran potencial para la docencia de la física en ESO y Bachillerato. Las aplicaciones de la cámara son numerosas, lo que permite su aprovechamiento dentro del aula, en el laboratorio o en cualquier otro espacio.

A partir de la visión infrarroja, no solo se consigue mejorar la comprensión de determinados fenómenos físicos relacionados con el calor, sino también aumentar la motivación e interés del estudiante hacia la física, contribuyendo a la mejora de resultados y al incremento en el número de alumnos que optan por la modalidad del bachillerato científico. Este interés de los estudiantes igualmente se refleja en su deseo de participar como monitores en ferias de ciencia para transmitir la importancia y el atractivo de esta tecnología. Por todo ello, podemos concluir que la cámara térmica es un fascinante recurso para la didáctica y divulgación de la física que no debería faltar en ningún centro de enseñanza preuniversitaria.

Referencias

- [1] M. VOLLMER y K. MÖLLMANN, *Termografía infrarroja: fundamentos, investigación y aplicaciones* (Ed. Universita Politècnica de València, 2013).
- [2] TVE. Programa *Órbita Laika*, “¿Cómo funciona y para qué se emplea una cámara termográfica?”, (2015). <https://www.rtve.es/alicarta/videos/orbita-laika/orbita-laika-demostracion/3302499/>
- [3] C. XIE y E. HAZZARD, “Infrared imaging for inquiry-based learning”. *The Physics Teacher* 49, 368-372, (2011).
- [4] F. PRADA, “La termografía infrarroja: un sorprendente recurso para la enseñanza de la física y la química”, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 13 (3), 617-627 (2016). <http://hdl.handle.net/10498/18501>

Relatividad Especial: una interpretación del fenómeno de la “dilatación temporal”

Juan Tomé

Catedrático de Física y Química de Secundaria,
Malpartida de Plasencia (Cáceres)



Este artículo presenta una interpretación de la relación $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0$, la que refleja el fenómeno de la “dilatación temporal”. Se basa en las bien conocidas propiedades

geométricas del espaciotiempo, pero se construye mediante los conceptos de *universo de procesos*, *proceso*, *reloj* y *duración*, que se usan con el significado físico que se precisa en el texto, y cuyos correspondientes formales respectivos son espaciotiempo, línea de universo, línea de universo pautada e intervalo espaciotemporal.

La “dilatación temporal”

En la Teoría de la Relatividad Especial (TRE), para dos Sistemas de Referencia (SR) en movimiento relativo con velocidad v constante, y para dos sucesos en reposo en uno de ellos, la transformación de Lorentz de la coordenada temporal se reduce a la relación

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_0 \quad (1)$$

siendo $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$, y en la que los significados precisos de Δt_0 y Δt , formulados en el lenguaje habitual, son los siguientes:

- $\Delta t_0 \equiv$ intervalo temporal entre los dos sucesos medido por un reloj en reposo respecto del objeto al que ambos sucesos se refieren. Es el tiempo propio entre los dos sucesos.
- $\Delta t \equiv$ intervalo temporal entre los dos sucesos medido por los relojes (se necesitan dos al menos) del SR en que el objeto al que los dos sucesos se refieren es móvil con velocidad v constante.

Se abrevia todo eso diciendo que Δt_0 es el intervalo temporal en el SR móvil y que Δt es el intervalo temporal en el SR en reposo. Como siempre es $v < c$, resulta siempre que $\Delta t > \Delta t_0$. En consecuencia, suele concluirse que “los relojes en movimiento atrasan”, o que “el tiempo transcurre más lentamente en el SR móvil que en el SR en reposo”.

Para los físicos relativistas, conocedores del significado preciso de la ecuación (1), no hay problemas para entender esas frases como titulares de entrada al fenómeno de la “dilatación temporal”. Pero es fácil que los no especialistas las malinterpreten, precisamente porque intentan la explicación de un fenómeno esencialmente espaciotemporal usando el lenguaje común, que separa espacio y tiempo por razones originarias. Se presenta a continuación un lenguaje que integra lo espacial con lo temporal y que permite construir una interpretación de la relación (1) accesible a los no especialistas. Los términos *universo de procesos*, *sitiomomento*, *proceso*, *reloj* y *duración* son la base de ese lenguaje. En el siguiente epígrafe se precisa el significado con el que se usan en todo este artículo.

Universo de procesos: realidad física intrínsecamente cuadridimensional

En la TRE, un suceso es un hecho físico. Su descripción requiere la determinación del *donde* cuando se produce. Se corresponde con un punto del espaciotiempo. Se resalta su carácter cuadridimensional llamando *sitiomomento* a ese punto. Un suceso es una realidad física y el *sitiomomento* sería su correlato formal.

Un conjunto de sucesos causalmente conectados es un *proceso*. Un proceso es una realidad física y su correlato formal sería una línea de universo. El conjunto de todos los procesos es el *universo de procesos* relativista. El espaciotiempo sería su correlato formal.

En esa visión de la realidad física, los elementos básicos son los procesos, que incorporan en su definición la dimensión del cambio. Los procesos pueden desarrollarse en cualquier dirección del espaciotiempo que esté permitida por la conexión de causalidad. Hay procesos paralelos, pero en general son oblicuos entre sí. El movimiento relativo sería la percepción de esa oblicuidad; el paralelismo se percibe como reposo relativo. En la concepción clásica solo hay una dirección del cambio; en el universo de procesos relativista hay tantas como grupos de procesos paralelos.

Los *relojes* son *procesos patrón*, repetibles tan fielmente como sea posible. El vaciado de las clepsidras, el vaivén del volante de relojes mecánicos o la transición hiperfina de los átomos de ^{133}Cs de relojes atómicos, son ejemplos de procesos patrón. Como los relojes modernos los repiten automáticamente pueden considerarse ritmos patrón. La comparación de un proceso con un reloj es una medida. Cuando el reloj, un proceso pautado por repetición, se tiende junto al proceso con el que se compara (cuando la línea de universo del reloj y la del proceso se superponen), el resultado refleja una propiedad física del proceso, su *duración*, cuantificada por el número de veces que el proceso patrón cabe en él. El correlato formal de la duración es el intervalo espaciotemporal, la longitud cuadridimensional de la línea de universo que corresponde al proceso.

La duración coincide siempre con el tiempo propio relativista, que tiene dos propiedades definitorias: predicarse de una línea de universo concreta y tener carácter absoluto, en correspondencia con la invariancia del intervalo métrico espaciotemporal. Para la duración, esas dos propiedades se derivan de su definición. Por un lado, la duración resulta de la comparación de dos entidades físicas homogéneas: un proceso cualquiera y un proceso pautado, un reloj, de forma que la duración siempre es propia, propia de algún proceso concreto. Por otro, un proceso es una realidad física absoluta: los hechos que lo constituyen son hechos para todos los observadores. La duración del proceso es, por tanto, una magnitud física absoluta, independiente del SR.

Dado que el cambio es ubicuo y permanente, que no existen sistemas materiales inmutables, todo puede ser considerado proceso: trenes, estaciones, partículas, laboratorios, relojes, gemelos, naves espaciales y planetas lejanos. Las partículas serían procesos elementales; los demás de la lista serían procesos complejos, colecciones de procesos más simples, prácticamente paralelos y ligados entre sí. Todos ellos son protagonistas de fenómenos clásicos de los trabajos de introducción o divulgación de la TRE. Dos de esos fenómenos se explican a continuación usando los términos *proceso*, *universo de procesos*, *reloj* y *duración* con el significado que se ha intentado precisar en este epígrafe. Por referirse a realidades de cuatro dimensiones integradas, son muy útiles para describir los fenómenos relativistas de una forma que puede facilitar su comprensión.

Experiencia mental del tren que viaja entre estaciones

Un tren hace, a velocidad v constante, un recorrido que tiene dos estaciones, A y B, en las que no para. El reloj de la máquina del tren y los de las estaciones marcan lo mismo cuando pasa por A. Pero cuando llega a B, los relojes de las estaciones marcan más que el de la máquina. Si la velocidad

del tren fuera $0,7c$ y el reloj del tren marcará, por ejemplo, 25 segundos, los de las estaciones marcarían 35, de acuerdo con la ecuación (1). La experiencia es un ejemplo de “dilatación temporal”: se dice habitualmente que “el reloj de la máquina del tren atrasa” o que “el tiempo pasa más despacio en el tren que en las estaciones”.

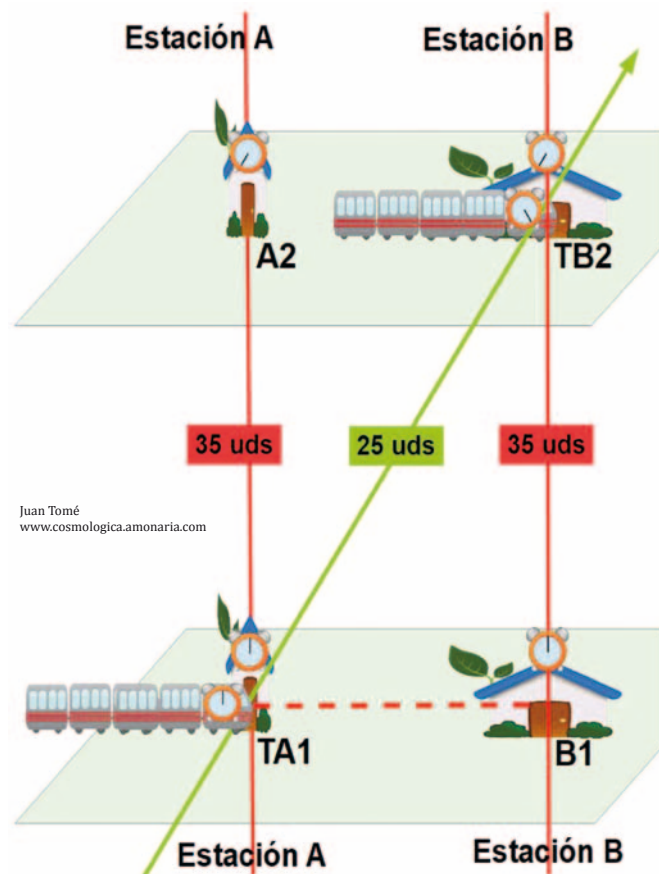


Figura 1

En la visión del universo de procesos, el tren y las estaciones son procesos oblicuos, de direcciones distintas en el espaciotiempo. Las líneas de universo correspondientes se representan en la Figura 1: rojas las de las estaciones y verde la de la máquina del tren. Los planos dibujados son planos de simultaneidad en los SR de las estaciones. La oblicuidad del “proceso tren” respecto a los “procesos estaciones” se percibe como movimiento relativo.

También los relojes de la experiencia son procesos, procesos pautados que, tendidos en paralelo al “proceso tren” o a los “procesos estaciones”, permiten contar las unidades que caben en ellos, medirlos.

El reloj de la máquina del tren mide la duración del proceso “tren entre TA1 y TB2”, que coincide con el tiempo propio entre los sucesos “paso de la máquina por la estación A” y “paso de la máquina por la estación B”, y que es la longitud del segmento de línea de universo TA1-TB2. Para hacer esta medida basta el reloj de la máquina. El resultado es $\Delta t_{0\text{TA1-TB2}} = 25$ segundos.

El reloj de la estación B, sincronizado con el de la estación A, mide la duración del proceso “estación B entre B1 y TB2”, que coincide con el tiempo propio entre los sucesos “reloj de B marcando lo mismo que el reloj de A cuando la máquina pasa por A” y “paso de la máquina por la estación B”, y que es la longitud del segmento de línea de universo B1-TB2. El

reloj de la estación B realiza la medida, pero no puede hacerla sin el concurso del reloj de la estación A, que proporciona el dato de lo que marcaba cuando la máquina pasó por allí. El resultado es $\Delta t_{0\text{B1-TB2}} = 35$ segundos. La medida del reloj de la estación B es distinta de la del reloj de la máquina porque uno mide una cosa y el otro mide otra.

La relación (1) queda ahora $\Delta t_{0\text{B1-TB2}} = \gamma \cdot \Delta t_{0\text{TA1-TB2}}$ con $\gamma = 1 / (1 - 0,7^2 c^2 / c^2)^{1/2}$, y se interpreta como una relación entre dos duraciones o dos tiempos propios, uno de los cuales, $\Delta t_{0\text{B1-TB2}}$, es proyección del otro en el SR de las estaciones.

En la geometría del espaciotiempo no es el coseno circular sino el hiperbólico, dado por γ , el que rige la relación de proyección. Como es siempre mayor que 1, las proyecciones en esa geometría son mayores que lo proyectado. Resulta entonces, en el caso que analizamos, que en lo que mide el reloj de la estación B (la proyección) caben más tictacs, más unidades patrón, que en lo que mide el de la máquina (lo proyectado). Por eso, cuando el tren llega a B, el reloj de la estación marca más que el de la máquina.

No hace falta, en esta interpretación, acudir a tiempos que pasan más deprisa o más despacio, ni a relojes que cambian su marcha [1]. El reloj de la máquina del tren y los de las estaciones, como buenos patrones, mantienen sus ritmos. Si están sincronizados cuando el tren pasa por A y no lo están cuando el tren llega a B es, simplemente, porque midieron cosas distintas.

Experiencia real de la detección de muones procedentes de los rayos cósmicos

Prueba clásica de la TRE es el experimento de detección, a distintas alturas sobre el nivel del mar, de los muones que se producen por colisiones de rayos cósmicos con núcleos atómicos en capas altas de la atmósfera. Algunos, al producirse, resultan dirigidos verticalmente hacia la superficie terrestre, con velocidades muy cercanas a la de la luz.



Juan Tomé
www.cosmologica.amonaria.com



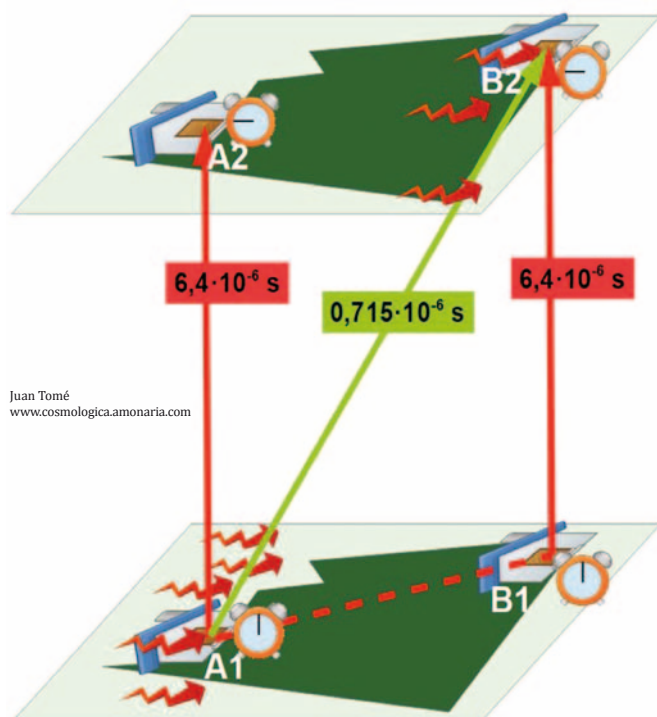
Figura 2

En una versión de este experimento [2] se detectan muones en dos laboratorios, uno en la montaña, el A, y otro casi

al nivel del mar, el B. La Figura 2 representa dos planos de simultaneidad en el SR de los laboratorios, el de encima posterior al de debajo. Como muestra la figura, no todos los muones que pasan por el laboratorio A llegan al B. El 25 % aproximadamente se desintegra espontáneamente por el camino. La vida media de los muones es $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos y el período de semidesintegración de una población es $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos. Como solo el 25 % de los muones que pasan por el laboratorio de la montaña se desintegra antes de llegar al nivel del mar, debe ser porque la duración de su viaje es menor que $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos. Pero si se divide la distancia que recorren los muones por su velocidad, se obtiene que tardarían $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos, los que cuentan los relojes de los laboratorios entre el paso de los muones por el A y la llegada al B. La experiencia es una prueba de la TRE porque la explicación clásica no es posible: nada que viva $2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos puede hacer un viaje que dure $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos.

La explicación relativista habitual se hace en términos de “dilatación temporal”: para observadores de los laboratorios, la vida media de los muones se dilata, se multiplica γ veces, lo que hace posible que los muones puedan así llegar desde un laboratorio al otro.

Desde el punto de vista del universo de procesos, en la experiencia se comparan las duraciones de dos procesos distintos y oblicuos. Uno es el “viaje de muones entre A1 y B2”, que conecta el sitiomomento “detección de muones en el laboratorio A” con el sitiomomento “detección de muones en el laboratorio B”. Ese proceso se representa en la Figura 3 mediante la línea de universo verde A1-B2. El otro proceso es el “laboratorio B entre B1 y B2”, que conecta el sitiomomento B1, simultáneo a “detección de muones en el laboratorio A”, y el sitiomomento “detección de muones en el laboratorio B”. Se representa por la línea de universo roja B1-B2.



Juan Tomé
www.cosmologica.amonaria.com

Figura 3

La duración del proceso “laboratorio B entre B1 y B2”, $\Delta t_{0\ B1-B2}$, la mide el reloj del laboratorio B con el concurso del reloj del A, resultando $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos. La duración del proceso “viaje de muones entre A1 y B2”, $\Delta t_{0\ A1-B2}$, se mide usando el proceso “desintegración de muones” como patrón, como reloj estadístico que da la duración del viaje en términos de la fracción de muones que llega a B. Por ejemplo, tal duración sería $1,5 \cdot 10^{-6}$ segundos si llegara la mitad. Pero en la experiencia real que se está describiendo llegaron a B el 72,47 % de los muones, así que el viaje tuvo que durar menos. Su duración exacta se puede calcular a partir de la ley de la desintegración, $N(t) = N_0 e^{t/\tau}$, porque se conocen $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ segundos, vida media de los muones, y $N(t)/N_0 = 0,7247$, la fracción de muones llegados a B que se determinó experimentalmente. Resulta que el viaje de los muones duró $0,715 \cdot 10^{-6}$ segundos.

La relación (1) queda ahora $\Delta t_{0\ B1-B2} = \gamma \cdot \Delta t_{0\ A1-B2}$, y se interpreta, de nuevo, como una relación entre dos duraciones o dos tiempos propios: uno, el del proceso “viaje de muones entre A1 y B2”; otro, el del proceso “laboratorio B entre B1 y B2”, siendo éste proyección del otro en el SR de los laboratorios. La proyección, $6,4 \cdot 10^{-6}$ segundos, vuelve a ser mayor que lo proyectado, $0,715 \cdot 10^{-6}$ segundos. El factor γ es ahora muy grande, porque los muones alcanzan el 99,2 % de la velocidad de la luz, y la duración del proceso medido en el laboratorio B es casi nueve veces la del viaje de los muones. Esa es la espectacular diferencia entre las duraciones de dos procesos que empiezan y terminan a la vez en el SR de los laboratorios. Y no es una diferencia imaginada, como la del tren y las estaciones. Es experimental, absolutamente real.

La explicación no recurre a dilataciones del tiempo entre tic y tac de relojes en movimiento, que a eso equivaldría hablar de dilatación de la vida media de los muones. La vida media del muon es la duración propia del “proceso muon”, y es absoluta, independiente de movimientos relativos. Como para el reloj del tren y los de las estaciones, la explicación supone que el “reloj muon” mantiene su ritmo.

Comentarios finales

La “dilatación temporal” es un caso particular del fenómeno general de desincronización de relojes, sean reales, como los de las redes TAI o GPS, o imaginados, como los de la paradoja de los gemelos. Explicaciones como las presentadas para los dos casos tratados aquí podrían aplicarse a otros fenómenos de desincronización. Las explicaciones de ese tipo tienen rasgos de los que convendría la discusión crítica para delimitar su posible utilidad en la divulgación o en la introducción de la TRE:

1. Se basan en la consideración de los relojes como procesos patrón que se comparan con otros para medirlos. Al entenderlos así, se reconoce que todas las medidas de reloj, sin excepción, son medidas de duraciones propias de procesos; o si se prefiere el lenguaje más habitual, que todas las medidas de reloj, sin excepción, son medidas de tiempos propios.
2. Se apoyan en la bien conocida analogía entre medidas de tiempos propios a lo largo de líneas de universo y medidas de longitudes a lo largo de caminos en el espacio [3]. Para medir la longitud de un camino se usa una cinta

métrica, un objeto pautado por repeticiones, que debe tenderse a lo largo del camino siguiendo todas sus revueltas; del mismo modo, para medir la duración de un proceso se usa un reloj, un proceso pautado por repeticiones, que debe seguir todas las vicisitudes del proceso.

3. Señalan que la desincronización se produce porque los relojes miden duraciones de procesos distintos, de forma que la explicación de cada caso se fundamenta en la identificación precisa de los procesos implicados y de las líneas de universo que siguen los relojes que se desincronizan.
4. Ponen el foco en el aspecto clave de las desincronizaciones: la asimetría de las líneas de universo de los procesos cuyas duraciones se comparan. En los casos analizados en este artículo, la asimetría es la inherente a la relación de proyección: si en algún SR un segmento de línea de universo es proyección de otro, no existe SR en el que el otro sea proyección del uno. Cuando en el contexto de la TRE se comparan duraciones de procesos que comparten los sitios extremos (caso de la paradoja de los gemelos) la asimetría es muy visual, lo que facilita la explicación básica de esas desincronizaciones. Pero cuando entran en escena el campo gravitatorio y la consecuente curvatura de las regiones del espaciotiempo en las que se trazan las líneas de universo comparadas, la intuición gráfica relativista no basta. La referencia [4] es ilustrativa al respecto.
5. Hacen posible subrayar el carácter absoluto de las desincronizaciones experimentadas, asociado al carácter absoluto de la asimetría. El Principio de Relatividad no resulta contradicho, porque no requiere simetría, sino reciprocidad: si en un SR se observa una desincroniza-

ción absoluta asociada a una asimetría de líneas de universo, desde otro SR se observará la desincronización correspondiente, también absoluta y también asociada a la asimetría de las líneas de universo.

6. Aceptan la proposición, que tiene necesariamente el carácter de hipótesis, de que los relojes, como buenos patrones de medida, deben mantener sus ritmos con independencia de su movimiento o reposo relativos [5]. Lo que se acepta es que no cambia la duración del proceso patrón que repiten, en coherencia con el carácter absoluto de la duración y del tiempo propio, así como con la invariancia del intervalo espaciotemporal. Compatibilizar el mantenimiento del ritmo de los relojes y la realidad de sus desincronizaciones es posible porque al entender que los relojes son procesos patrón, se entiende también que no miden el tiempo relativo abstracto, sino duraciones de procesos concretos. Eso permite que las explicaciones de los fenómenos de desincronización no tengan que referirse a relojes que adelantan o atrasan al medir tiempos que pasan con más o menos rapidez.

Referencias

- [1] A. SAZANOV, *El universo tetradimensional de Minkowski* (Mir, Moscú, 1990, p. 221-226).
- [2] J. SMITH, *Introducción a la relatividad especial* (Reverté, Barcelona 1969, p. 54-57).
- [3] E. TAYLOR y J. WHEELER, *Spacetime Physics-Second Edition* (Freeman, Nueva York, 1992, p. 147-152).
- [4] I. MARTÍ, "La paradoja de los trillizos grávidos", *REF*, 30, 1, 2016, 13-16.
- [5] <http://www.amonaria.com/wordpress/wp-content/uploads/2019/11/Los-relojes-deben-mantener-su-ritmo.pdf>



¿te gusta investigar?

ATI

La solución adecuada a cada instalación

Suministro de equipamiento para investigación

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

info@atisistemas.com

La evaluación de la investigación: España suspende

Alonso Rodríguez-Navarro

1. Introducción

Desde hace décadas, Gobiernos, economistas y empresarios, entre otros, repiten constantemente la importancia que tendría para España cambiar el modelo productivo, incrementando nuestra actividad industrial y tecnológica. Sin embargo, este atractivo proyecto es notablemente complejo. Basta ojear cualquier estudio sobre el tema, por ejemplo el del Círculo de Empresarios¹, para apreciar esa complejidad. Y si se analiza cuidadosamente cómo los sectores competitivos en España han llegado a su buen nivel, por ejemplo, la industria auxiliar del automóvil o la industria cerámica, la conclusión es similar.

La idea anterior conecta con una más global de la economía del conocimiento² que nos lleva directamente a situar a la actividad investigadora en el centro del proyecto. Sería ingenuo pensar que la investigación por sí misma puede cambiar el modelo productivo de un país, pero es razonable pensar que sin una investigación competitiva España va a tener muy difícil cambiar el modelo productivo. Es una condición necesaria aunque no suficiente. Por ejemplo, en el momento de escribir este artículo, el Gobierno hace propaganda sobre la instalación de una planta de baterías eléctricas para la automoción, ignorando nuestro bajo nivel investigador en un área muy dinámica y competitiva como es la de ese sector. Esto nos lleva a una estricta dependencia tecnológica y a que España solo ponga la mano de obra y el solar para los edificios. Esto es mejor que nada, pero conlleva riesgos.

Al margen de la importancia que pueda tener la investigación para cambiar un sistema productivo, hay que destacar que, mientras lo segundo es complejo y dependiente de numerosos factores, alcanzar un buen nivel del sistema público de investigación es mucho más sencillo. Mejorar la investigación en el sector privado es complicado por el reducido tamaño de la mayor parte de las empresas de nuestro tejido industrial, pero para mejorarla en el sector público solo hace falta voluntad política y saber hacerlo. Precisamente por la pequeña dimensión de muchas empresas en el sector privado, la importancia de la mejora de la investigación en el sector público se acrecienta, ya que este sector tiene que actuar como base, como referencia y como catalizador del sector privado.

En resumen, España necesita una investigación pública competitiva y conseguir esto solo depende de la voluntad política y del acierto de quienes se ocupan de ello, como ya se ha dicho, pero teniendo en cuenta que inversión no es sinónimo

de competitividad. El tamaño del sistema sí depende de la inversión y, por ello, la dimensión del sistema entra dentro de la discusión política. Por el contrario, la calidad del sistema no debería ser objeto de discusión. Se podrá discutir si se quiere un sistema con 2.000 o 7.000 investigadores por millón de habitantes, pero no la eficiencia del sistema. Un sistema de investigación que no produce avances del conocimiento no es útil, cualquiera que sea su dimensión.

Un origen frecuente de discusión al hablar de un sistema de investigación es mezclarlo con el de innovación. Las innovaciones pueden ser radicales, basadas en importantes avances del conocimiento que dan origen a un nuevo producto o a un producto muy mejorado, o incrementales, basadas en pequeñas mejoras realizadas en un proceso o sobre un producto³. Las innovaciones radicales dependen directamente de la investigación, pública o privada, pero la dependencia de las innovaciones incrementales de la investigación pública es mucho menor.

Llevar una innovación incremental al mercado es un proceso complejo que depende directamente de las empresas y de su investigación; el papel de la investigación pública en este proceso no es evidente, ya que puede acabar siendo una financiación encubierta que altera las reglas de la competencia. Comparando la magnitud del sector productivo y del sector público de investigación, la actuación del segundo en las innovaciones incrementales, si no está muy bien pensada, solo alcanzará a unas pocas empresas, en perjuicio de las demás.

Por otra parte, analizar la competitividad del sistema español de investigación sin componentes de innovaciones incrementales es más fácil. Solo hay que comparar con la investigación que realizan los países que están a la cabeza del desarrollo tecnológico. De esta forma se excluyen las empresas que producen innovaciones incrementales, cuyo volumen en los países avanzados es abrumadoramente superior al nuestro.

1.1. Ausencia de una estrategia de funcionamiento

España ha tenido dificultades seculares con la investigación que se han producido por la incapacidad de nuestros gobernantes para aplicar una política de investigación razonable. Para documentar esta conclusión solo hay que fijarse en las dos últimas estrategias para la investigación publicadas (Estrategia Española de Ciencia, Tecnología e innovación; EECTI a partir de aquí), las de 2013-2020 y 2021-2027. La falta de

acuerdo de estos dos documentos para determinar la situación de la investigación pública, redactados por dos Gobiernos absolutamente independientes, pone de manifiesto que las raíces del problema son muy profundas.

La falta de acuerdo en la descripción de lo que se tiene es un grave problema en cualquier estrategia de mejora de cualquier sistema productivo. La estrategia tiene que partir de lo que se tiene. Esto incluye a la investigación, aunque su producto, el avance del conocimiento, sea atípico en los sistemas productivos. Si no se sabe de dónde se parte, cabe esperar que tampoco se sepa a dónde hay que llegar. Eso les pasa a las dos EECTI descritas. En la primera, el sistema se describe por la inversión, el número de investigadores y el número de trabajos publicados. Muy sencillo, pero erróneo. Con respecto a los dos primeros parámetros, es evidente que ni la inversión ni el número de trabajadores sirven para definir el comportamiento de ningún sistema productivo. Para la EECTI 2013-2020, los conceptos de rendimiento, eficiencia, eficacia o productividad no existen. Su inexistencia lleva a concluir que poca estrategia puede diseñarse con tan poca base.

Con respecto al número de trabajos publicados, es evidente que este es un dato estadístico, pero absolutamente inútil para analizar el sistema. En cualquier industria, lo importante no es cuántos elementos se producen sino cuántos se venden. Sería difícil encontrar un empresario que cuente solo lo que produce y que viva satisfecho porque produce mucho, aunque no lo venda. En investigación, la pregunta pertinente es con cuánto se ha contribuido al avance global del conocimiento.

Sobre la EECTI 2021-2027, en un trabajo previo⁴ ya he demostrado que contiene graves errores metodológicos que llevan a conclusiones gravemente erróneas. Por ejemplo, concluir que España está ampliamente por encima de la media en las publicaciones que están en el 10 % o 1 % más citas del mundo es un puro error de cálculo matemático. En resumen, en los últimos 20 o 25 años **España no ha tenido estrategia de ningún tipo para mejorar su sistema de investigación.**

1.2. Propósito de este estudio

Atendiendo a lo descrito, el principal propósito de este estudio es **definir la situación de la investigación en España.** Como se ha dicho antes, esta descripción es crucial como base de partida para desarrollar una certera política científica que permita incorporarnos al club de los países que basan su economía en el conocimiento. Este trabajo trata de corregir el desconocimiento de la realidad de la investigación en España y de acercar el conocimiento académico actual a la realidad de la política científica.

Con este propósito, el artículo se divide en tres partes. En la primera parte se describe cómo

se mide la eficiencia de la producción científica; esta descripción se hace con cierto detalle, ya que acertar en esta medida es crucial en el análisis de cualquier sistema de investigación. En la segunda parte, los métodos descritos se aplican a la evaluación de la producción científica española y a la de otros países de nuestro entorno para obtener una evaluación realista de la investigación en España. La evaluación se centra fundamentalmente en las universidades porque los datos más rigurosos son los que publica el Leiden Ranking y, desafortunadamente, el Leiden Ranking solo analiza universidades, con muy pocas excepciones. La tercera parte resume las conclusiones más importantes que se deducen de los resultados.

Por razones de espacio y de conveniencia para el lector, este artículo no trata aspectos tan importantes como la eficiencia en relación con la inversión⁵ o las razones que han motivado la baja competitividad de la investigación en España. Estos son temas de máxima importancia, pero que requieren una metodología de estudio diferente de la que aquí se presenta.

2. Las medidas de la ciencia

2.1. El uso del número de citas

El éxito de un sistema científico radica en su capacidad para hacer descubrimientos que hagan avanzar el conocimiento o que puedan aplicarse a un sistema productivo. En este contexto, el éxito de un sistema científico nada tiene que ver con el número de trabajos publicados, porque un trabajo publicado puede dar origen a un premio Nobel, no aportar nada al conocimiento científico o a cualquier cosa entre estos dos extremos. Para valorar un trabajo científico, una investigación intensa y extensa ha llevado a concluir que el número de citas científicas que recibe correlaciona con su importancia. Hay que resaltar que el término matemático de correlacionar no equivale a medir y que esto produce ciertas restricciones en su uso. Desafortunadamente, en muchas evaluaciones estas restricciones se ignoran.

Un caso cotidiano ilustra este problema. En los lactantes y más allá de la lactancia, el peso de los niños correlaciona con su edad, los niños de más edad pesan más que los más jóvenes. Sin embargo, el peso de un niño no sirve para determinar su edad, ya que podría ser un niño anormalmente grande o anormalmente pequeño. Por el contrario, si pesamos a 100 niños nacidos el mismo día, la media de su peso nos dará con bastante precisión la edad de esa población de niños (es un ejemplo al margen de errores de muestreo o diferencias entre poblaciones).

Con las citas de los trabajos la situación es muy similar. En muchos casos, el número de citas será una medida razonablemente aproximada a la importancia, pero en algunos las desviaciones

pueden ser muy grandes. Siendo riguroso, la evaluación por el número de citas tiene que aplicarse solo en los niveles de agregación que conlleven un alto número de trabajos, como son los casos de la evaluación de países o instituciones.

En el caso de las universidades, el sistema de evaluación del Reino Unido⁶ se realiza por expertos y se ha utilizado para validar inequívocamente los indicadores por percentiles basados en el número de citas que más abajo se describen^{7,8}.

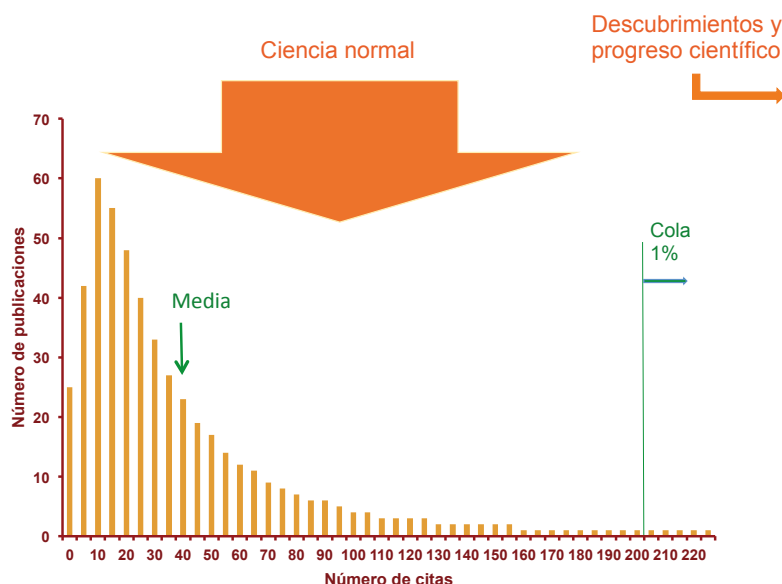
2.2. La probabilidad de hacer un descubrimiento importante

En bibliometría, el número de indicadores propuestos es muy alto, pero pocos se han validado con las evaluaciones por expertos, como se indica en la sección anterior.

Un indicador de tipo matemático es la probabilidad de hacer un descubrimiento que signifique un notable avance del conocimiento o un avance tecnológico importante. Siguiendo la terminología de Thomas Kuhn⁹, las publicaciones pueden ser *revolucionarias* o *normales*. Las primeras son las que corresponden a los descubrimientos importantes y las segundas son las aportaciones que se hacen rutinariamente. El número de las primeras es muy inferior al de las segundas, pero son estas y no las segundas las que nos interesan. Si un país o una institución solo hace *publicaciones normales*, su papel en la ciencia solo será trabajar y aportar datos para que los descubrimientos los hagan otros. Como veremos, este es el caso de España.

Como se ha dicho antes, la importancia de un trabajo correlaciona con el número de citas, de tal manera que, en países e instituciones, la probabilidad de hacer una aportación científica muy importante se puede calcular como la probabilidad de publicar un trabajo muy citado y esta probabilidad podrá calcularse si se conoce la función de distribución de las citas. Hay que notar que en las instituciones y en los países poco desarrollados, la probabilidad de publicar trabajos importantes en un año (o en otro periodo de tiempo) se puede calcular, pero los trabajos anuales muy importantes no se pueden contar porque pueden hacer falta varios años para publicar uno.

La distribución de los trabajos científicos de acuerdo con el número de citas es una función normal logarítmica como la que se presenta en la Figura 1. Hay que destacar que en estas distribuciones la cola de la derecha es larguísima. Al contrario de las distribuciones a las que estamos muy acostumbrados, que son simétricas o casi simétricas con respecto a la media, en una distribución normal logarítmica, la probabilidad de un caso que se aleja 10 o incluso 100 veces de la media es baja, pero no es despreciable. Por poner un ejemplo, si el peso medio de los niños al cumplir un año es de 9-10 kg, la probabilidad de que un niño cogido al azar pese más de 100 kg o más de 1.000 kg es cero



(casi en términos matemáticos). Por el contrario, si la media de citas anuales de los trabajos publicados en una disciplina concreta es 3, la probabilidad de que un trabajo reciba más de 30 citas es baja pero notable y la probabilidad de que reciba más de 300 citas es muy baja, pero, en muchas disciplinas, cada año se publican varios de estos trabajos y son los más importantes.

Los descubrimientos aparecen en esa larga cola de las publicaciones que están a la derecha de la Figura 1, muy lejos del límite de la figura. Por eso se dice que los descubrimientos científicos son *heavy-tailed*: “Science’s heavy tail allows us to expect even greater future discoveries, even if we cannot predict when they will occur or even what fields they will occur in”¹⁰. En español diríamos que la larga cola de la ciencia nos hace esperar grandes descubrimientos, aunque no sepamos predecir cuándo o en que disciplina ocurrirán.

En resumen, lo que define el rendimiento de un sistema científico son las publicaciones muy citadas, cuyo número correlaciona con el número de *descubrimientos*. Conviene tener presente que estas publicaciones no aparecen aisladas de los otros muchos trabajos poco citados: las muy citadas son parte inseparable de la producción total. Su proporción varía con la eficiencia del sistema, pero siempre son muy pocas. Un ejemplo de la variación de esta proporción la tenemos dividiendo el número de publicaciones por el número de premios Nobel recibidos en instituciones o países. En el periodo 1989-2008 en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) esa ratio fue 5.544 trabajos por cada premio Nobel en ciencias, en el conjunto de EE. UU. la ratio fue 42.134, en Suiza fue 81.804 y en el resto de los países con premios Nobel varió entre 100.000 y 180.000¹¹.

Si se quiere conocer la probabilidad de publicar un trabajo muy citado, lo único que hay que hacer es contar las citas recibidas por todos los trabajos

Figura 1. Diagrama representativo de la distribución de citas de los trabajos publicados por una institución o un país. Por ejemplo, trabajos publicados un año y citas en cuatro años posteriores, sin contar el siguiente inmediato. Alrededor del 65-70 % de las publicaciones quedan a la izquierda de la media. La consideración de que el 99 % de las publicaciones es ciencia normal es solo una opción por el tamaño de la figura; probablemente, una proporción aún mayor sería más acertada

publicados en un año determinado, durante un periodo determinado después de su publicación. La distribución de los trabajos se ajusta a una función como la de la Figura 1 y el cálculo de la probabilidad es un problema matemáticamente resuelto hace muchos años¹².

No obstante, el uso del número de citas para evaluar presenta una grave complicación porque las pautas de citas dependen del área de trabajo, por razones bien establecidas que no es necesario detallar aquí; por ejemplo, los trabajos en biología molecular se citan mucho más que los de matemáticas. Incluso dentro de la misma disciplina las diferencias son grandes; por ejemplo, en tecnología, las publicaciones en semiconductores reciben muchas más citas que en metalurgia. Este problema se resuelve normalizando las citas, de tal manera que, después de normalizar, lo que se obtenga tenga el mismo significado en disciplinas diferentes.

De todos los métodos investigados para normalizar, el más robusto y el que actualmente está en uso es el de los percentiles (usado por ejemplo por la National Science Foundation en sus Science and Engineering Indicators). En cada disciplina, se crea una lista mundial de trabajos ordenados por el número de citas, empezando por el más citado. En la lista global, un percentil, por ejemplo el 1 % o el 10 %, incluye los trabajos de esta lista hasta llegar al límite del percentil, siempre empezando por el más citado. Para evaluar a un país o institución se cuentan los trabajos de ese país o institución que están en el grupo del mundo del percentil elegido. El número, sin más cálculos, sería un indicador dependiente del tamaño del sistema, pero si se divide por el número total de trabajos publicados nos daría un indicador independiente de tamaño que nos permitiría comparar sistemas sin tener en cuenta el tamaño. Por ejemplo, en la Universidad de Harvard el 3,3 % de sus trabajos están en el 1 % superior del mundo mientras que en la Universidad de Barcelona, la primera de España, solo el 1,1 % de sus trabajos están en ese percentil. En la mayor parte de las universidades españolas, solo el 0,6-0,7 % de sus trabajos están en el 1 % superior de los trabajos del mundo. Lo que quiere decir que la mayor parte de nuestras universidades no llegan a la media mundial: los tamaños no importan en esta comparación.

Con los datos de los percentiles también se pueden calcular probabilidades. En este caso, en lugar de calcular la probabilidad de que un trabajo tenga más de un número determinado de citas, se calcula la probabilidad de que esté en un percentil determinado. Por ejemplo, que esté en el 1 % o el 0.1 % superior de la lista de las publicaciones mundiales. El procedimiento matemático está publicado¹³ y no hace falta detallarlo aquí.

Haciendo uso de procedimientos analíticos de diversa índole, investigadores del Max Planck en Alemania¹⁴ han calculado que solo el 0,02 % de

las publicaciones alcanzan el nivel de publicaciones que han hecho aportaciones importantes al progreso científico. El nivel de premio Nobel es más exigente, el 0,001 %, aproximadamente. Con esa proporción, si actualmente se publican tres millones de trabajos anuales (Web of Science), solo entre 30 y 90 publicaciones tienen el nivel de premio Nobel. Estas proporciones son sobre la producción global, en áreas específicas las proporciones varían.

2.2. Los listados de Ioannidis

En cualquier disciplina, los avances académicos tardan en llegar a la vida real, pero en política científica parece que nunca llegan. Las EECTI españolas son un ejemplo de cómo los responsables políticos ignoran a los investigadores académicos y evalúan la investigación utilizando aproximaciones e indicadores erróneos, alejados del estado del conocimiento en la materia. Hacer esto conduce inexorablemente a la confusión y a políticas equivocadas. Algo parecido también pasa en otros países europeos¹⁵, pero en menor medida.

Una razón que podría explicar el uso de indicadores inadecuados por los responsables políticos es el rechazo a las matemáticas, aunque sean sencillas. Por el contrario, contar el número de algo que tenga un significado de éxito científico muy claro —podría ser el número de premios Nobel en instituciones muy acreditadas— es más atractivo que calcular probabilidades. Un indicador de este tipo es el número de investigadores muy citados que tiene una institución o un país —las matemáticas solo las tiene que usar el que hace los conteos—, y esos conteos existen y se pueden utilizar.

John Ioannidis (Universidad de Stanford) y colaboradores estudiaron la producción científica de 6,9 millones de investigadores creando un índice compuesto basado en el número de citas de sus trabajos. En 2019 seleccionaron los 100.000 investigadores con un mayor índice y en 2020 lo completaron hasta alcanzar el 2 % en cada disciplina¹⁶. Ya se ha comentado que a niveles bajos de agregación de publicaciones (p. e., autores) los índices bibliométricos pueden fallar, pero si se agregan para una institución o un país los índices bibliométricos son robustos.

En resumen, contando los investigadores que aparecen en las listas de John Ioannidis y colaboradores¹⁶ (*investigadores Ioannidis*) que hay en un país o una institución tendremos una medida muy razonable del nivel de su investigación. Es intuitivo que las instituciones con mayor número de investigadores con éxito serán las que tienen más éxito y el uso de este número para estimar el éxito de una institución tendría que ser fácilmente aceptado por los responsables de la política científica.

El número de *investigadores Ioannidis* correlaciona muy bien con los datos del Leiden Ranking;

y para las universidades españolas, contar el número de *investigadores Ioannidis* tiene algunas ventajas sobre los cálculos de probabilidad realizados a partir de los datos del Leiden Ranking. La razón es que en muchas universidades españolas el número de citas a las publicaciones es bajo y los cálculos de probabilidad partiendo de los datos del Leiden Ranking son menos exactos que los cálculos de Ioannidis, que se basan en periodos más largos.

Cuando se comparan estos dos tipos de datos hay que tener presente que la exigencia para los *investigadores Ioannidis*, aproximadamente el 2 % más acreditado de la población, es muy inferior a la exigencia para las publicaciones que están en el 0,02 % más acreditado.

3. El nivel de la investigación en España

El Leiden Ranking contiene numerosos datos de 41 universidades españolas que satisfacen unos requerimientos mínimos en investigación. Como ya se ha dicho, con estos datos se puede calcular la probabilidad de que una publicación al azar de esas universidades alcance el nivel del 0,02 % más citado, lo que corresponde a un trabajo científico muy importante. Este es un indicador que permite comparar universidades, independientemente del tamaño que tengan, pero que no da idea del número de *descubrimientos* que puede hacer la universidad, porque este último es un indicador dependiente del número de trabajos que se publican. Multiplicando el número total de publicaciones por la probabilidad arriba descrita obtenemos el número esperable de artículos muy importantes.

Con referencia al número de *investigadores Ioannidis*, prácticamente todas las universidades recogidas en el Leiden Ranking tienen investigadores que están en los listados de Ioannidis y solo hay que contarlos para tener un indicador adicional al calculado de los datos del Leiden Ranking, como ya se ha explicado.

La Tabla 1 recoge todos estos datos para las 41 universidades españolas que aparecen en el Leiden Ranking: la probabilidad de que una publicación esté en el 0,02 % más citado, el número de trabajos publicados, el número esperable de trabajos que alcanzarían el percentil 0.02 y el número de *investigadores Ioannidis*.

Como esos indicadores son difíciles de interpretar en términos absolutos, la Tabla 2 recoge los mismos indicadores de la Tabla 1 para universidades fuera de España; en general, las dos universidades más conocidas de cada país. En primer lugar están dos países, Australia y Canadá, cuyos PIB son similares al de España. Luego se incluyen siete países europeos con diversos niveles en investigación¹⁵. También se incluyen dos universidades de EE. UU. de gran prestigio, la Universidad de Harvard y el MIT. Finalmente, considerando la popularidad del estado de California en tecnolo-

Tabla1. Actividad investigadora de las universidades españolas que aparecen en el Leiden Ranking: probabilidad de publicar un trabajo que se encuentre en el 0,02 % más citado de los trabajos publicados en el mundo, número de publicaciones, número de publicaciones en el percentil 0,02 (avances) y número de investigadores Ioannidis

Universidad	Probabilidad 0,02 (× 1.000)	Número de Publicaciones	Número de avances	Número Ioannidis
Barcelona	0,28	6.015	1,71	140
Complutense de Madrid	0,08	5.154	0,42	78
Autónoma de Barcelona	0,17	5.102	0,86	70
Politécnica de Cataluña	0,11	3.401	0,37	68
Valencia	0,12	4.668	0,56	64
Zaragoza	0,06	3.186	0,20	55
País Vasco	0,15	3.945	0,60	51
Granada	0,16	4.380	0,71	49
Autónoma de Madrid	0,24	3.885	0,92	47
Politécnica de Valencia	0,13	3.776	0,50	46
Sevilla	0,10	4.124	0,41	46
Santiago de Compostela	0,10	2.826	0,28	39
Pompeu Fabra	0,50	1.355	0,68	34
Oviedo	0,07	2.491	0,17	29
Alicante	0,04	1.710	0,06	28
Murcia	0,09	2.115	0,19	27
Politécnica de Madrid	0,10	3.123	0,33	25
Extremadura	0,05	1.349	0,07	23
Salamanca	0,08	1.614	0,13	21
Vigo	0,08	1.841	0,14	20
Alcalá	0,08	1.239	0,09	19
Córdoba	0,09	1.650	0,15	19
Gerona	0,37	1.149	0,42	18
Málaga	0,10	1.925	0,19	18
Islas Baleares	0,32	1.137	0,37	18
Castilla-La Mancha	0,06	2.055	0,12	17
Valladolid	0,04	1.574	0,07	16
Rovira i Virgili	0,21	1.608	0,33	14
Lérida	0,19	838	0,16	14
Carlos III de Madrid	0,12	1.560	0,18	13
Cantabria	0,13	1.203	0,16	13
Navarra	0,34	1.255	0,43	13
Almería	0,05	888	0,04	10
Rey Juan Carlos	0,16	1.013	0,16	9
Miguel Hernández	0,09	1.068	0,10	8
Jaume I	0,10	1.216	0,12	8
La Laguna	0,06	1.179	0,07	7
Las Palmas de Gran Canaria	0,03	929	0,02	7
La Coruña	0,09	1.194	0,10	6
Cádiz	0,05	1.095	0,06	5
Jaén	0,04	996	0,04	3
Total			12,72	1215

Los valores de las probabilidades se han calculado a partir de los datos del Leiden Ranking 2020 (conteo fraccionario; periodo 2015-2018) con el procedimiento descrito en A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO, "Probability and Expected Frequency of Breakthroughs: Basis and Use of a Robust Method of Research Assessment", *Scientometrics* 119: 213-235, 2019.

Los números de investigadores Ioannidis se han obtenido de la publicación J. P. IOANNIDIS, K. W. BOYACK y J. BAAS, "Updated Science-wide Author Databases of Standardized Citation Indicators", *PLoS Biol* 18(10):e3000918, 2020.

Tabla 2. Actividad investigadora de algunas universidades no españolas: probabilidad de publicar un trabajo que se encuentre en el 0,02 % más citado de los trabajos publicados en el mundo, número de publicaciones, número esperable de publicaciones en el percentil 0,02 (avances) y número de investigadores loannidis

Universidad	País	Probabilidad 0,02 ($\times 1,000$)	Número de publicaciones	Número de avances	Número loannidis
University of Queensland	Australia	0,59	12.316	7,23	393
University of Sydney	Australia	0,56	12.604	7,05	421
University of Toronto	Canada	0,69	22.995	15,7	933
University of British Columbia	Canada	0,59	12.988	7,65	687
Ludwig-Maximilians-Universität München	Alemania	0,57	7.409	4,19	229
University of Freiburg	Alemania	0,32	4.923	1,59	193
Karolinska Institutet	Suecia	0,51	8.324	4,28	287
Lund University	Suecia	0,30	8.181	2,44	258
Sorbonne University	Francia	0,43	8.767	3,80	254
Université Paris-Saclay	Francia	0,46	8.235	3,76	214
University of Padova	Italia	0,24	7.678	1,83	214
University of Bologna	Italia	0,21	7.271	1,51	190
Utrecht University	Países Bajos	1,04	9.391	9,81	196
University of Amsterdam	Países Bajos	0,95	9.081	8,66	209
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich	Suiza	1,88	9.342	17,6	406
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	Suiza	1,85	5.506	10,1	233
University of Cambridge	Reino Unido	1,90	13.485	25,6	605
University of Oxford	Reino Unido	2,00	15.353	30,7	801
Harvard University	EE. UU.	3,42	33.722	115,3	1.510
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	EE. UU.	5,48	10.563	57,9	619
University of California, Berkeley	EE. UU.	3,31	10.671	35,2	734
University of California, San Francisco	EE. UU.	2,21	9.994	22,1	686
University of California, Los Angeles	EE. UU.	1,29	13.645	17,5	634
University of California, San Diego	EE. UU.	1,71	12.135	20,7	474

Los valores de las probabilidades se han calculado a partir de los datos del Leiden Ranking 2020 (conteo fraccionario; period 2015-2018) con el procedimiento descrito en A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO, "Probability and Expected Frequency of Breakthroughs: Basis and Use of a Robust Method of Research Assessment", *Scientometrics* 119: 213-235, 2019.

Los números de investigadores loannidis se han obtenido de la publicación J. P. AIOANNIDIS y K. W. BOYACK, "Updated Science-wide Author Databases of Standardized Citation Indicators", *PLoS Biol* 18(10):e3000918, 2020.

gías avanzadas, se incluyen cuatro campus de la Universidad de California: Berkeley, San Francisco, Los Ángeles y San Diego.

Atendiendo a las publicaciones muy importantes, está claro que las universidades españolas quedan bastante por detrás de las universidades de los países europeos menos competitivos y muy por detrás de los países europeos más competitivos: Países Bajos, Suiza y Reino Unido. Por ejemplo, fijándonos en los datos correspondientes al periodo 2015-2018, el conjunto de todas las universidades españolas habrá producido 13 avances científicos importantes, que es **la mitad de lo que corresponde a la Universidad de Cambridge, cuatro veces menos que el MIT y nueve veces menos que la Universidad de Harvard.**

Atendiendo al número de *investigadores loannidis*, los resultados son similares. En el conjunto de las universidades españolas hay 1.215, que es solo el doble de los que se cuentan en la Universidad de Cambridge y menos que los que hay en la Universidad de Harvard. Ya se ha explicado que el nivel de los *investigadores loannidis* corresponde al 2 % superior y que las diferencias son menores que las que se aprecian en los trabajos esperables en el percentil 0,02 % superior, que corresponde a los descubrimientos importantes.

El número de *investigadores loannidis* en las universidades españolas es aproximadamente la mitad del total de España, donde hay 2.291. En el CSIC hay 393 *investigadores loannidis*, que son bastantes menos de los que hay en muchas uni-

Tabla 3. Número de investigadores loannidis en España y en otros países seleccionados y ratio de investigadores loannidis por millón de habitantes

País	Número loannidis	Habitantes (millones)	Ratio
Suiza	2.545	8,6	296
Dinamarca	1.494	5,8	258
Suecia	2.545	10,3	247
Reino Unido	15.002	64	234
Australia	5.440	25	218
EE. UU.	68.015	328,2	207
Países Bajos	3.352	17	197
Canadá	7.224	37,6	192
Nueva Zelanda	802	5	160
Bélgica	1.411	11,4	124
Austria	961	8,9	108
Alemania	8.791	83	106
Francia	5.011	67	75
Italia	4.006	60	67
Grecia	647	10,7	60
España	2.291	47	49
Portugal	384	10,3	37

Los números de investigadores loannidis se han obtenido de la publicación J. P. AIOANNIDIS, K. W. BOYACK y J. BAAS, "Updated Science-wide Author Databases of Standardized Citation Indicators", *PLoS Biol* 18(10):e3000918, 2020.

versidades europeas (Tabla 2) que, además, tienen una docencia muy activa.

Una idea clara de la situación de España en su conjunto se puede obtener contando el número de *investigadores loannidis* y dividiendo por el número de habitantes (Tabla 3). En España tenemos 49 investigadores por millón de habitantes mientras que los países avanzados tienen alrededor de 200. Estamos a la cola de Europa, mejor que Portugal, pero peor que Grecia.

4. Evolución de la investigación en las universidades españolas

El crecimiento del número de publicaciones en España entre 1990 y 2005 fue espectacular¹⁷, pero no hay constancia de ningún tipo de mejora en la probabilidad de producir avances. En los últimos años, a pesar de los recortes de financiación, la producción ha seguido aumentando, pero la calidad no ha mejorado.

En la Tabla 4 se han incluido dos periodos de cálculos del Leiden Ranking: 2006-2009, el primero, y 2015-2018, el último. Atendiendo al número de publicaciones, todas las universidades están en ascenso. Pero si atendemos a la probabilidad de publicar un trabajo en el 0,02 % más citado, el

cambio es muy variable. Atendiendo al conjunto, el progreso ha sido muy pequeño, de $0,13 \cdot 10^{-3}$ a $0,14 \cdot 10^{-3}$. Pero, más importante, el progreso desaparece si se eliminan tres universidades: Barcelona, Autónoma de Barcelona y Autónoma de Madrid (eliminándolas, la probabilidad es $0,12 \cdot 10^{-3}$ en los dos periodos).

5. Las universidades tecnológicas

Muchas tecnologías requieren una investigación muy activa. En algunas tecnologías (por ejemplo automoción) las innovaciones son fundamentalmente incrementales, pero en muchas tecnologías modernas las innovaciones son revolucionarias. Por ejemplo, en el caso arriba mencionado de las baterías eléctricas, la investigación ha permitido avances espectaculares tanto en la capacidad como en la rapidez de la carga y esto ha tenido lugar a partir de innovaciones revolucionarias (los premios Nobel de Química en 2019 son un ejemplo). Estas consideraciones llevan de nuevo a preguntarse cuál es la situación de la investigación en tecnología en España.

Un problema que aparece cuando se utilizan análisis para toda la ciencia en general, como en las Tablas 1 y 2, es la falta de especificidad en áreas tecnológicas. Las universidades no cubren todas las áreas del conocimiento con igual intensidad y la normalización matemática de los índices no alcanza a normalizar la singularidad de las áreas de conocimiento con respecto a las citas (por ejemplo, en algunas áreas se publica más en libros que en artículos de revista, pero solo en estos últimos es fácil seguir las citas). Una forma de centrarse más en la tecnología y homogeneizar el espectro de áreas cubiertas por las universidades es centrarse en las universidades que se declaran técnicas o politécnicas. Además, en estas universidades no existen muchas de las áreas que se evalúan mal por el número de citas.

En la Tabla 1 aparecen tres universidades de este tipo en España: Politécnica de Cataluña, Politécnica de Valencia y Politécnica de Madrid. Si nos fijamos en el número esperable de artículos muy importantes ("avances" en la Tabla 1), estas tres universidades representan el nivel medio en España. En todo el mundo, también en Europa, hay universidades que se declaran técnicas o politécnicas y que están más enfocadas a la docencia que a la investigación. Este no es el caso de las tres universidades politécnicas españolas mencionadas y lo lógico es compararlas con universidades técnicas y politécnicas que se declaren instituciones de investigación en otros países.

La Tabla 5 compara las tres universidades españolas con cuatro universidades europeas de referencia y con el MIT. Los datos son elocuentes, las universidades españolas tendrían que trabajar cien veces más tiempo que el MIT para producir el mismo avance del conocimiento. Incluso en el

Tabla 4. Evolución de la actividad investigadora de las universidades españolas: probabilidad de publicar un trabajo que se encuentre en el 0,02 % más citado de los trabajos publicados en el mundo, número de publicaciones y número esperable de trabajos en el 0,02 % más citado (avances)

Universidad	Probabilidad 0,02 % (× 1.000)		Número de publicaciones		Número de avances	
	2006-2009	2015-2018	2006-2009	2015-2018	2006-2009	2015-2018
Barcelona	0,20	0,28	5.148	6.015	1,04	1,71
Complutense de Madrid	0,09	0,08	4.371	5.154	0,39	0,42
Autónoma de Barcelona	0,15	0,17	3.848	5.102	0,57	0,86
Politécnica de Cataluña	0,13	0,11	2.528	3.401	0,33	0,37
Valencia	0,11	0,12	3.482	4.668	0,37	0,56
Zaragoza	0,16	0,06	2.506	3.186	0,39	0,20
País Vasco	0,11	0,15	2.438	3.945	0,26	0,60
Granada	0,10	0,16	2.900	4.380	0,28	0,71
Autónoma de Madrid	0,21	0,24	3.314	3.885	0,68	0,92
Politécnica de Valencia	0,17	0,13	2.441	3.776	0,42	0,50
Sevilla	0,12	0,10	2.611	4.124	0,32	0,41
Santiago de Compostela	0,15	0,10	2.670	2.826	0,40	0,28
Pompeu Fabra	0,48	0,50	668	1.355	0,32	0,68
Oviedo	0,06	0,07	1.967	2.491	0,12	0,17
Alicante	0,33	0,04	1.225	1.710	0,40	0,06
Murcia	0,05	0,09	1.737	2.115	0,08	0,19
Politécnica de Madrid	0,04	0,10	1.801	3.123	0,07	0,33
Extremadura	0,06	0,05	1.115	1.349	0,07	0,07
Salamanca	0,04	0,08	1.471	1.614	0,05	0,13
Vigo	0,14	0,08	1.516	1.841	0,22	0,14
Alcalá	0,07	0,08	916	1.239	0,06	0,09
Córdoba	0,13	0,09	1.202	1.650	0,16	0,15
Gerona	0,27	0,37	688	1.149	0,18	0,42
Málaga	0,04	0,10	1.187	1.925	0,05	0,19
Islas Baleares	0,33	0,32	794	1.137	0,26	0,37
Castilla-La Mancha	0,12	0,06	1.393	2.055	0,17	0,12
Valladolid	0,06	0,04	1.200	1.574	0,07	0,07
Rovira i Virgili	0,26	0,21	1.163	1.608	0,31	0,33
Lérida	0,10	0,19	516	838	0,05	0,16
Carlos III de Madrid	0,14	0,12	909	1.560	0,13	0,18
Cantabria	0,07	0,13	962	1.203	0,07	0,16
Navarra	0,05	0,34	1.201	1.255	0,06	0,43
Almería	0,12	0,05	562	888	0,07	0,04
Rey Juan Carlos	0,16	0,16	644	1.013	0,10	0,16
Miguel Hernández	0,09	0,09	722	1.068	0,06	0,10
Jaume I	0,15	0,10	636	1.216	0,09	0,12
La Laguna	0,02	0,06	1.042	1.179	0,02	0,07
Las Palmas de Gran Canaria	0,03	0,03	521	929	0,01	0,02
La Coruña	0,03	0,09	714	1.194	0,02	0,10
Cádiz	0,07	0,05	633	1.095	0,04	0,06
Jaén	0,03	0,04	611	996	0,02	0,04
Total			67.972	92.830	8,80	12,72
Media	0,13	0,14				

Los valores de las probabilidades se han calculado a partir de los datos del Leiden Ranking 2020 (conteos fraccionarios) con el procedimiento descrito en A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO, "Probability and Expected Frequency of Breakthroughs: Basis and Use of a Robust Method of Research Assessment", *Scientometrics* 119: 213-235, 2019.

Tabla 5. Actividad investigadora en universidades técnicas y politécnicas: número de publicaciones, probabilidad de publicar un trabajo que se encuentre en el 0,02 % más citado de los trabajos publicados en el mundo, número de trabajos en este percentil (avances) y número de investigadores Ioannidis

Universidad	Número de publicaciones	Prob. 0.02 % ($\times 1.000$)	Número de avances	Número Ioannidis
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	10.573	5,49	57,99	619
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich	9.342	1,88	17,60	406
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	5.506	1,85	10,16	233
Technical University of Denmark	5.860	0,56	3,29	246
Technical University of Munich	8.142	0,43	3,48	174
Universidad Politécnica de Cataluña	3.401	0,11	0,37	68
Universidad Politécnica de Valencia	3.776	0,13	0,50	46
Universidad Politécnica de Madrid	3.123	0,11	0,33	25

Los valores de las probabilidades se han calculado a partir de los datos del *Leiden Ranking* 2020 (conteo fraccionario; period 2015-2018) con el procedimiento descrito en A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO (2019). "Probability and Expected Frequency of Breakthroughs: Basis and Use of a Robust Method of Research Assessment", *Scientometrics* 119: 213-235.

Los números de los investigadores Ioannidis se han obtenido de la publicación J. P. AIOANNIDIS, K. W. BOYACK y J. BAAS, "Updated Science-wide Author Databases of Standardized Citation Indicators", *PLoS Biol* 18(10):e3000918, 2020.

caso de universidades de menor éxito científico, como son las Universidades Técnicas de Múnich y Dinamarca, las diferencias son de uno a diez, aproximadamente. Las diferencias en el número de *investigadores Ioannidis* no son tan acusadas porque este es un indicador menos exigente. Si comparamos, por ejemplo, la Technical University of Denmark y la Universidad Politécnica de Madrid, llegamos a la conclusión de que la inversión en la segunda tendría que ser diez veces superior para producir los mismos avances del conocimiento que la primera.

Estos resultados indican el bajo nivel de la investigación tecnológica en España, en concordancia con lo ya descrito.

6. Resumen y conclusiones

1. Las Tablas 1 y 2 describen con claridad una baja competitividad de la investigación en las universidades españolas; la Tabla 3 describe la situación en el nivel global del país y la Tabla 5 la situación en las universidades tecnológicas. Del análisis de los datos presentados en esas tablas solo cabe una conclusión: **el éxito de la investigación en España es muy bajo y no existen paliativos para esta conclusión**. Lamentablemente, la producción científica española, a menudo formalmente rigurosa, es ciencia normal que solo sirve para que otros hagan los avances científicos.
2. Los datos que llevan a la conclusión anterior se han obtenido utilizando fuentes radicalmente diferentes, porque los métodos de conteo y cálculo del Leiden Ranking y los de John Ioannidis y colaboradores son radicalmente diferentes. Incluso las bases de datos son diferentes: el Leiden Ranking utiliza la Web of Science y John Ioannidis utiliza Scopus. Así y todo, los re-

sultados son totalmente coherentes, teniendo en cuenta que el éxito en las listas de Ioannidis está en el 2 % superior y los cálculos de probabilidades basados en el Leiden Ranking se sitúan en el 0,02 % superior. Hay que destacar que el método basado en los datos del Leiden Ranking están validados con las revisiones por expertos^{6,7}, lo que quiere decir que lo que se deduce las Tablas 1 y 2 es lo que se obtendría en una evaluación por expertos.

3. Es un hecho demostrado que países como Alemania, Francia e Italia tienen una investigación científica poco competitiva y que la Unión Europea ha fracasado en sus políticas científicas¹⁵. Pero el caso de España es mucho peor. Aunque en su conjunto la investigación en Francia y Alemania está por debajo de las expectativas, su larga historia de **potencias** científicas les permite mantener núcleos muy **fuertes** que consiguen premios Nobel con cierta frecuencia. Además, su industria es muy **potente**, lo que conlleva un gran volumen de innovación incremental. Conviene tener presente que mucho del progreso que observamos en la tecnología que usamos en la vida cotidiana responde a innovaciones incrementales.
4. En España no tenemos una larga historia de éxitos científicos ni una industria potente que nos asegure progreso tecnológico con independencia de la investigación pública. Por eso, España necesita optimizar un sistema de investigación empezando desde valores muy bajos, como están haciendo China, Taiwán, Singapur y otros países asiáticos. Más arriba he descrito que "fijándonos en los datos correspondientes al periodo 2015-2018, el conjunto de todas las universidades españolas habrá producido 13 avances científicos

importantes, **que es la mitad de lo que corresponde a la Universidad de Cambridge, cuatro veces menos que el MIT y nueve veces menos que la Universidad de Harvard**”.

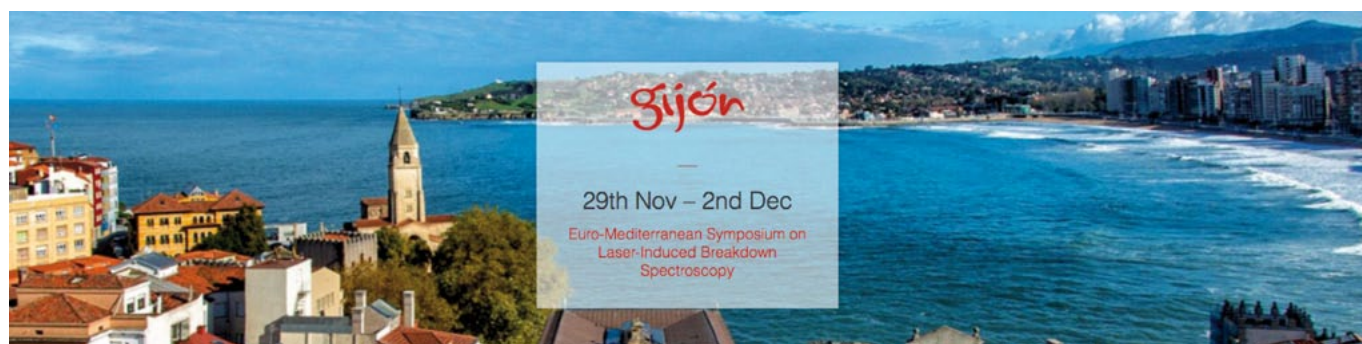
5. En estas circunstancias, si quisiéramos igualarnos con Canadá, Australia o Países Bajos en descubrimientos por millón de habitantes (Tabla 3), tendríamos que invertir alrededor del 10 % del PIB en investigación. Algo que es obviamente imposible. **Sin mejorar la eficiencia de nuestra investigación, España nunca se incorporará al club de los países tecnológicamente avanzados. En términos económicos probablemente se llegaría a concluir que, lamentablemente, la mejor solución para España sería externalizar la investigación, algo absolutamente impensable.**

Referencias

- [1] CÍRCULO DE EMPRESARIOS, *Transformación del Modelo Productivo Español*. 14 prioridades, 2020 [https://circulodeempresarios.org/app/uploads/2020/07/Transformacio%CC%81n-Modelo-Productivo_vfdigital_22Jun20-comprimido.pdf] (accedido en marzo de 2021).
- [2] WIKIPEDIA, “Economía del conocimiento” [https://es.wikipedia.org/wiki/Economia_del_conocimiento]; más extenso en “Knowledge economy” [https://en.wikipedia.org/wiki/Knowledge_economy].
- [3] J. E. ETTLIE, W. P. BRIDGES y R. D. O’KEEFE, “Organization Strategy and Structural Differences for Radical versus Incremental Innovation”, *Management Science* 30: 682-695, 1984.
- [4] A. RODRÍGUEZ NAVARRO, “Errores en una estrategia para estimular la I+D en España”, *Nada es Gratis*, 2021 [https://nadaesgratis.es/admin/errores-en-una-estrategia-para-estimular-la-id-en-espana].
- [5] U. SANDSTRÖM y P. VAN DER BESSELAAR, “Funding, Evaluation, and the Performance of National Research Systems” *Journal of Informetrics* 12: 365-384, 2018.
- [6] WIKIPEDIA, “Research Excellence Framework” [https://en.wikipedia.org/wiki/Research_Excellence_Framework].
- [7] V. A. TRAAG y L. WALTMAN, “Systematic Analysis of Agreement Between Metrics and Peer Review in the UK REF”, *Palgrave Communications*, 5, 29, 2019.
- [8] A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO, “Like-for-like Bibliometric Substitutes for Peer Review: Advantages and Limits of Indicators Calculated from the ep Index”, *Research Evaluation*, 29, 215-230, 2020.
- [9] WIKIPEDIA, “Cambio de paradigma”, [https://es.wikipedia.org/wiki/Cambio_de_paradigma].
- [10] W. H. PRESS, “What’s So Special About Science (and How Much Should We Spent on it?)” *Science* 342: 817-822. p. 822, 2013.
- [11] A. RODRÍGUEZ-NAVARRO, “Measuring Research Excellence. Number of Nobel Prize Achievements versus Conventional Bibliometric Indicators” *Journal of Documentation* 67: 582-600, 2010.
- [12] Por ejemplo: *Logarithmic normal distribution Calculator* [https://keisan.casio.com/exec/system/1180573214] (comprobado el 2 de abril de 2021).
- [13] A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y B. BRITO, “Probability and Expected Frequency of Breakthroughs: Basis and Use of a Robust Method of Research Assessment”, *Scientometrics* 119: 213-235, 2019.
- [14] L. BORNMANN, A. Ye y F. Ye, “Identifying Landmark Publications in the Long Run Using Field-Normalized Citation Data”, *Journal of Documentation* 74: 278-288, 2017.
- [15] A. RODRÍGUEZ-NAVARRO y R. BRITO, “Might Europe One Day Again Be a Global Scientific Powerhouse? Analysis of ERC Publications Suggests it Will Not Be Possible Without Changes in Research Policy”, *Quantitative Science Studies* 1: 872-893, 2020.
- [16] J. P. A. IOANNIDIS, K. W. BOYACK y J. BAAS, “Updated Science-Wide Author Database of Standardized Citation Indicators”, *PLoS Biol* 18(10): e3000918, 2020.
- [17] C. OSUNA, L. CRUZ-CASTRO y L. SANZ-MENÉNDEZ, “Overturning Some Assumptions about the Effects of Evaluation Systems on Publication Performance”, *Scientometrics* 86: 575-592, 2011.

Alonso Rodríguez-Navarro

Dpto. de Biotecnología-Biología Vegetal, UPM
Dpto. de Estructura de la Materia, Física Térmica y Electrónica, UCM
Ex-Coord. Gral. de la CNEAI



<https://emslibs2021spain.com/>



Mi clásico favorito

Recordando a Stephen Hawking

por Emilio Elizalde*

Stephen Hawking, cosmólogo, viajero espacial y héroe —según constaba en su página *web*— fue uno de esos escasísimos físicos conocidos por todo el mundo. Quiero aquí recordarlo, como científico y como persona, contando ya de paso algunas de mis vivencias. Como cuando, siendo yo aún estudiante de doctorado, supe de él por uno de sus grandes descubrimientos; o cuando un día tuve el grato placer de comer a su lado.

El día en que murió Stephen Hawking (8/1/1942-14/3/2018) —de ello hace ya más de tres años— me invadió la tristeza. A menudo he recordado, durante el tiempo transcurrido, las diversas ocasiones en que coincidí con él, algunas aderezadas con anécdotas curiosas. Y cada curso le he venido dedicando un seminario, en que he repasado los diversos aspectos de su tan importante legado como científico [1]. Todo ello lo resumo aquí.

Mi primer “encuentro” con Hawking

Mi primer encuentro con Hawking fue de hecho un encuentro virtual. Eso no representaría ahora ninguna novedad, más bien al contrario, ya que hoy día son virtuales, si no todos, la mayoría de los seminarios y conferencias que se imparten por todas partes y a cualquier nivel. Pero estoy hablando del año 1975. Yo estaba por entonces intentando completar mi trabajo de tesis doctoral, que defendí con éxito al año siguiente. Y, como estudiante ya avanzado de postgrado, el Departamento de Física Teórica de la Universidad de Barcelona había accedido a financiar mi participación en la que iba a ser mi primera gran escuela internacional, de dos semanas de duración: las XIV Internationale Universitätswochen für Kernphysik [2]. Tenía lugar en Schladming, bellísima localidad de los Alpes

austriacos, cada par de años, siempre hacia finales del invierno. Llegué allí tras un accidentado viaje en automóvil, pero que a la postre resultó magnífico. Ocurrió que tuvimos que hacer dos noches por el camino, por diversos problemas que sufrimos con el vehículo que habíamos alquilado. Viajaba con un par de colegas de Barcelona, de más edad que yo, y nos lo tomamos con calma, bordeando los espectaculares lagos del norte de Italia y atravesando luego los numerosos túneles que hay bajo el paso del Brennero [3].

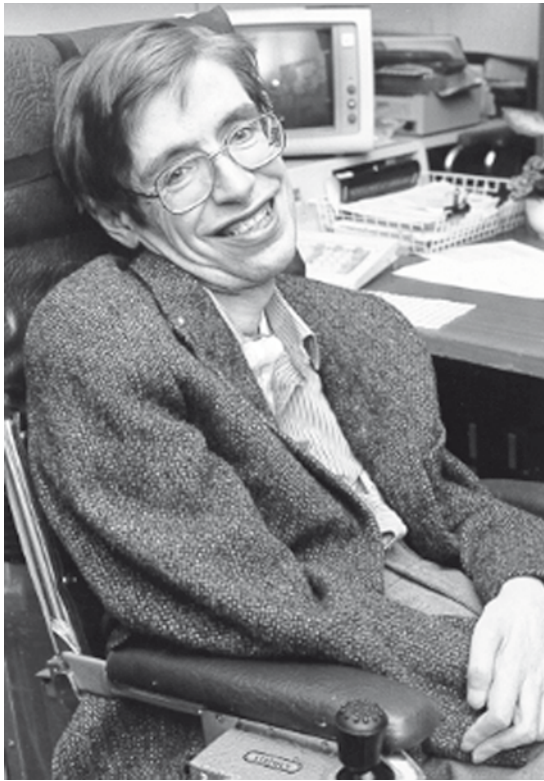
No podíamos siquiera imaginar que nos estaba aguardando una conferencia tan extraordinaria; aunque, de hecho, yo en aquellos momentos entendí más bien poco de lo que nos fueron contando todo aquel elenco de ponentes excepcionales. Julian Schwinger, importantísimo premio Nobel de Física, era la máxima estrella, pero también había otros *speakers* de gran categoría. Schwinger había obtenido el Premio diez años atrás, en 1965, compartido con Richard Feynmann y Sin-Itiro Tomonaga, por la cuantización de la electrodinámica. Ahí es nada. Aquello fue el origen de desarrollos importantísimos de la Física. En palabras de Freeman Dyson, la nueva teoría había aportado orden y armonía al dominio de las fuerzas fundamentales intermedias de la naturaleza, quedando fuera ya, tan sólo, la gravitación y las fuerzas nucleares. La manera de Schwinger de atacar el problema era, sin embargo, muy distinta a la de Feynmann, que utilizaba

sus famosos diagramas. Schwinger lo hacía mediante prolongaciones analíticas, una herramienta de gran elegancia matemática que yo mismo usaría más adelante, durante buena parte de mi vida como científico, en el contexto de la famosa función zeta. Pero, en aquellos momentos, yo de todos estos temas aún sabía bastante poco.

Recuerdo que por las noches Schwinger jugaba con nosotros, los más jóvenes, a los bolos austriacos, mucho más pequeños que los de los juegos de bolera ordinarios. Tiraba muy mal y rara vez acertaba; sin embargo, continuaba jugando entusiasmado. Pero —y ahora viene lo del encuentro “virtual”— todos los conferenciantes, incluyendo al propio Schwinger, quedaron eclipsados durante la conferencia por unos resultados que había obtenido Hawking hacía poco, y que iban de boca en boca. Todavía no habían sido publicados, pero todo el mundo hablaba de ellos: en los descansos fuera de las sesiones, a la hora de comer y por las noches. Hawking no estaba presente en Schladming, y a lo que parecía su trabajo era todavía una versión preliminar, lo que denominamos un *preprint* [4]. Y ese era el que tomaban como referencia en sus discusiones los participantes en la Conferencia. El artículo de Hawking fue posteriormente publicado en la prestigiosa revista *Communications in Mathematical Physics* [5]. Puedo asegurar que la emoción que generaban aquellos resultados era fuertemente contagiosa, incluso para mí, que no entendía en detalle de qué iba

* Profesor de Investigación *Ad Honorem*. Instituto de Ciencias del Espacio, ICE-CSIC. Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, IEEC.

Figura 1. Imagen de Stephen Hawking, elegido miembro de la Royal Society en 1974. (Cortesía de NASA StarChild. Dominio público).



aquello. Como ya he dicho, el interés crecía cada día que pasaba, en los corrillos que se formaban a todas horas. Yo quedé muy sorprendido por aquella situación, que he recordado siempre —vuelvo a repetir que se trataba de mi primera conferencia internacional, fuera de casa.

Un artículo de fama merecida

No fue sino más tarde cuando al fin pude comprender que todo aquel interés y expectación que había vivido en Schlading estaban más que justificados: ¿Cómo demonios era posible que un agujero negro fuese capaz de emitir energía? Y también supe luego que algunos colegas más veteranos se habían esforzado mucho, al principio, para probar que tal cosa no podía suceder, de ninguna manera; para demostrar la falsedad de aquella maravillosa expresión universal que Hawking había encontrado para la temperatura, $T_{BH} = \hbar c^3 / 8\pi k G M$, a la que todo agujero negro radía como si se tratase de un cuerpo negro perfecto. Una fórmula sublime, exquisita, que combina de una manera extremadamente sencilla y precisa las más importantes constantes fundamentales de la naturaleza: la constante de Planck, \hbar (de la física cuántica), la velocidad de la luz, c (física relativista), la constante de Boltzmann, k (de la termodinámica), la constante de la gravitación universal, G (física clásica o newtoniana), y el número π (representando a la matemática). Y haciendo que, en definitiva, la temperatura del agujero negro, T_{BH} , dependa tan sólo de su masa, M , de manera inversamente proporcional. ¡Qué maravilla!

En poco tiempo, incluso los críticos más feroces tuvieron que admitir que la fórmula era del todo

correcta, que no le faltaba ni le sobraba nada (ahora hay ya media docena de demostraciones rigurosas de ella, por caminos completamente distintos). Y que, además, abría un nuevo campo, inmenso, de investigación, hasta entonces aún inexplorado, a caballo entre la Relatividad General y la Física Cuántica.

No es de extrañar que aquel artículo de Hawking tenga ahora un número récord de cerca de trece mil citas, lo que es muy excepcional para un trabajo de carácter tan marcadamente matemático.

Uno de los primeros en reconocer, en todo su significado, la extraordinaria importancia del resultado de Hawking fue Paul Davies, que lo extendió a una situación distinta, pero más común y general, si cabe. Davies trabajó también sobre la versión en forma de *preprint*, la misma que ya he mencionado y de que disponían los participantes de Schlading, por las mismas fechas, tal como queda reflejado en la lista de referencias de su trabajo [6]. Un procedimiento análogo al que había sido utilizado por Hawking [5] para demostrar la creación de partículas por agujeros negros, fue aplicado por Davies, directamente, al sistema de coordenadas de Rindler para un espacio-tiempo plano. El resultado fue que un observador sometido a una aceleración uniforme, κ , vería aparentemente a una superficie fija irradiar a una temperatura de $\kappa/2\pi$. En términos sencillos, y desde nuestra presente perspectiva, se puede decir que, mientras el hallazgo de Hawking abrió el camino al concepto de *termodinámica de los agujeros negros*, Davies extendió esta noción a lo que luego se ha denominado la *termodinámica del espacio-tiempo*.

En otro artículo muy influyente, publicado un año más tarde, William Unruh sustituyó el agujero negro por condiciones de frontera específicas en el horizonte pasado del espacio-tiempo; y demostró que, cuando se aceleraba el detector, incluso en un espacio-tiempo plano, se detectarían partículas que habrían sido creadas por el vacío cuántico [7]. De este modo, fue en realidad Unruh quien estableció una conexión enormemente estrecha entre los dos casos considerados en los trabajos de Hawking y de Davies, respectivamente. Siendo más específicos, estableció con rigor la estrecha similitud del caso de un detector acelerado con el comportamiento de un detector cerca del agujero negro, demostrando, en particular, que un detector geodésico cerca del horizonte de sucesos no vería el flujo de partículas de Hawking. En otras palabras, en su artículo Unruh reobtuvo con todo rigor matemático el análisis de Davies sobre el efecto de Hawking en un espacio-tiempo plano. Podríamos decir que puso la guinda al gran descubrimiento de Hawking.

Para terminar este punto y completar así el tema, debo añadir dos cosas. La primera es que estos autores, Davies muy en particular, recono-

cieron la influencia que tuvieron para su trabajo las ideas formuladas (aunque no publicadas) por Bryce DeWitt en 1974. La segunda, que todas las nociones que acabo de exponer han sido luego extraordinariamente fructíferas, y eso que sus últimas consecuencias están aún por dilucidar [3]. La termodinámica del espacio-tiempo, con una fórmula conveniente para la entropía (como la de Wald [8] y sus generalizaciones), constituye hoy en día una base muy sólida que se halla en el origen de conceptos tan importantes como los de gravedad emergente y entrópica (Verlinde [9], Padmanabhan [10]). Y que proponen, en particular, que bien pudiera darse el caso de que la gravedad no sea, de hecho, una fuerza fundamental, sino un fenómeno que emerge de la propia termodinámica del espacio-tiempo [11, 12]. Y que tal vez esté íntimamente relacionado con el entrelazamiento cuántico de grados de libertad, en una descripción no perturbativa de la gravedad cuántica. Pero, en aquellos momentos, en Schlading, todo eso estaba por venir todavía, y yo no me hallaba aún en condiciones de entender la gran trascendencia que iba a tener aquel gran descubrimiento.

La noble estancia del juez y una comida junto a Hawking

Mi segundo encuentro (de hecho, el primero cara a cara) con Stephen Hawking no tuvo lugar hasta doce años más tarde. Fue en otra conferencia, esta vez en el Imperial College de Londres. Yo ya era, para entonces, un flamante profesor contratado por la Universidad de Barcelona y esta vez me pude financiar, con los fondos de investigación que tenía asignados, el correspondiente viaje y estancia. Me acompañaban dos jóvenes estudiantes de doctorado, Enrique Gaztañaga y Roser Valentí; ambos hicieron luego carreras meteóricas, que los han llevado muy lejos dentro del mundo de la ciencia. Participábamos los tres en la Schrödinger Centenary Conference, en la que presentamos sendos trabajos. Uno de ellos contenía un análisis matemático de la distribución de las galaxias en el universo a gran escala [13], y constituyó la semilla de la tesis doctoral de Enrique.

Fue allí, en Londres, donde un día, a la hora de comer, me senté junto a Stephen Hawking. Por entonces él era ya una persona muy famosa y la enfermedad (aunque menos avanzada que en las imágenes más actuales, que todos recordamos, de la última etapa de su vida) ya le impedía comer solo. Su enfermera se situó al otro lado y, a cucharadas, le iba poniendo la comida en la boca. Pero a mí lo que me admiró mucho fue precisamente el hecho de que Hawking quería seguir siendo uno más, entre sus colegas científicos: mezclarse con todo el mundo, interactuar con los demás, comer a su lado. Y aquella vez me había tocado a mí. No hubo ocasión de hablar durante la comida. Bastante trabajo tenía él con intentar tragarse las cucharadas que su cuidadora (con quien más tarde

se casó) le iba dando, poco a poco. La mitad volvía al plato, una y otra vez, pero él no se inmutaba, en absoluto. No tenía miedo de dar un espectáculo. Al fin y al cabo, no podía hacer nada más, si su condición física era aquella, muy a su pesar. Fue una lección magnífica, de actitud ante la adversidad, de sencillez a la hora de comportarse y de relacionarse con los demás, de franqueza a la hora de mostrar sus graves limitaciones físicas, y de unas cuantas cosas más.

Seminarios en Oxford y Cambridge, y más encuentros

Volví a encontrarme con Hawking ocho años más tarde, en marzo de 1995. Yo estaba exultante al haber sido invitado a dar sendos seminarios en las prestigiosas universidades de Oxford y Cambridge. Esta vez, mis anfitriones me alojaron, en la magnífica “Estancia del Juez” del St. Cross College de Oxford, si la memoria no me falla. Está situada en un ala del College, junto a otras estancias de alto nivel. La que me asignaron era de hecho una *suite*, formada por la estancia del juez, una sala magnífica y ricamente decorada, y la del ayudante del juez, bella también, aunque un poco más pequeña y situada en el vestíbulo de la primera. Estos grandes *colleges* ingleses, así como también el Trinity de Dublín, tienen todos unos edificios espectaculares.

Recuerdo todavía que la primera noche dormí como un ángel. Me despertaron los golpes en la puerta, cada vez más fuertes e insistentes, de una azafata que me preguntaba si deseaba desayunar en la cama. “Tenemos filete, huevos, bacon, salchichas, alubias, queso, tomates, mermeladas a elegir...”, me soltó a toda velocidad, sin siquiera detenerse a respirar. “No, gracias, no tengo tiempo de tomar el desayuno en la cama...”, le respondí, mientras empezaba a vestirme a toda prisa; y añadí: “Por favor, ¿por dónde se va al comedor?” “Veamos. Si esta puerta del fondo del corredor estuviera abierta, podría ir directamente por allí, señor. Pero suele estar cerrada y lo más probable es que tenga usted que salir al patio, luego torcer a la derecha y...”. El comedor era una sala majestuosa, más bien parecía una nave de una catedral gótica, con paredes parcialmente recubiertas de



Figura 2. Stephen Hawking de camino a una conferencia ante estudiantes de secundaria en Jerusalén, el 10 de diciembre de 2006. (Dominio público).

nobles maderas finamente labradas. El sol resplandecía, aquella mañana. Sus rayos atravesaban los vitrales y las mesas y sillones resaltaban con soberbia elegancia. Me sirvieron un desayuno espléndido, pero tuve que apresurarme para no llegar tarde.

Esa misma mañana daba el seminario en Oxford y, dos días más tarde, en el DAMTP de Cambridge. Y ahí fue donde de nuevo me encontré con Hawking, esta vez a la hora del té; ritual exquisito que no solía perderse casi nunca, según me contaron. Otra vez pude apreciar, en persona, que a Hawking le encantaba hacer vida normal, tanto como le era posible. El diálogo con él no era ágil, ya en aquella época, según pude comprobar. Contestaba con gusto cada pregunta que le hacías, pero su respuesta tardaba un buen rato en ser procesada por el ordenador que llevaba en la silla; hasta que por fin la emitía, con una voz que sonaba muy robótica. Lo que de hecho contribuía a que se le calificase de oráculo. Pero eso hacía también que uno se lo pensara dos veces antes de hablar con él. ¿Merecía realmente la pena el comentario o pregunta que le estabas a punto de formular? ¿Era de verdad lo suficientemente importante? Luego, con los años, este aspecto mejoró bastante, así como su voz, cuando le fueron perfeccionando el sistema.

Aún vi a Hawking unas cuantas veces más, cuando menos cinco o seis, que ahora recuerde, la mitad de ellas en Barcelona. Una vez estuvo en la presentación de uno de sus libros en un CosmoCaixa repleto de entusiastas asistentes. En otra ocasión pidió expresamente dar un seminario a los estudiantes de la Universidad de Barcelona, que abarrotaron la mayor aula de la Facultad de Física, en la que yo mismo había impartido clases, poco tiempo atrás, a mis más de trescientos estudiantes de Métodos Matemáticos II. Fueron siempre lecciones sencillas pero excepcionales, repletas de contenido y de sugerencias. El año 2016 recibió el Premio BBVA Fronteras del Conocimiento, que agradeció desde el Centro de Estudios Matemá-

ticos de la Universidad de Cambridge, con fondo una pizarra repleta de ecuaciones (REF 32-2, p. 24).

La última vez que estuve con Hawking fue ese mismo año 2016 en Tenerife, en el *III Starmus International Festival*. Un encuentro de carácter divulgativo, de muy alto nivel, orientado a celebrar la astronomía, la exploración espacial, la música, el arte, y algunas ciencias afines, como la biología y la química. Hawking era uno de los oradores distinguidos, junto a media docena de astronautas, alguno de los cuales había pisado la Luna, y a una docena de importantes premios Nobel, como David Gross, Kip Thorne, Barry Barish, Adam Riess, Brian Schmidt, Robert Wilson, Joseph Stiglitz, etc.; y a otros colegas de muy alto nivel, que aún no lo tenían en sus manos, pero que iban a recibirlo posteriormente, como Roger Penrose. Y entre los músicos: Brian Eno, Brian May y Sarah Brightman.

Un año más tarde sus condiciones físicas habían empeorado y ya no le concedieron permiso para viajar a Trondheim, en Noruega, donde debía participar en el IV Starmus; ni siquiera le autorizaron a ir por mar, en un camarote con todas las atenciones posibles. Hay que recordar aquí que a él siempre le había encantado viajar. Yo había tenido la intención de ir a verle de nuevo, aprovechando que casualmente aquel verano estaba realizando una estancia en la NTNU, prestigiosa universidad noruega en la que tengo fieles colaboradores desde hace años.

El legado de Hawking: breve currículum con sus contribuciones más importantes

Dejando ya de lado las vivencias personales, todas ellas de muy grato recuerdo, resumiré ahora las contribuciones más importantes de Hawking a la física fundamental y a la cosmología.

Fue director de Investigación en el Departamento de Matemática Aplicada y Física Teórica (DAMTP) de la Universidad de Cambridge. Fundador del Centro de Cosmología Teórica (CTC) de la misma Universidad de Cambridge, director durante más de treinta años del Grupo de Relatividad General del DAMTP, e investigador principal de COSMOS, el National Cosmology Supercomputer de la Gran Bretaña (de 1997 a 2018). Fue también, como es bien sabido, profesor lucasiano en Cambridge, cargo que habían ocupado antes científicos de la talla de Isaac Newton y Paul Dirac.

En su página *web*, Hawking se definía a sí mismo como “cosmólogo, viajero espacial y héroe”. Nada más, pero nada menos. Trabajó toda su vida en las leyes básicas que gobiernan el Universo. Y él mismo dejaba meridianamente claro, en dicha página, cuáles habían sido sus tres descubrimientos principales.

1. Con Roger Penrose, demostró que la teoría de la Relatividad General de Einstein implica que el espacio y el tiempo han tenido su origen en el Big Bang y alcanzan su final en cada uno de los agujeros negros que se forman en el Universo.

Figura 3. Stephen Hawking (en el centro) disfruta de gravedad cero durante un vuelo a bordo de un avión Boeing 727 modificado, propiedad de Zero Gravity Corp. (Zero G). Hawking, quien sufría de esclerosis lateral amiotrófica (también conocida como la enfermedad de Lou Gehrig) está siendo rotado en el aire por Peter Diamandis (a la derecha), fundador de Zero G Corp., y Byron Lichtenberg (a la izquierda), antiguo especialista en carga útil del transbordador y ahora presidente de Zero G. Arrodillada debajo de Hawking está Nicola O'Brien, una enfermera practicante que era su asistente. Fecha: 26 de abril de 2007. (Cortesía de Jim Campbell/Aero-News Network. Dominio público).



Son las singularidades que aparecen necesariamente en la teoría de la Relatividad General de Einstein, como ambos demostraron. Esos resultados indicaron que era absolutamente preciso unificar dicha teoría con la Física Cuántica, eso es, interconectar las dos grandes revoluciones de la Física de la primera mitad del siglo xx.

2. Como resultado de la búsqueda de una tal unificación, Hawking descubrió que los agujeros negros no pueden ser negros del todo, sino que emiten radiación; y así, finalmente, se evaporan y desaparecen. (Este descubrimiento es lo que causó tanta sensación cuando yo estaba en Schlading.)
3. Y otra conjetura, esta vez obtenida en trabajo conjunto con James Hartle, fue que el Universo no tiene de hecho ni bordes ni fronteras, si el tiempo es imaginario. Lo que implicaría que la forma en que el Universo comenzó estaría determinada por completo por las leyes de la Ciencia.

Como se puede observar, se trata de un currículum de menos de media página; tan corto como extraordinarios son estos tres descubrimientos. He aquí una gran lección que deberíamos aprender: desconfiemos siempre de los currículos muy largos, de decenas de ítems, con los que algunos pretenden dejarnos boquiabiertos. Cuanto más importante es el científico (o científica) tanto más breve es su CV.

La radiación de Hawking

Posiblemente, el más relevante de los descubrimientos de Hawking es el segundo. De hecho, ya he hablado de él con cierto detenimiento al principio de este escrito. Se trata de la evaporación de los agujeros negros, conocida también como la *radiación de Hawking*, que descubrió en 1974:

Todo agujero negro de Schwarzschild, de masa M , emite radiación electromagnética como si fuera un cuerpo negro a temperatura:

$$T_{BH} = \frac{\hbar c^3}{8\pi k G M}.$$

En su famosísimo libro *A Brief History of Time* (Bantam Books, 1988), Hawking escribió sobre ese resultado:

Mi trabajo tuvo su origen en una visita que hice a Moscú, en 1973, donde los científicos soviéticos Yakov Zeldovich y Alexei Starobinsky me sugirieron que, de acuerdo con el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, los agujeros negros en rotación deberían necesariamente crear y emitir partículas.

Del dicho al hecho, sin embargo, a veces hay un abismo. Y éste es el que Hawking fue capaz de superar, en este caso, y de una manera muy brillante, dando una demostración técnicamente impecable, bellísima y cuantitativa de aquella predicción.



Figura 4. Stephen Hawking presenta al público el Corpus Clock, en la Biblioteca Taylor, Corpus Christi College, Cambridge. Fecha: 19 de septiembre de 2008. (CC BY-SA 2.0).

Hay que añadir también que su trabajo complementó y fundamentó, de una manera magistral, un resultado previo debido a Jacob Bekenstein [14]:

Todo agujero negro tiene una entropía, $S_{BH} = \frac{c^3 A}{4\hbar G}$, finita y no nula. Como también lo debería ser su correspondiente temperatura.

Aquí A es el área del horizonte de sucesos del agujero negro. Dejando de lado las constantes universales, esta fórmula nos dice que la entropía de un agujero negro es igual a una cuarta parte de su área. El hecho de que la entropía de un agujero negro sea proporcional al área y no al volumen del mismo (como sería el caso clásico) trae como consecuencia que la información cuántica puede medirse a partir de la geometría en una dimensión menos, eso es, en términos holográficos. Ello ha dado origen a importantísimos desarrollos en física teórica, los cuales han producido ya algunos resultados brillantes, conectando teorías que no parecía que tuviesen nada que ver unas con otras. La holografía proporciona una conexión no trivial entre las teorías de campos y partículas de la física cuántica convencional y las propuestas de teorías cuánticas de la gravedad. Como ejemplo, se intenta comprender, con su uso, la superconductividad de altas temperaturas y propiedades de los superconductores muy difíciles de estudiar con los enfoques convencionales.

Volviendo a la fórmula de Hawking, entre las consecuencias directas de la misma están las siguientes:

- La radiación de Hawking emitida por un agujero negro sería una emisión de cuerpo negro perfecto.

Figura 5. Stephen Hawking el 28 de agosto de 2013. (CC A-S A 2.0 G).



- Los agujeros negros microscópicos emitirían muchísima más radiación y, en consecuencia, desaparecerían muy rápidamente.
- Si las teorías de dimensiones adicionales son correctas, el laboratorio LHC del CERN podría llegar a crear agujeros negros microscópicos. De hecho, hay proyectos que intentan conseguirlo (https://en.wikipedia.org/wiki/Micro_black_hole; <https://home.cern/science/physics/extradimensions-gravitons-and-tiny-black-holes>).

Listado de sus últimos trabajos de investigación

Quede claro que esta lista la he tenido que completar personalmente, buscando en internet sus últimas publicaciones. Hawking había mantenido siempre actualizada su página *web*, mientras vivió, pero a su muerte parece que esto ya no se llevó a cabo.

1. “Black Hole Entropy and Soft Hair”, S. HACO, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER. 3 de oct de 2018. 14 pp, *J. High Energy Phys* 12, 98, 2018.
2. “Should China Build the Great Collider?” S. W. HAWKING y G. KANE, 2 de abril de 2018. 8 pp, arXiv: 1804.00682 [physics.soc-ph].
3. “A Smooth Exit from Eternal Inflation” S. W. HAWKING y T. HERTOGE. 24 de julio de 2017, rev 20 de abril de 2018. 14 pp, *J. High Energy Phys* 04 147, 2018.
4. “The Conformal BMS Group”, S. J. HACO, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y J. L. BOURJAILLY, 27 de enero de 2017. 16 pp, *J. High Energy Phys* 11, 012, 2017.
5. “Superrotation Charge and Supertranslation Hair on Black Holes”, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER, *J. High Energy Phys.* 05, 161, 2017. DOI:10.1007/JHEP05(2017)161.
6. “Black holes: The Reith Lectures”, S. W. HAWKING, mayo de 2016, ISBN-13:978-0857503572.
7. “Soft Hair on Black Holes”, S. W. HAWKING, M. J. PERRY y A. STROMINGER, 5 de enero de 2016.

9 pp. *Phys. Rev. Lett.* 116, n.º 23, 231301, 2016 DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.231301.

8. “The Information Paradox for Black Holes”, S. W. HAWKING, 3 de septiembre de 2015. 3 pp. DAMTP-2015-49. Talk at KTH Royal Institute of Technology, Stockholm; e-Print: arXiv:1509.01147 [hep-th].

Algunas lecciones de Hawking dirigidas al gran público

Dado que el presente es un artículo de carácter general, considero prioritario resaltar aquí —dejando aparte sus libros (que son ya harto conocidos y creo innecesario enumerarlos una vez más)— algunas de las lecciones que impartió [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/>], dirigidas todas ellas al gran público. Entre las que destacaría:

- Into a Black Hole, 2008 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/into-a-black-hole>].
- The Origin of the Universe, 2005 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/the-origin-of-the-universe>].
- Gödel and the End of Physics, 2002 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/godel-and-the-end-of-physics>].
- Space and Time Warps, 1999 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/space-and-time-warps>].
- Does God Play Dice?, 1999 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/does-god-play-dice>].
- The Beginning of Time, 1996 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/the-beginning-of-time>].
- Life in the Universe, 1996 [<https://www.hawking.org.uk/in-words/lectures/life-in-the-universe>].

Trabajador hasta el final

Sólo una breve reseña sobre los últimos días de Hawking. Hay testigos que aseguran que estuvo trabajando hasta el final en la conocida como paradoja de la pérdida de información. Aunque he observado también que, en otro artículo publicado póstumamente, esto es, el número 3 de la lista anterior y que tiene por coautor a su colaborador Thomas Hertog, de la Universidad de Lovaina, en Bélgica, la temática es bien distinta. Ello prueba, a mi entender, que Hawking todavía era capaz de dedicarse a varios problemas a la vez, poco antes de morir. En el trabajo con Hertog se reexaminan algunas características teóricas del Big Bang inflacionario mediante nuevas propuestas matemáticas. Su versión final apareció tan sólo diez días antes de la muerte de Hawking.

Sobre la paradoja que tanto le obsesionaba, muy poco antes de su deceso, su colaborador Malcom Perry estaba en Harvard trabajando en la versión preliminar de un artículo, correspondiente a dicho tema de la pérdida de información, conjuntamente con Andrew Strominger. En el artículo también colaboraba Sasha Haco, además del propio Hawking (dio lugar a la primera publicación de la lista

de más arriba). Perry aún no sabía que Hawking estuviese tan grave, y le llamó con la única intención de ponerle personalmente al corriente de los últimos avances que habían estado haciendo. Sin que nadie lo sospechara entonces, este fue ya el último intercambio científico que Hawking mantuvo con sus colegas. Según el testimonio del propio Perry:

Resultó muy difícil que Stephen se comunicase conmigo; yo le hablaba con un altavoz intentando explicarle hasta dónde habíamos llegado. Y cuando finalmente lo entendió, se limitó a esbozar una amplísima sonrisa. Le dije que ya teníamos algo que se estaba concretando. Pudo conocer, pues, buenas noticias, justo antes de morir.

En octubre de 2018 sus colegas Malcolm Perry, Andrew Strominger y Sasha Haco publicaron el que iba a ser su último artículo (el primero de la lista que he dado). Lleva por título “Entropía de los agujeros negros con pelo suave”, y en él se considera la denominada paradoja de la información de los agujeros negros, un rompecabezas al que Hawking dedicó buena parte de su vida. El problema radica en que, a pesar de que él mismo había descubierto que los agujeros negros radiaban y así, en principio y con el tiempo suficiente, se podría llegar a recuperar toda la materia que se habrían tragado previamente, no sucede lo mismo con la *información* que llevaba asociada la materia engullida. Porque resulta que la radiación de Hawking que se emite es de cuerpo negro perfecto, *no* lleva información alguna. Ésta se ha perdido, pues, por completo, tras el horizonte de sucesos del agujero negro. Y eso sería contrario a la Física Cuántica, que tiene entre sus principios fundamentales el de la *unitariedad*, y que conlleva la conservación de la información. He aquí la gran paradoja.

La idea de la solución propuesta por los cuatro autores en el artículo póstumo mencionado es, a grandes rasgos, la siguiente (los aspectos técnicos no son nada sencillos de explicar). Si el agujero negro tuviese “pelo” (o “cabello”) justo por encima del horizonte, ese “pelo” *podría retener la información* asociada a la materia que cae sobre el agujero, justo antes de que ésta atravesase el horizonte de sucesos. Y, de este modo, ¡la información no se perdería! Quedaría enmarañada en el cabello, retenida por tanto en la parte externa del horizonte de sucesos. Este trabajo se completó, como he dicho, los días previos a la muerte de Hawking. El artículo publicado incluye, además, un homenaje a toda su obra.

Malcolm Perry añade, hablando sobre ese trabajo:

Se trata, sin duda, de un muy buen paso adelante, pero, definitivamente, no contiene todavía



toda la respuesta buscada. Ahora nos queda un poco menos del difícilísimo rompecabezas que teníamos ante nosotros; pero reconozco que persisten todavía algunos problemas que se empeñan en no querer desaparecer.

Desgraciadamente, o quizá afortunadamente—todo depende de cómo se mire— esto suele ser siempre así. Algunas de las más importantes cuestiones abiertas de la ciencia permanecen aún sin resolver cuando fallecen los grandes genios. Por mucho que estos (y éstas) hayan dedicado toda su vida y todas sus energías a intentar responderlas. Y a pesar de que, en el mejor de los casos, hayan conseguido de hecho responder ya unas cuantas por el camino.

Problemas que aún permanecen abiertos y algunas respuestas posibles

1. La paradoja (llamada también catástrofe) de la pérdida de información, al evaporarse los agujeros negros.
2. El problema de las condiciones iniciales del universo.
3. La singularidad del Big Bang.

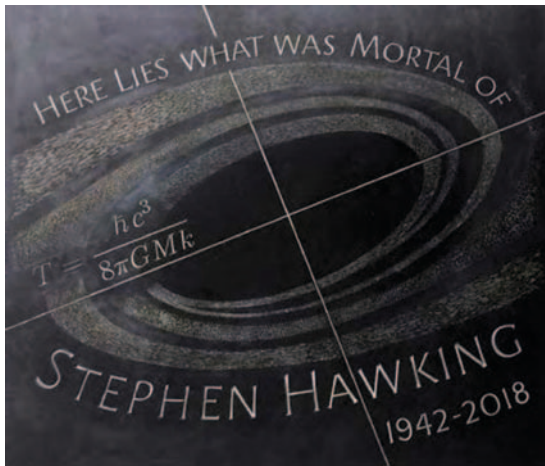
Ya para acabar, resumen de manera telegráfica (para más información se puede consultar mi libro [15]) algunas respuestas posibles a esas grandes cuestiones que todavía permanecen abiertas.

¿Qué hubo antes del Big Bang? (entendido en su significado original como inflación cósmica)

- Nada. Lo cual no tiene sentido físico alguno; ahora postulamos: *casi* nada.
- El (casi-)vacío clásico: solución casi-de Sitter de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein.
- El vacío cuántico: fluctuaciones cuánticas del estado vacío (que siempre están ahí, gracias al principio de indeterminación de Heisenberg).
- Un universo previo: modelos cíclicos (*bounce models*).

Figura 6. Depositando la urna con las cenizas de Hawking en su tumba, en la Abadía de Westminster. (Copyright: Decano y Capítulo de Westminster, Londres. Reproducido con permiso).

Figura 7. Lápida de Stephen Hawking situada en la nave de la Abadía de Westminster, Londres, bajo la cual están enterradas sus cenizas, no lejos de las tumbas de Isaac Newton y Charles Darwin. La inscripción es una traducción al inglés de una frase que aparece en latín en la lápida de Newton. La piedra presenta una serie de anillos que rodean una elipse central más oscura. La ecuación de Hawking expresa su idea de que los agujeros negros en el universo no son completamente negros, sino que emiten un resplandor, que se conoce como radiación de Hawking. En esta ecuación, T representa la temperatura del agujero negro; \hbar es la constante de Planck, que aparece en la mecánica cuántica; c la velocidad de la luz; 8π nos indica la naturaleza esférica del agujero; G es la constante de Newton correspondiente a la gravedad; M la masa del agujero negro y k la constante de Boltzmann, que aparece en la expresión de la energía de las partículas de un gas. La piedra de pizarra Caithness fue diseñada y fabricada por John Maine y el cortador de las letras fue Gillian Forbes. (Copyright: Decano y Capítulo de Westminster, Londres. Reproducido con permiso).



¿Cuáles son las condiciones iniciales del universo?

- *No-boundary conditions*: modelo de Hawking y Hartle con tiempo imaginario, que no necesita condiciones de contorno.
- Hay que esperar a la *gravedad cuántica* ¡que todavía no tenemos!
- LQC (*loop quantum cosmology*), la cosmología cuántica de lazos. Avanza, pero despacio.
- O bien, necesitaremos una *nueva teoría* para determinarlas, que todavía no sabemos cuál será.
- No es una pregunta relevante, en las teorías de *multiversos*.

El hecho claro es que aún no hemos sido capaces de diseñar un posible universo como el nuestro [15].

Alternativas posibles

- Multiverso (A. Linde, A. Vilenkin...): juega con el azar, el nuestro es sencillamente uno de los muchos universos que podría haber. Pero aún no hay de ello prueba alguna.
- Quizás la gravedad cuántica lo resolverá, u otra teoría que aún no tenemos.
- Geometría cuántica (parece, en principio, más fácil de concretar).
- Modelos antrópicos. Aceptados muy a regañadientes por los científicos.
- No es, hoy en día, una pregunta válida que tenga sentido hacerse, ya que aún no tenemos los medios (la teoría física contrastada, que llegue hasta el nivel de Planck, o casi) para poder contestarla. Todo esto queda, pues, aún pendiente. Pero debería ir terminando.

El epitafio: “Aquí yace la parte mortal de Stephen Hawking (1942-2018)”

Este es el epitafio escrito en la lápida que cubre la urna con sus cenizas (Figuras 6 y 7), enterrada en la nave de la abadía de Westminster, en Londres, cerca de las respectivas tumbas de Newton y Darwin. Personalmente, creo que no se podían haber encontrado palabras más adecuadas para despedir a Hawking. Son muy parecidas, aunque en inglés, a las que hay escritas en latín sobre la tumba de Newton: “Hic depositum est quod mortale fuit Isaaci Newtoni”.

Los hallazgos de Hawking fueron evocados en un servicio conmemorativo que tuvo lugar en junio de 2018, en la misma abadía de Westminster. En el transcurso de éste y por unos minutos, la antena DSA2 de Cebreros (Ávila) envió su voz, envuelta en música del gran Vangelis, hacia el cercano agujero negro 1A 0620–00. Un regalo para otras inteligencias que puedan estar habitando nuestro cosmos.

Lo que Hawking hizo, los grandes descubrimientos que nos dejó como científico—como la bellísima fórmula con la que he empezado este artículo y que ha quedado ahora grabada en su lápida—permanecerán para siempre. Y también, además, como persona, su tan extraordinario ejemplo.

Bibliografía

- [1] https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_230120ar.pdf; https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_170119r.pdf; https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/aascv_220218.pdf.
- [2] P. URBAN (Ed.), “Electromagnetic Interactions and Field Theory”, *Proc. of the XIV. Int. Universitätswochen für Kernphysik* (Schladming, Austria, 24 de febrero-7 de marzo de 1975) (Berlín, Springer, 1975).
- [3] E. ELIZALDE, “From the Creation of Particles in the Vacuum by an Accelerated Observer to Space-Time Thermodynamics”, *Journal of Physics. A: Mathematical and Theoretical* 50, 041001, 2017. Viewpoint, by invitation. DOI: 10.1088/1751-8121/50/4/041001.
- [4] E. ELIZALDE, “On How the Cyberspace Arose to Fulfill Theoretical Physicists’ Needs and Eventually Changed the World: Personal Recollections and a Practitioner’s Perspective”, en J. MARTÍN RAMÍREZ y LUIS A. GARCÍA-SEGURA (Eds.), *Cyberspace: Risks and Benefits for Society, Security and Development* (Berlin, Springer, 2017, pp. 3-22).
- [5] S. HAWKING, “Particle Creation by Black Holes”, *Commun. Math. Phys.* 43 199, 1975. [Erratum: *Commun. Math. Phys.* 46, 206, 1976].
- [6] P. C. W. DAVIES, “Scalar Production in Schwarzschild and Rindler Metrics”, *J. Phys. A: Math. Gen.* 8, 609, 1975.
- [7] W. G. UNRUH, “Notes on Black-hole Evaporation”, *Phys. Rev. D* 14, 870, 1976.
- [8] R. M. WALD, “Black Hole Entropy is the Noether Charge”, *Phys. Rev. D* 48, 3427, 1993.
- [9] E. VERLINDE, “On the Origin of Gravity and the Laws of Newton”, *J. High Energ. Phys.* 2011, 29, 2011.
- [10] T. PADMANABHAN, “Thermodynamical Aspects of Gravity: New Insights”, *Rep. Prog. Phys.* 73, 046901, 2010.
- [11] T. JACOBSON, “Thermodynamics of spacetime: the Einstein equation of state”, *Phys. Rev. Lett.* 75, 1260, 1995.
- [12] E. ELIZALDE y P. J. SILVA, “f(R) Gravity Equation of State”, *Phys. Rev. D* 78, 061501, 2008.
- [13] E. ELIZALDE y E. GAZTAÑAGA, “Mathematical Analysis of Galaxy Distributions”, *Proceedings of the Schrödinger Centenary Conference*, Londres, 1.23, 1987.
- [14] J. D. BEKENSTEIN, “Black Holes and Entropy”, *Phys. Rev. D* 7, 2333, 1973.
- [15] E. ELIZALDE, *Cosmología moderna: desde sus orígenes* (Los libros de la Catarata, 2020, ISBN 978-84-1352-125-1).

Puntos de interés

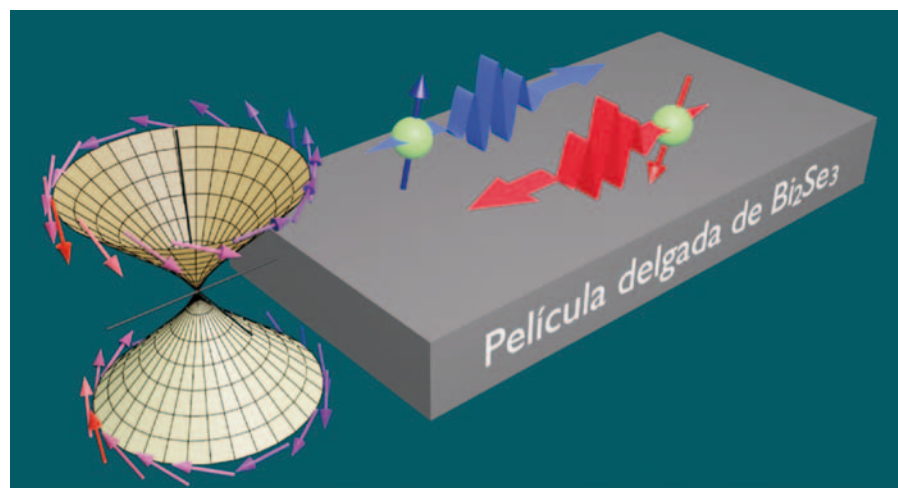
Descripción breve y sencilla de iniciativas docentes en nuestros colegios e institutos que han de ser resaltadas, de investigaciones relevantes de autores españoles o de extranjeros en instituciones españolas, y de otros hechos interesantes sobre ciencia y enseñanza, políticas educativa y científica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

PROPIEDADES ELECTRÓNICAS Y EFECTO DE ANTILOCALIZACIÓN EN PELÍCULAS DELGADAS DEL AISLANTE TOPOLÓGICO Bi_2Se_3

La naturaleza cuántica de la materia se pone de manifiesto una vez más en los materiales topológicos, cuya estructura de bandas posee una topología no convencional que les confiere propiedades únicas. Tal es el caso de los aislantes topológicos, materiales que se comportan como aislantes en su interior, pero que albergan estados conductores de la electricidad en su superficie. Estos estados se caracterizan, por un lado, por estar protegidos topológicamente, lo que les proporciona gran robustez frente a la dispersión por defectos, permitiéndoles conducir la electricidad con bajas pérdidas. Por otro lado, la interacción espín-órbita en ellos es muy intensa, lo que hace que la orientación del espín de los electrones esté condicionada por la dirección en la que se mueven. Esto último se conoce como acoplamiento espín-momento, y es la principal causa de algunos de los fenómenos más interesantes presentes en estos sistemas.

Recientemente, los investigadores Rubén Gracia-Abad, Soraya Sangiao y José María de Teresa, del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), en colaboración con Chiara Bigi, Sandeep Kumar Chaluvadi y Pasquale Orgiani, del Istituto Officina dei Materiali (IOM) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) de Trieste (Italia), han publicado un artículo en la revista *Nanomaterials* (DOI: 10.3390/nano11051077) en el que se revisan las propiedades electrónicas del Bi_2Se_3 , uno

de los aislantes topológicos que más interés ha despertado en los últimos años debido a la sencillez de su estructura de bandas y a su versatilidad a la hora de ser combinado con otros materiales. Este estudio se centra en el transporte electrónico en películas delgadas de este material, y presta especial atención al efecto de antilocalización débil. Este efecto tiene su origen en las leyes cuánticas que gobiernan el comportamiento de los electrones, el cual viene determinado por la longitud de coherencia, que



se define como la distancia media que un electrón puede recorrer dentro del material sin perder la información sobre su fase. Cuando la temperatura baja, los efectos cuánticos se hacen más significativos y esta distancia crece, dando lugar a fenómenos de interferencia cuántica. En concreto, los electrones que realizan trayectorias cerradas pueden interferir consigo mismo, y debido al acoplamiento espín-momento, lo hacen dando lugar a interferencias destructivas, que se traducen en una **disminución global de la resistencia eléctrica en el material**. Al aplicar un campo magnético, este efecto desaparece, lo que permite su caracterización.

Mediante medidas de magnetotransporte, han analizado la evolución de este efecto al variar el espesor, la temperatura y el campo magnético aplicado, y a partir de los datos obtenidos,

cotejándolos con los datos reportados en experimentos anteriores, **se muestra que este efecto es universal y puede estar originado tanto por los estados topológicos presentes en la superficie como por los estados residuales que contribuyen en el interior del material**, debido a defectos creados de forma natural. Esto permite entender la naturaleza del transporte electrónico en el material y determinar la influencia de los estados superficiales. Además, **se observa que, a pesar de encontrar una gran variabilidad en las propiedades de las muestras, existe una relación que permite predecir la longitud de coherencia a partir de la movilidad electrónica de la muestra**. Todo esto abre una vía para seguir avanzando en la comprensión del Bi_2Se_3 y en su implementación en aplicaciones como computación cuántica y espintrónica.

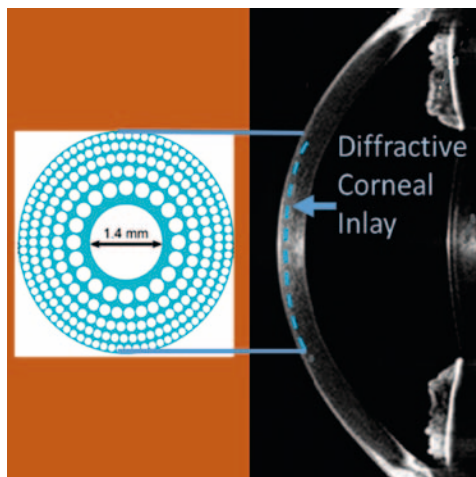
¹ Sección preparada por Augusto Beléndez, en colaboración con actores implicados, que anima a proponer contribuciones relevantes para ser consideradas aquí.



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

PRIMER IMPLANTE INTRACORNEAL TRIFOCA PARA EL TRATAMIENTO DE LA PRESBICIA

El uso de implantes intracorneales (IC) es uno de los procedimientos quirúrgicos más recientes en oftalmología para el tratamiento de la presbicia. En esta técnica se crea una cavidad en el estroma corneal con un láser de femtosegundo donde el IC es implantado por el cirujano. Los diseños actuales de los IC son dispositivos ópticos, bien refractivos o bien de efecto estenopeico. Con los primeros se consigue un efecto bifocal que permite una buena visión de objetos cercanos (lectura) y lejanos, pero **no proporciona buenas imágenes a distancias intermedias** (ordenador, dispositivos móviles), mientras que los segundos aportan una extensión de la profundidad de campo, pero **tienen bajo rendimiento a distancias cercanas**. Por estos motivos, los IC actuales solo se implantan en el ojo no dominante, creando en el paciente un efecto de cuasimonovisión que a menudo crea problemas en la visión estereoscópica. Además, una limitación de



los dispositivos IC actuales es que, para evitar el riesgo de rechazo, debe asegurarse que los mismos no impidan el flujo de nutrientes en el tejido circundante.

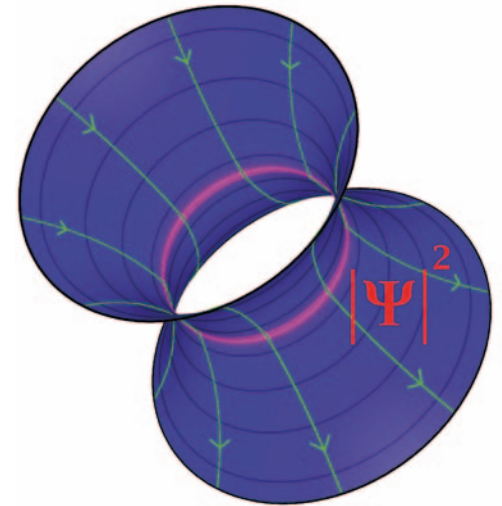
En un artículo publicada recientemente en la revista *Scientific Reports* (DOI: 10.1038/s41598-021-86005-8), un equipo de investigadores formado por Walter D. Furlan y Diego Montagud-Martínez, de la Universidad de Valencia, Vicente Ferrando y Juan Antonio Monsoriu, de la Universidad de

Valencia, de la Universidad Politécnica de Valencia, y Salvador García-Delpé de la Fundación Aiken, ha propuesto el **primer IC trifocal, que supera todos los hándicaps de sus precedentes**, pues, a diferencia de éstos, utiliza una lente difractiva diseñada usando el concepto de *photon sieve* (tamiz de fotones) de fase. De esta forma, estos IC difractivos están conformados por un anillo transparente fabricado con un material biocompatible (un hidrogel de silicona con un índice de refracción de 1,458) cuyo espesor, menor que 5 micras, una vez implantado dentro del estroma corneal, no tendría prácticamente efectos sobre su estructura. Con miles de microagujeros en su superficie distribuidos en las zonas pares de una placa de zona de Fresnel se crean tres focos difractivos con los órdenes de difracción (-1, 0 y +1). De este modo, el nuevo implante es capaz de convertir a la córnea en un sistema óptico trifocal que, **al ser de fase y tener mejor eficiencia difractiva, podría implantarse en ambos ojos**, señala el Dr. Furlan. Además permitiría un mejor flujo de nutrientes en el estroma corneal. En el artículo se han demostrado numéricamente las buenas prestaciones del nuevo IC difractivo en formación de imágenes, en comparación con un IC refractivo disponible en el mercado, tanto a distancias cercanas e intermedias como para objetos a distancias lejanas. **Los buenos resultados fueron confirmados experimentalmente empleando un simulador óptico basado en óptica adaptativa**. Por otra parte, este nuevo dispositivo IC, al ser el primer implante difractivo totalmente transparente, **sería completamente compatible con la cirugía refractiva con láser, así como con cirugía de cataratas**. El Dr. Furlan concluye que el siguiente paso de este proyecto es la construcción física de los primeros prototipos para luego caracterizarlos y posteriormente comenzar con los ensayos clínicos.

AGUJEROS DE GUSANO ATRAVESABLES

Un agujero de gusano es una **estructura hipotética en forma de túnel** (garganta) en el espacio-tiempo, que en principio permitiría acortar la distancia entre eventos en el Universo.

Estos objetos teóricos aparecen como soluciones de las ecuaciones de Einstein. Es sabido que la existencia de un agujero de gusano atravesable requiere de una distribución de energía alrededor de la garganta que viola varias condiciones energéticas. Por ello, modelos anteriores típicamente introducen materia exótica.



Por materia exótica se entiende materia que no entra en la descripción propuesta por el modelo estándar de partículas. Por ejemplo, el campo escalar fantasma, que poseen una energía cinética negativa. Este es un tipo de materia nunca observado en la naturaleza.

Los campos escalares, utilizados normalmente en modelos de agujeros de gusano atravesables, son bosones. Son matemáticamente simples, muchas veces preferidos para el análisis teórico. Sin embargo, el único campo escalar fundamental que actualmente se observa en la naturaleza es el bosón de Higgs, y no admite una geometría de agujero de gusano.

En un artículo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.101102) por José Luis Blázquez Salcedo, del Departamento de Física Teórica e IPARCOS (UCM), Christian Knoll, del Institut für Physik de la Universidad de Oldenburg (Alemania), y Eugen Radu, del Departamento de Matemática da Universidad de Aveiro y el CIDMA (Portugal), se han construido por primera vez agujeros de gusano atravesables en la teoría de Einstein-Dirac-Maxwell. Como señala el Dr. Blázquez Salcedo, “esto significa que consideramos la teoría de Einstein para la gravedad (relatividad general),

la teoría de Maxwell para los campos electromagnéticos, y la teoría de Dirac para fermiones”. Es decir, **para la construcción teórica de los agujeros de gusano, consideran materia descrita por el modelo estándar de física de partículas, mientras que emplean la teoría de la gravedad de Einstein.**

Por tanto, “el marco teórico general de nuestro trabajo no contiene nada fuera de las teorías aceptadas”, añade el Dr. Blázquez Salcedo. Muchas de las partículas fundamentales que encontramos en la naturaleza son fermiones (electrones, positrones, etc.). Los campos de Dirac violan naturalmente las condiciones de energía, por lo que los fermiones proporcionan la interacción adicional para equilibrar la atracción gravitacional y mantener abierto el agujero de gusano.

La hipótesis de que los fermiones pueden soportar la geometría de un agujero de gusano no es nueva. Ya en los años sesenta del siglo pasado, John Archibald Wheeler propuso en el contexto de su modelo de “carga sin carga” la existencia de este tipo de soluciones. Sin embargo, hasta este trabajo, nunca se había construido un ejemplo explícito de esta idea.

El Dr. Blázquez Salcedo concluye que, hasta donde sabemos, no existe evidencia observacional de la existencia de ningún tipo de agujero de gusano. Por tanto, el interés de su modelo es, en principio, solo teórico. **Debido a la naturaleza cuántica de los fermiones, esperan que estos agujeros de gusano, en el hipotético caso de que existieran, fueran microscópicos.** Aún son necesarios más estudios teóricos para analizar las propiedades de estos objetos y estudiarlos en el contexto de teorías más completas, por ejemplo, incluyendo efectos cuánticos.

DISPOSITIVOS MICROELECTROMECAÑICOS, SUEÑO Y ENFERMEDAD DE ALZHEIMER

La enfermedad de Alzheimer (AD) es un proceso neurodegenerativo causado por la desbocada acumulación de ciertas moléculas (β -amiloides y proteínas- τ) en el cerebro. En un individuo sano, estas sustancias son

producidas durante el día de manera natural por el propio organismo como mecanismo de defensa, pero son recicladas durante el sueño profundo, restaurando el equilibrio. Sin embargo, en un enfermo de AD, el tándem $\beta+\tau$ acaba formando condensados de manera inadvertida, colapsando eventualmente cada sinapsis. **Este proceso iterativo de “auto-ahogamiento cognitivo” se va repitiendo hasta que es demasiado tarde para actuar.** Es en este punto cuando comienzan a hacerse visibles los síntomas por todos conocidos: pérdida drástica de memoria, desorientación, estados de alteración y demencia.

Lo que parece estar bien establecido por la comunidad científica es la mencionada relación entre sueño y AD. Recientemente, se han llevado a cabo estudios clínicos en personas sanas en los que se ha comprobado la presencia elevada de compuestos $\beta+\tau$ tras una única noche de privación de sueño. Trabajos parecidos se han realizado con pacientes diagnosticados con AD. **Sin embargo, la ejecución de este tipo de ensayos es mucho más complicada por la naturaleza impulsiva (y, en ocasiones, agresiva) asociada a los individuos afectados por esta enfermedad.** Las razones de tipo ético y/o de respeto a la intimidad son también un factor limitante en este campo de investigación.

En un artículo publicado en la revista *Sleep & Breathing* (DOI:10.1007/s11325-021-02327-x), el físico Alberto Corbí y el Dr. Daniel Burgos (ambos miembros de Instituto de Investigación, Innovación y Tecnología Educativas de la Universidad Internacional de La Rioja) han diseñado un **sistema que permite monitorizar el sueño de personas con AD de manera no intrusiva. La implementación está basada en el uso de dispositivos electromecánicos (MEMS) para el seguimiento de los movimientos del enfermo durante la noche.** Como señala el Dr. Corbí, el *hardware* subyacente tiene forma de sencilla y cómoda pulsera, la cual registra aceleraciones de manera continua y autónoma y los datos se almacenan en una memoria de estado sólido a una frecuencia de 50Hz durante casi un mes, sin necesidad de conexión a la

red eléctrica o de datos (reforzando la premisa de respeto por la privacidad). Seguidamente, es posible estimar los periodos de sueño mediante un algoritmo llamado “estimation of stationary sleep-segments” (DOI:10.1109/ICHI.2014.24). En el transcurso de la

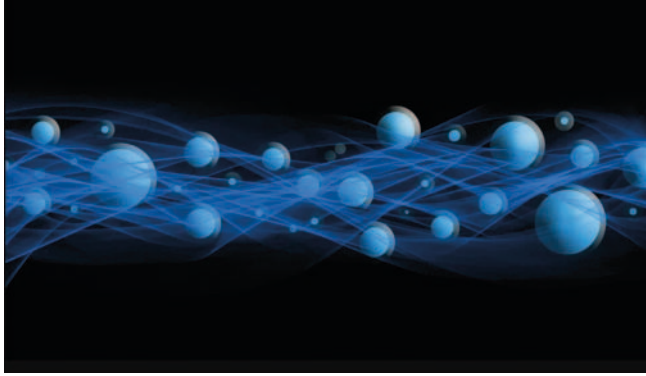


investigación ha supervisado el sueño de tres grupos de personas, según su estado clínico de avance de la enfermedad (sano, AD-leve y AD-severo) durante varias noches. A continuación, aplicando un algoritmo de máxima verosimilitud, **ha sido posible volver a clasificar con gran precisión el estado de deterioro cognitivo de estos participantes de manera no supervisada.** “Esta investigación ha contribuido a afirmar el nexo entre sueño y AD y ha demostrado que la Física tiene mucho que aportar a la neurología, incluso más allá del ámbito de la radiofísica”, concluye el Dr. Corbí.

NO-LOCALIDAD CUÁNTICA GENUINAMENTE MULTIPARTITA EN REDES DE ESTADOS BIPARTITOS

El entrelazamiento y la no-localidad en estados cuánticos multipartitos juegan un papel fundamental en las tecnologías cuánticas. Mientras que el entrelazamiento es una propiedad de los estados, la no-localidad se manifiesta en las correlaciones que se extraen de estos. En concreto, es una propiedad de las distribuciones de probabilidad conjunta que se obtienen a partir de medidas locales sobre los estados. Este fenómeno se revela a través de la violación de desigualdades de Bell y es responsable de la incompatibilidad de la teoría cuántica con modelos de variables ocultas locales. En los últimos años, esta in-

compatibilidad se ha utilizado para dar propuestas concretas de protocolos irrealizables clásicamente que se formulan directamente sobre las distribuciones de probabilidad no locales. Sin embargo, **aunque la no-localidad sólo puede surgir de un estado entrelazado, se sabe que no todos los estados entrelazados dan lugar a ella.**



Las aplicaciones más punteras requieren de no-localidad genuinamente multipartita. Esto implica que las correlaciones no locales se extienden sobre todas las partes y no solamente sobre un subconjunto de éstas. Generar estas correlaciones en el laboratorio es un desafío ingente que exige la preparación, control y distribución de estados cuánticos entrelazados de muchas partes. **Una forma asequible de lograrlo es a través de redes conexas donde se comparte entrelazamiento bipartito entre pares de partes.** Por ello, en la actualidad se investiga la implantación de protocolos cuánticos en redes, en lo que a veces se ha dado en llamar “quantum internet”. Es más, es relativamente sencillo demostrar que, si se comparten estados entrelazados puros, el estado correspondiente a una red conexas contiene siempre entrelazamiento genuinamente multipartito.

Ahora bien, ¿es esto suficiente para obtener no-localidad genuinamente multipartita? En un artículo publicado en *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.040501) por Patricia Contreras-Tejada, del Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, Carlos Palazuelos, del Departamento de Análisis Matemático y Matemática Aplicada de la UCM y el Instituto de Ciencias Matemáticas de Madrid, y Julio I. de Vicente, del Departamento de Matemáticas de la Universidad Carlos III de Madrid, se da una respuesta

positiva a esta pregunta con toda generalidad: **cualquier red conexas de estados bipartitos entrelazados puros da lugar a no-localidad genuinamente multipartita independientemente de la cantidad de entrelazamiento y la geometría de la red.** De hecho, como indica el Dr. De Vicente, se construyen explícitamente desigualdades de Bell y las medidas necesarias para obtener una violación en función de los estados que compartan cada par de nodos. La independencia de la geometría permite que la propiedad deseada se manifieste en redes sencillas: por ejemplo, una red tipo estrella en la que un nodo central dotado de un laboratorio competente reparte estados entrelazados a nodos satélite mucho más precariamente equipados.

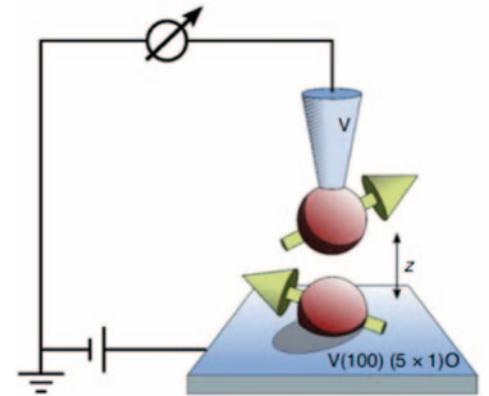
El siguiente paso, en el que están trabajando, es estudiar qué papel juega el ruido en los estados de la red, ya que cualquier implementación realista conllevará estados no puros. El Dr. De Vicente concluye señalando que “podemos adelantar que en este caso tanto la calidad del entrelazamiento como la topología de la red juegan un papel determinante”. Así, además de sus aplicaciones concretas, estas investigaciones abren la puerta al uso de la teoría de redes en este contexto.

EXPLORANDO LOS LÍMITES DEL TRANSPORTE CUÁNTICO

La invención del microscopio de efecto túnel (STM) en los años 1980 revolucionó el mundo de la nanociencia y permitió por primera vez explorar y manipular la materia a escala atómica. En la actualidad **el STM permite estudiar la competición entre magnetismo y superconductividad, dos fases antagónicas de la materia, a escala atómica.** Una de las manifestaciones de esa competición es la aparición de unos estados ligados de energía, conocidos como estados de Yu-Shiba-Rusinov (YSR), que están muy localizados espacialmente. Dichos estados

energéticos tienen propiedades únicas y parte de su interés reside en el hecho de que pueden ser los precursores de los llamados estados de Majorana, que podrían ser la base de un nuevo tipo de computación cuántica. Sin embargo, y a pesar de enormes esfuerzos, había sido imposible hasta ahora explorar el transporte de corriente entre estados YSR individuales, lo que tiene un gran interés porque constituiría el límite último del transporte electrónico cuántico.

Este problema ha sido resuelto en un artículo reciente publicado en *Nature Physics* (DOI: 10.1038/s41567-020-0971-0) por un equipo internacional formado por el grupo de Christian Ast



y Klaus Kern, del Max Planck Institute for Solid State Research en Stuttgart, el grupo de Joachim Ankerhold, en la Universidad de Ulm, y los investigadores Alfredo Levy Yeyati y Juan Carlos Cuevas, del Condensed Matter Physics Center (IFIMAC) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). En este trabajo, los investigadores usaron un STM de muy bajas temperaturas (10 mK) para explorar la corriente eléctrica entre estados YSR individuales vía el efecto túnel cuántico. Para ello, atraparon una impureza magnética con la punta de vanadio del microscopio, que a su vez fue usada para explorar otra impureza magnética depositada en una superficie de vanadio, que es un material superconductor a esas bajas temperaturas. De este modo, fueron capaces de medir la corriente eléctrica entre dos estados ligados superconductores localizados a escala atómica (uno en cada impureza), lo cual supone **la configuración más elemental jamás creada para producir una corriente por efecto túnel.**

La realización de un STM modificado con impurezas magnéticas y

sus correspondientes estados ligados superconductores **abre la puerta a investigar numerosos fenómenos físicos**. Por ejemplo, esto puede permitir estudiar estados de Majorana que se pueden realizar en cadenas de átomos magnéticos. También puede utilizarse para estudiar nuevos tipos de superconductividad que pueden surgir de su competición con el magnetismo, así como la generación de corriente de espín, que son temas cruciales para el campo de la emergente *Espíntrónica Superconductora*. Finalmente, este nuevo instrumento también va a permitir estudiar el magnetismo en nanoestructuras con un nivel de precisión y detalle sin precedentes.

CRISTALES HIDRODINÁMICOS: UN NUEVO ESTADO DE LA MATERIA

A partir de ondas de Faraday excitadas en la superficie del agua a la que se añade una pizca de un extracto vegetal, la escina, **se ha encontrado una nueva forma de sólido, ordenado y estático, pero constituido en realidad por un líquido desordenado en continuo movimiento**.

Una investigación internacional liderada por la UCM, publicada en *Nature Communications* (DOI: 10.1038/s41467-021-21403-0) y en la que han participado investigadores del Departamento de Química Física (UCM), el Instituto de Investigación Sanitaria Hospital Doce de Octubre de Madrid, el Instituto de Investigaciones Biosanitarias de la Universidad Francisco de Vitoria y el Departamento de Matemáticas Aplicadas y Sistemas de la

Universidad Autónoma Metropolitana Cuajimalpa de México, ha descrito por primera vez **un nuevo estado exótico de la materia: los cristales hidrodinámicos, constituidos por un fluido en movimiento, aunque ordenados como en un sólido cristalino y estático**.

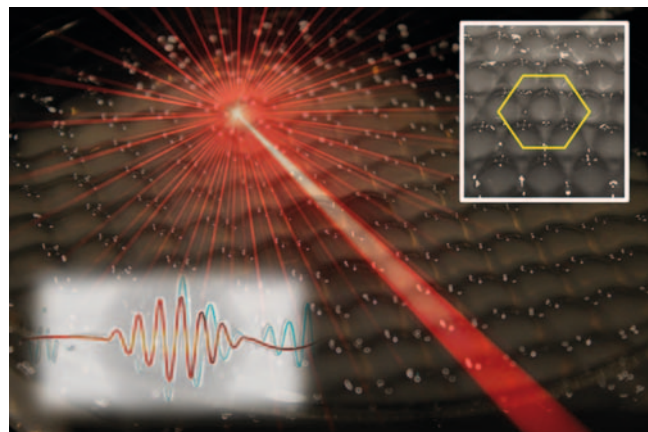
El Prof. Francisco Monroy, investigador del Departamento de Química Física de la UCM, señala que el descubrimiento de este nuevo estado de la materia transporta nuestra imaginación a múltiples panoramas y realidades, desde la comprensión de las leyes fundamentales que gobiernan la estructura de los condensados de ondas a diferentes escalas, pasando por la creación controlada de defectos en las redes cristalinas formadas, hasta usos tecnológicos en que los nuevos cristales hidrodinámicos puedan utilizarse como plantillas moldeables de nuevos materiales biocompatibles.

Este nuevo tipo de cristal se obtiene cuando las ondas excitadas en la superficie del agua —ondas de Faraday formadas cuando se vibra el líquido, como en una coctelera— aparecen ordenadas por efecto de la rigidez **tras añadir un aditivo especial llamado escina, que es un extracto natural obtenido de los frutos secos** y utilizado como “superalimento” en dietas de reducción del colesterol. “Esta biocompatibilidad será crucial para futuras aplicaciones de los nuevos ‘cristales de agua’ en biotecnología”, añade el investigador de la UCM.

El Prof. Monroy explica que, en condiciones habituales, las ondas aparecerán muy desordenadas en *su coctelera*, pero **la mera presencia del aditivo**

es suficiente para congelar la hidrodinámica en un patrón ordenado de paquetes de onda, una tesela perfecta, como si fuera un cristal sólido, pero de agua líquida.

El equipo de investigación ha hecho uso de un altavoz para excitar las ondas y de unos contenedores llenos de agua con una pequeña cantidad de escina



disuelta, con el que **se ha fabricado un sencillo dispositivo capaz de generar un patrón de ondas de Faraday perfectamente ordenadas en la superficie del líquido, el cristal hidrodinámico**. “Sin embargo, en ausencia del aditivo, la superficie aparecía completamente desordenada”, puntualiza el investigador.

El Prof. Monroy concluye que el nuevo concepto y sus aplicaciones prácticas se encontrarán muy pronto incorporados a los libros de texto como un nuevo paradigma de la condensación de cuasipartículas discretas de naturaleza ondulatoria en el límite clásico. En concreto, el cristal hidrodinámico y los paquetes de ondas de Faraday que lo constituyen suponen el equivalente clásico de los cristales ordinarios, y sus excitaciones colectivas, bajo la forma de ondas de materia de “De Broglie” estudiadas en los libros de física moderna.



**16th
European
Solar
Physics
Meeting**

6-10 septiembre 2021
Online

<https://indico.ict.inaf.it/event/794/>

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

La batalla por la **supremacía cuántica** sigue, y con ese nombre tan molón es difícil no entusiasmarse. Más aún si un equipo español planta cara a gigantes como China (aquí me sale el orgullo patrio, *sorry not sorry*) que está invirtiendo grandes sumas de dinero para dominar las tecnologías cuánticas a nivel mundial. El equipo investigador liderado por el Prof. Hugues de Riedmatten, del ICFO (Barcelona, España), es portada en la prestigiosa *Nature* (*Nature* 594, 37-40 [2021]) con un tra-

matten en un interesante artículo que os invitamos a leer en <https://bit.ly/3fW17yR>

La doctora Angélica Anglés, investigadora en el Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Hong Kong, nos explica en un interesante artículo (<https://bit.ly/3fVDXsD>) los problemas que tendría la humanidad para **sobrevi-**



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



De izquierda a derecha, los investigadores del ICFO Dario Lago, Samuele Grandi, Jelena Rakonjac, Alessandro Seri y Hugues de Riedmatten (ICFO).

bajo donde logran, por primera vez, el **entrelazamiento de dos memorias cuánticas** multimodo ubicadas en diferentes laboratorios separados por 10 metros, utilizando fotones con longitudes de onda en el rango de las telecomunicaciones. Este estudio supone una prueba de concepto clave, pues con esta tecnología se podrían enviar mensajes cuánticos usando la fibra óptica convencional y comercial que ya se emplea en internet. “Este trabajo es la demostración de un primer paso hacia un repetidor cuántico”, explica Ried-

vir en el planeta Marte. Mucho se habla de cuándo habrá viajes tripulados a Marte, de hecho, hay dos proyectos en marcha: uno liderado por la NASA

(Artemis) para 2024 y otro privado desarrollado por la empresa Mars One, para 2025. Sin embargo, el gran desafío actual trata de cómo colonizar el planeta rojo y que las personas tripulantes de estos viajes espaciales sobrevivan a los efectos nocivos de la radiación o a la falta de agua, por ejemplo. También se trata de la posibilidad de traerlos de vuelta, aunque, curiosamente, cientos de miles de voluntarios se presentaron a la convocatoria de un proyecto en el que las personas enviadas a Marte jirían allí sin posibilidad de volver a la Tierra! Queda aún mucha tecnología por desarrollar que pueda aprovechar al máximo los propios recursos del planeta, pero se conseguirá en la siguiente década, opina la investigadora. Marte supone el primer paso indiscutible para que la humanidad se embarque en el apasionante desafío de la conquista del espacio...



Imagen: Imagen obtenida el pasado 10 de mayo por el rover “Perseverance” de la NASA en Marte (*Materia. El País*).

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”!

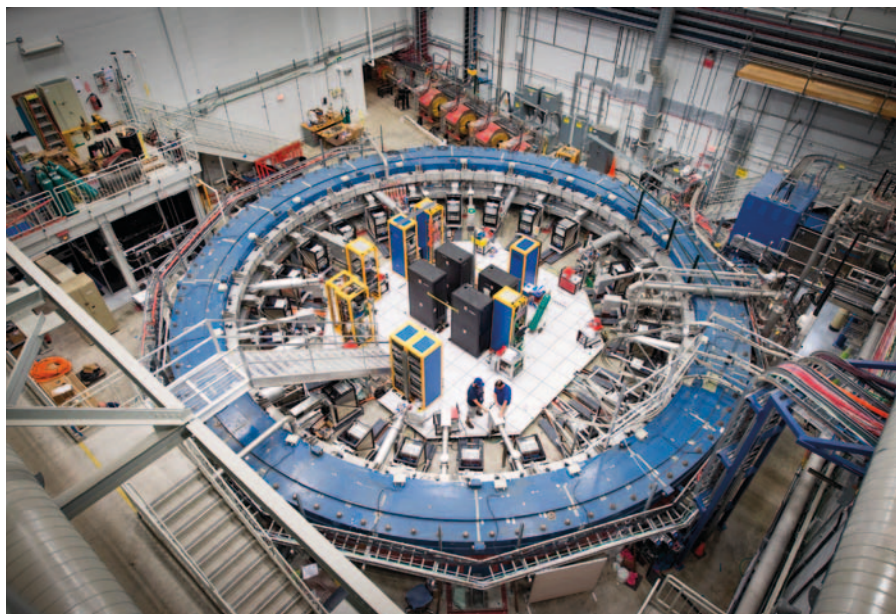


Imagen: Reidar Hahn/Fermilab vía Departamento de Energía de Estados Unidos (*The New York Times*).

¿Cómo llamaríais a un montón de agujeros negros? Después de los múltiples descubrimientos de agujeros negros gracias a los detectores Virgo y LIGO, y los que, presumiblemente, quedan por venir, los astrónomos se preguntan cómo deberíamos llamar a una colección de agujeros negros. Existe jauría de lobos, piara de cerdos, enjambre de abejas... Pero ¿qué término sería apropiado para los agujeros negros? La pregunta ha sido lanzada en Twitter y ya hay múltiples y originales propuestas: vacío, cacofonía, coloquio, desastre... ¿Cuál es tu preferido? Puedes seguir este divertido debate aquí: (<https://bit.ly/356eoyV>).

Desde las impresionantes entrañas del Laboratorio Nacional de Aceleradores Fermi, o **Fermilab**, en Illinois (EE. UU.), nos llegan inquietantes noticias sobre un nuevo descubrimiento que está haciendo tambalear la validez del Modelo Estándar. Un equipo de investigación integrado por más de 200 personas de todo el mundo ha colaborado para descubrir que **el muon**, una partícula ele-

mental similar al electrón pero mucho más pesada, **presenta una anomalía en su momento magnético**. Aunque la divergencia de este dato (que es de una milmillonésima parte entre el valor teórico y el experimental) parezca pequeña, es en realidad muy grande para este tipo de medidas, y supone un “indicio” de nueva física. El experimento, llamado Muon g-2, desvela

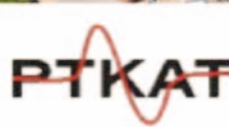
un resultado que tiene una posibilidad entre 40.000 de ser casualidad, y tan sólo representa el 6 % del total de los datos recogidos. Se espera que el experimento obtenga en los próximos años muchos más resultados que puedan reafirmar estos nuevos datos y resolver algunos de los misterios de nuestro inmenso y casi desconocido cosmos (<https://nyti.ms/3g7p6Ks>).

17th International Congress on Thermal Analysis and Calorimetry

29 Aug. – 3 Sept. 2021, online conference



<https://ictac2020.jordan.pl/>



Reseñas de libros de interés



A hombros de gigantAs

Laura Morrón Ruiz de Gordejuela

Next Door Publishers, 2021, 144 págs.

Escribe Leila Guerriero, y así lo refleja Irene Vallejo en su delicioso ensayo *El infinito en un junco* (Ed. Siruela), que cuando se acierta a encontrar el nombre exacto del título de un libro se siente algo parecido a la felicidad, porque el título de un libro no es una sucesión de palabras ingeniosas, sino “un estambre soldado al corazón de una historia de la que ya no podrá volver a separarse”.

Cada una de las páginas del libro *A hombros de gigantAs*, el cual tengo la fortuna de reseñar aquí, constituye una historia soldada a una vida entera de cien mujeres de diferentes disciplinas científicas. Heroínas invisibles que contribuyeron con su ingenio al desarrollo científico ante la indiferencia de los siglos. Estas científicas están vivas y

respiran en cada uno de los versos que la física Laura Morrón Ruiz de Gordejuela ha dibujado de ellas en deliciosos haikus, un tipo de poesía japonesa escrito en tres versos de cinco, siete y cinco sílabas u ocho, once y ocho sílabas.

A hombros de gigantAs es un canto a la ciencia que la autora nos regala en la feminización de la metáfora “Pararse a hombros de gigantes” y que nos recuerda el uso del entendimiento adquirido por las personas que nos precedieron, para contribuir a un progreso intelectual. En ciencia, y sobre todo en física, esta figura cobra una particular relevancia cuando Isaac Newton expresó, “Si he visto más lejos, es poniéndome sobre hombros de Gigantes” en su particular correspondencia con Robert Hooke en 1675. En parte, esta expresión viene a desmitificar esa ciencia vertical, singular y llena de personajes totémicos, para recordarnos que la ciencia es en sí una aventura colectiva en la que las científicas y los científicos están presentes para avanzar por un bien común.

Afirma la gran filósofa Amelia Valcárcel que “tan importante es conocer como reconocer”, y así en este libro de poemas científicos, Laura Morrón ha querido que reconozcamos el trabajo científico de unas mujeres que, aunque desconocidas y excluidas muchas de ellas de los cánones científicos, se alzan como referentes firmes. En física encontramos mujeres como Hipatia, Aglaonice de Tesalia, Émilie du Châtelet, Laura Bassi, Nicole-Reine Etable Lepaute, Caroline Lucretia Herschel,

Wang Zhenyi, Mary Fairfax Greig Somerville, Williamina Paton Stevens Fleming, Mary Adela Blagg, Mary E. Proctor, Maria Sklodowska-Curie, Henrietta Swan Leavitt, Lise Meitner, Edith Hinkley Quimby, Marietta Blau, Irène Joliot-Curie, Cecilia Helena Payne-Gaposchkin, Mária Telkes, Maria Goeppert-Mayer, Chien-Shiung Wu, Rosalyn Sussman Yalow, Joan Feynman, Vera Cooper Rubin, María Josefa Yzuel Giménez, Jocelyn Bell Burnell, Teresa Rodrigo Anoro, Donna Strickland y Andrea Mia Ghez.

Al mismo tiempo, la autora ha fundamentado este fantástico proyecto, añadiendo una extensa bibliografía que supone todo un regalo para aquellas personas interesadas y preocupadas por saber más sobre mujeres científicas. Mujeres de cientos de generaciones que engrandecieron y engrandecen el conocimiento científico con su trabajo y sus logros para hacer una mejor ciencia.

Este libro es ciencia en poesía y poesía en ciencia. Hemos de felicitarnos por el compromiso de la autora con la divulgación científica, la poesía y la lucha por la igualdad.

A hombros de gigantAs fue publicado en febrero de 2021 en la primera editorial independiente especializada en divulgación científica Next Door Publishers.

Pas García Martínez

Facultat de Física. Universitat de València

Presidenta del Grupo Especializado de Mujeres en Física de la RSEF



Cosmología moderna desde sus orígenes

Emilio Elizalde

Ed. Catarata, 2020, 214 págs.

Este es un libro de gran actualidad e interés. Escrito por el profesor Emilio Elizalde, quien, además de ser un reconocido investigador en el campo de la cosmología, es también un reconocido profesor, orador, escritor y divulgador. Además de gran físico, matemático y políglota, cosa especialmente importante para acceder a los textos originales. Conozco bien al profesor Elizalde, ya que ha sido mi maestro, director de tesis, mentor, colaborador y amigo. Puedo decir sin duda alguna que yo, al igual que muchos otros, no seríamos científicos profesionales si no hubiéramos tenido la suerte de cruzarnos en su camino.

El libro está escrito con un lenguaje fluido y mantiene en todo momento

una gran consistencia y foco argumental. Nunca se pierde el rumbo o se sale por la tangente. Aun así, esta repleto de anécdotas, algunas personales y de primera mano. De primera mano son también las fuentes a las se refiere. Este es uno de los puntos clave del libro, que lo hace realmente único. El Profesor Elizalde no se remite a repetir los tópicos en el tema, sino que profundiza en los orígenes y la sustancia de las ideas, de la física y de las matemáticas. Esto solo lo puede hacer alguien que domina todos los aspectos —observación y teoría— y a quien no le asusta hurgar en las fuentes originales y las enredaderas de la historia, para luego ser capaz de darles sentido y sintetizar lo encontrado de forma brillante. ¡Todo ello sin usar ecuaciones!

Un esfuerzo titánico. No es tarea fácil reconstruir la historia, ni el fluir de las ideas, que a menudo no siguen un curso lineal. El autor consigue trasladarnos al pasado y entrar en la mente de la época y de sus grandes científicos. Pone sus aciertos y fracasos en contexto. Y lo hace siempre con claridad y desde una perspectiva positiva y constructiva, que motiva a leer más y seguir adelante, algo que caracteriza muy bien al profesor Elizalde. Los científicos, por muy geniales que sean, no dejan de ser mortales humanos y, como tales, no están exentos de prejuicios, vanidades, arrogancia, ambiciones, envidias o incluso mezquindades. Lo mismo ocurre con sus instituciones. Es refrescante ver cómo el profesor Elizalde no entra en estas valoraciones. Se centra siempre en lo esencial y lo positivo, dando justo reconocimiento a quien parece merecerlo, sin entrar a valorar este lado oscuro —el más humano— de la ciencia.

Un ejemplo de todo esto es el origen de la idea de la expansión del universo, algo que todos los libros atribuyen a Hubble, cuando, en realidad, Hubble nunca llegó tan siquiera a entenderla o aceptarla. Incluso Einstein tardó años en comprender y aceptar la expansión

cósmica. Esto está muy bien explicado y documentado en este libro. Sorprendentemente, es algo muy poco conocido por el público o incluso por la mayoría de los investigadores expertos de este campo. Pero lo importante aquí no es tanto dar o quitar méritos a nadie, sino que se centra en el origen y la evolución de esta idea.

Esto me lleva a una tesis muy interesante del libro, que ahonda en lo que decía antes sobre la humanidad de la ciencia (ver Darkcosmos.es). Se trata de la ley epónima de Stigler (1980), por la cual ningún descubrimiento científico lleva el nombre de su descubridor original. En mi opinión esta tesis se aplica también a muchos otros aspectos de la actividad humana. Elizalde desmenuza varios ejemplos importantes de esta ley en su libro.

Una aportación clave a lo largo de todo el libro se destaca ya en su primer capítulo, que trata sobre lo que es una teoría científica. Esta aclaración, que puede resultar obvia o trivial a primera vista, no lo es. Es un punto crítico y clave para entender el progreso de la ciencia y sus descubridores. Elizalde nos explica de forma totalmente sintética que una teoría científica tiene dos patas: teoría y observaciones. Esta idea se

aplica y desarrolla brillantemente a lo largo del libro, donde se va detallando cómo una pata está coja sin la otra y qué papel juegan las matemáticas en todo ello. No en vano el profesor Elizalde es tanto físico como matemático y didacta. El libro nunca pierde este rumbo.

La *Cosmología moderna* del profesor Elizalde aporta también algo que difícilmente se puede encontrar en ningún otro texto. Se detalla de forma magistral e intuitiva, sin apenas ecuaciones, las física que hay detrás de muchas de las observaciones y la teoría del cosmos. Especialmente durante la primera revolución y, en particular, de la sorprendentemente hermosa —complicada y sencilla a la vez— teoría de la relatividad general, de cómo el universo tiene energía cero, lo que esto significa y de cómo se mide.

El libro está escrito con un estilo muy personal, directo y ameno, que caracteriza al autor y atrapa al lector. Leyéndolo recordé sus clases magistrales y cómo captaba nuestra imaginación y nos motivaba a aprender más y a querer ser mejores. Lo recomiendo encarecidamente.

Enrique Gaztañaga
Darkcosmos.es



Los físicos y Dios

Eduardo Battaner

Ed. Catarata, 2020, 125 págs.

Este es el segundo libro de la colección *Física y Ciencia para Todos* que la RSEF y la Fundación Ramón Areces están promoviendo con el fin de difundir el conocimiento de la Física y de temas de actualidad relacionados.

Eduardo Battaner es un prestigioso cosmólogo y astrofísico, actualmente profesor emérito en la Universidad de

Granada, donde ha sido catedrático durante muchos años. Sus dotes para la enseñanza y la divulgación científicas quedaron acreditadas por el premio RSEF-Fundación BBVA a la Docencia Universitaria que recibió en 2009. Escrito en un estilo desenfadado y ameno, su libro *Los físicos y Dios* recorre la historia de la Física concentrándose en las ideas religiosas de algunos de los grandes físicos y en la influencia que sus creencias —o increencias— y su ciencia han podido ejercerse mutuamente, tanto en el ámbito personal como en el contexto de la época en que vivieron. El libro trata de ser objetivo y neutral, dejando al lector que extraiga sus propias conclusiones.

El recorrido histórico que nos propone Battaner empieza con los jónicos y termina con los primeros físicos del siglo xx, dedicando el último capítulo al principio antrópico. Sostiene que, en general, los primeros filósofos y científicos griegos fueron poco explícitos sobre su concepción de Dios. Lo mismo puede decirse de los romanos, más ingenieros

que científicos. En los primeros siglos del cristianismo hubo algunos pensadores destacados, como san Agustín y san Isidoro, pero pronto el relevo de la ciencia pasó a los árabes a través de los expulsados cristianos nestorianos. Durante varios siglos, el mundo árabe tuvo el protagonismo de la cultura y la ciencia, cultivadas principalmente en Bagdad y Córdoba. En el plano científico hubo tensión entre una religiosidad radical, que consideraba que la naturaleza no podía tener leyes porque limitarían el poder de Dios, y una espiritualidad más racional y compatible con la ciencia, representada por Averroes.

Hacia el siglo xiii, el relevo del protagonismo cultural pasó a la Europa cristiana, con figuras destacadas como santo Tomás, san Alberto Magno y Alfonso X el Sabio. La ciencia estuvo en manos de clérigos hasta bien entrado el siglo xvi, cuando Copérnico es sucedido por Kepler y Galileo, seglares que siguieron siendo creyentes. Comienza entonces la andadura de la ciencia moderna bien conocida de todos.

De la lectura del libro se desprende que, hasta el siglo XIX e incluso principios del siglo XX, la mayoría de los grandes físicos fueron personas de convicciones religiosas aunque, como diríamos hoy, de sensibilidades variadas. Encontramos ahí, por ejemplo, el catolicismo de Copérnico, el protestantismo de Kepler, el jansenismo de Pascal, el arrianismo de Newton, el misticismo de Maxwell y Kelvin, el luteranismo de Heisenberg, el cristianismo no convencional de Planck y la ambigua religiosidad del panteísmo de Einstein. Dentro de la física, se alejan por primera vez de ese paradigma religioso el determinismo de Laplace, el agnosticismo de Boltzmann, el positivismo de Mach y el ateísmo de Marie Curie.

Según el autor, en el siglo XX aumenta la variedad de posturas religiosas y con ella la proporción de agnósticos y ateos, mientras disminuye el número de científicos dispuestos a hablar de religión, a favor o en contra, lo cual contrasta con el mayor apasionamiento

con el que sus predecesores vivieron estas cuestiones.

Sin duda es difícil escribir sobre una temática tan variada como la de este libro, pero hay algunos puntos mejorables que quisiera señalar. Parece desafortunado presentar a Descartes como alguien que, aun siendo un gran matemático, “no fue un buen físico”, cuando contribuyó de forma importante a formular el concepto de cantidad movimiento y, muy notablemente, fue el primero en señalar que, en ausencia de fuerzas, un cuerpo sigue un movimiento rectilíneo uniforme. Por otro lado, la escandalosa condena de Giordano Bruno estuvo motivada por sus ideas teológicas y no por sus ideas científicas que, además de puramente especulativas, solo repetían propuestas realizadas por el cardenal Nicolás de Cusa un siglo antes, como el mismo autor apunta.

Entre los muchos aspectos positivos del libro, se encuentra la mención de hechos históricos que todavía ignora demasiada gente. Destaco aquí solo

algunos: la formulación del principio de inercia en el siglo XIV; la contribución del dominico español Domingo de Soto (s. XVI) a la mecánica, enseñando que, en ausencia de rozamiento, los cuerpos caen siguiendo un movimiento uniformemente acelerado; la distinción entre creación y principio del universo, idea en la que insistieron Tomás de Aquino y, ya en el siglo XX, el sacerdote y cosmólogo belga Georges Lemaitre, creador de la teoría del Big Bang y quien siempre evitó identificar esa explosión inicial con la “prueba” de la creación.

En conjunto, el libro de Eduardo Battaner es un texto ameno que contiene abundante información y muchas reflexiones interesantes sobre un tema de gran relevancia histórica y cultural. Su lectura es entretenida y anima al lector o lectora a saber más sobre las cuestiones que en él se abordan.

Fernando Sols

Universidad Complutense de Madrid



In memoriam

M.^a Inmaculada de la Rosa García (1961-2021)

La profesora de la Universidad de Valladolid (Uva) M.^a Inmaculada de la Rosa García falleció en Madrid el pasado día 12 de mayo. Había nacido en Valladolid el 29 de mayo de 1961. Era la tercera de tres hermanos. Se licenció en Ciencias Físicas en 1984, y obtuvo el título de Doctor en el año 1989, ambas titulaciones por la Uva.

Su vida profesional estuvo centrada tanto en la docencia universitaria como en la investigación en el campo de la Óptica, desarrolladas ambas tareas en la Universidad de Valladolid y en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de Berlín.

Su actividad docente comenzó en el año 1984, cuando, terminada la licenciatura, se incorporó como Colaboradora al Departamento de Óptica de la Universidad de Valladolid. En 1996 fue nombrada Profesora Titular de Universidad y en 2016 obtuvo una cátedra de Óptica. Su docencia se desarrolló en las titulaciones de Física y de Óptica y Optometría. Siempre mostró un interés muy especial por la enseñanza de la Óptica y, en particular, por la parte experimental de las materias que impartía, aspecto que cuidó con muchísimo esmero y dedicación.

La actividad investigadora, que inició con su tesis doctoral en la Uva, se centró, en un principio, en el Diagnóstico de Plasmas por métodos ópticos,



trabajo experimental realizado en la Facultad de Ciencias. Tras el doctorado, realizó varias estancias en el PTB de Berlín, y se incorporó plenamente en las líneas de investigación de ese centro: espectroscopia láser en plasmas; espectroscopia de polarización; espectroscopia optogalvánica; láseres pulsados sintonizables de cristales no lineales UV-IR; Física de plasmas; descargas de cátodo hueco; óptica no lineal, etc. A su vuelta a Valladolid, y con la ayuda de varios proyectos I+D, creó un nuevo laboratorio de Espectroscopia Activa de Plasmas, lo que la permitió dirigir varias tesis doctorales, y, ya como investigadora principal, liderar

diferentes proyectos de investigación. La intensa tarea de investigación que llevó a cabo se puede resumir con algunas cifras: más de 50 publicaciones en revistas de alto índice de impacto, presentación de conferencias invitadas y comunicaciones a más de 100 congresos nacionales e internacionales, participación en más de 15 proyectos de investigación, etc.

Detrás de todo esto está la compañera, la amiga, la persona valiente que supo durante mucho tiempo luchar, en silencio, contra una enfermedad terrible e imparable. Y siempre con una sonrisa; siempre dispuesta a ayudar a un alumno, a un compañero, a un amigo... Esta fue nuestra querida Inma. Su recuerdo, en todos los sitios por los que pasó, durará mucho tiempo. La gran cantidad de mensajes de pésame que hemos recibido en estos días pone de manifiesto el aprecio que suscitaba entre amigos y colegas. Se ha ido demasiado pronto, pero nos ha dejado su ejemplo de entereza, valentía y lucha contra la adversidad. Hasta siempre, Inma.

M.^a Concepción Pérez García,
Santiago Mar Sardaña,
Ángel M. de Frutos Baraja
y Marco Antonio Gigoso Pérez
*Catedráticos de Óptica
(jubilados o en activo)
de la Universidad de Valladolid*

Pavel Winternitz (1936-2021)

El pasado 13 de febrero falleció en Montreal Pavel Winternitz, investigador del Centre de Recherches Mathématiques y profesor retirado de la Universidad de Montreal.

Pavel fue uno de los investigadores en Física Matemática que más contribuyó en la segunda mitad del pasado siglo y este primer cuarto del XXI al desarrollo de este campo, en particular de las aplicaciones de la teoría de grupos en Física, de una forma esencial, y que será recordado por sus colaboradores no sólo por sus trabajos, sino por su personalidad

acogedora y siempre dispuesta a discutir y a aportar sus ideas a los problemas en los que trabajaba, y a ayudar a todo tipo de personas sin importar su origen o sus circunstancias personales.

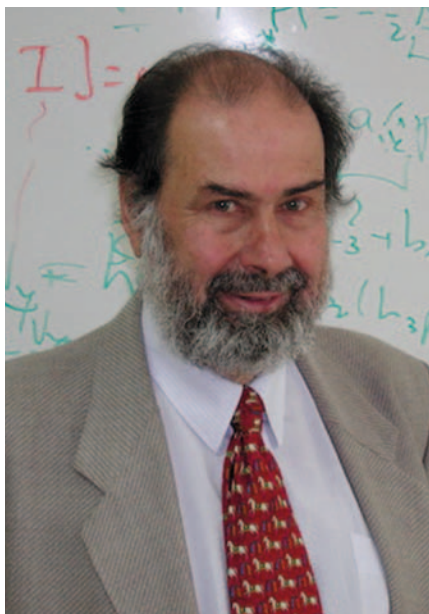
Para dar una idea de su trabajo y dedicación durante tantos años, basta decir que sus artículos de 1965 sobre la clasificación de sistemas superintegrables en dos dimensiones, con la introducción del potencial de Smorodinski-Winternitz, siguen siendo un ejemplo del tratamiento de estos sistemas, y que uno de sus trabajos de 2009, con la introducción del potencial de

Tremblay-Turbiner-Winternitz, relanzó los sistemas superintegrables al atraer la atención de numerosos investigadores y dar lugar a la publicación de decenas de trabajos sobre este sistema. Otra importante línea de investigación de Pavel, a lo largo de los últimos 20 años, ha sido el estudio de sistemas discretos de interés físico, y en particular, el desarrollo de técnicas muy novedosas, basadas en grupos de Lie, que permiten discretizar ecuaciones diferenciales preservando sus simetrías.

Pavel Winternitz había nacido en Praga en 1936, en cuya Universidad es-

tudió la licenciatura para trasladarse a Leningrado y Moscú, donde se doctoró. Regresó de nuevo a Praga, desde donde emigró en 1968 para pasar un tiempo en Inglaterra, y posteriormente en Estados Unidos. De allí se trasladó a Montreal, donde se integró en el recién creado Centre de Recherches Mathématiques, en el que se encontraba también su compatriota Jirí Patera, con el que colaboró intensamente en el referido campo de las aplicaciones de la teoría de grupos en Física. Allí permaneció hasta su fallecimiento, recibiendo a numerosos visitantes por periodos de tiempo diversos y provenientes de todas las partes del mundo desde Nueva Zelanda a España y desde jóvenes postdocs a curtidors investigadores. Pavel tenía un doctorado *honoris causa* por la Czech Technical University de Praga, y recibió la medalla Wigner en 2018.

Pero Pavel Winternitz fue también un viajero impenitente, que hablaba checo, alemán, ruso, inglés y francés y se hacía entender en italiano y español



(esto último debido en parte a sus nietos). De entre sus estancias en muchos países y ciudades, nos gusta recordar las que hizo en numerosas ocasiones a España, en particular en la Universidad Complutense de Madrid y en la de Va-

lladolid, y sus colaboraciones en cursos de verano y reuniones científicas.

Los que le conocimos personalmente, los que trabajamos con él en el campo de la física matemática, los que disfrutamos de sus ideas y soluciones, de su trabajo infatigable, de su sencillez y afabilidad, de sus anécdotas (como la ascensión al Pico Lenin o las excursiones en canoa por los ríos de Ontario), de sus puros y su coñac, los que tuvimos la oportunidad de conocer y tratar a su esposa Milada, a sus hijos Peter y Michael, no lo olvidaremos nunca.

David Gómez-Ullate
Universidad de Cádiz

Rafael Hernández Heredero
Universidad Politécnica de Madrid

Mariano A. del Olmo
Universidad de Valladolid

Miguel A. Rodríguez
Universidad Complutense de Madrid

Piergiulio Tempesta
ICMAT y Universidad Complutense de Madrid

Emiliano Hernández Martín (1941-2021)

En marzo de 2021 despedimos para siempre a nuestro profesor, maestro y amigo Emiliano Hernández Martín. Su ya delicado estado de salud en los últimos años no le permitió devolver el envite que le lanzó la pandemia de la COVID-19.

Quizá sería éste el momento de recordar, enumerar y glosar los méritos de Emiliano en su desempeño profesional como físico, profesor, impulsor de muchos y variados proyectos relacionados con cuestiones meteorológicas y campos afines, así como su inagotable interés en dinamizar varias de las anquilosadas estructuras universitarias. Pero todo ello será fácil de encontrar en revistas, archivos, artículos de periódicos y otros repositorios tan a mano en estos tiempos.

Estudiante tardío de Bachillerato, Emiliano se formó en Salamanca como químico¹, aunque sus primeros trabajos de investigación fueron en Matemáti-



cas² y después en Física, en Meteorología. En sus primeros cursos como joven profesor en la Universidad de Salamanca, dictó clases de varias materias,

desde la Física General a la Estadística para médicos, y elaboró su tesis doctoral bajo la dirección de José Garmendia (1923-2009), sobre el problema de la predicción de temperaturas mínimas. Poco después, ya casado con Teresa, con quien compartió toda su vida, decidió que su futuro profesional no pasaba por la universidad de Salamanca y se trasladó a la Complutense, donde obtuvo la cátedra de Física del Aire el año 1985, que desempeñó hasta su jubilación.

Fue en Madrid donde pudo desarrollar todo su potencial como formador no solamente de alumnos y doctorandos, sino también de una sólida escuela científica de Física de la Atmósfera, dedicándose a temas como la predicción de temperaturas extremas y su impacto en la salud, la aplicación del análisis de series temporales para la predicción meteorológica y ambiental, la evaluación de la calidad del aire a diferentes escalas, la importancia de las condiciones atmosféricas en los incendios forestales o la variabilidad climática. Campos en muchos de los cuales fue pionero en nuestro país. Fue un miembro muy activo de la RSEF, presidiendo durante largo tiempo el Grupo especia-

¹ A mediados de los sesenta, todas la universidades españolas tenían la carrera de Químicas, y en la mayoría de ellas era la única carrera científica disponible. La antes célebre Alma Mater Salmanticense no había escapado a ese destino.

² El trabajo fin de carrera de Emiliano (tesina, en la nomenclatura de la época) lo realizó con el matemático Norberto Cuesta (1907-1989) sobre el problema de la influencia en el cálculo de integrales racionales de los errores en las aproximaciones a las raíces de un polinomio.

lizado de Física de la Atmósfera, desde donde contribuyó a la organización de numerosas actividades.

Pero sin conocer más a la persona y, sobre todo, su carácter, no se entendería bien el inmenso valor de sus contribuciones a la Universidad como institución y, dentro de ella, a la Física de la Atmósfera en España.

Si se nos pidiera definir a Emiliano con sólo una palabra sería fácil: ante todo, fue siempre un vitalista. Su capacidad de trabajo, su entusiasmo y su curiosidad científica no tenían límites. Ese carácter le llevaba, en el introvertido y engreído mundo universitario, a mantener siempre abierta la puerta

de su despacho, donde siempre era bienvenido quien deseara conversar con él sobre cualquier asunto, ya fuera mundano o científico. Tanto daba: él sabía que a partir de una charla aparentemente banal siempre habría algo aprovechable, traducible después en ideas sobre las que trabajar. Y también sabía cómo distribuir esas tareas entre aquéllos que se dejaban seducir —y fuimos muchos— por su entusiasmo en cuestiones a veces insólitas y sobre cuyo interés rara vez se equivocaba.

La universidad española le debe su impagable contribución a la Física de la Atmósfera, pero quizás le debamos mucho más quienes compartimos con él

horas y dedicación a la docencia y la investigación. Su entusiasmo por el conocimiento, su generosidad en la difusión del mismo y su inequívoca vocación de servidor público son ejemplos de buen hacer científico que nunca olvidaremos.

Sobreviven a Emiliano su esposa Teresa y sus hijos Ángel y Marta.

José-Miguel Pacheco Castela
Real Academia Canaria de Ciencias.
Catedrático jubilado de Matemática
Aplicada de la Universidad
de Las Palmas de Gran Canaria
y Ricardo García Herrera
Catedrático de Física de la Atmósfera
de la Universidad Complutense de Madrid

Colección

FÍSICA Y CIENCIA PARA TODOS

La colección *Física y ciencia para todos* pretende ofrecer textos amenos, accesibles y al mismo tiempo científicamente precisos, que informen al lector sobre temas actuales de interés sobre la física y la ciencia en general, incluyendo su enseñanza y su historia.



Real
Sociedad
Española de
Física

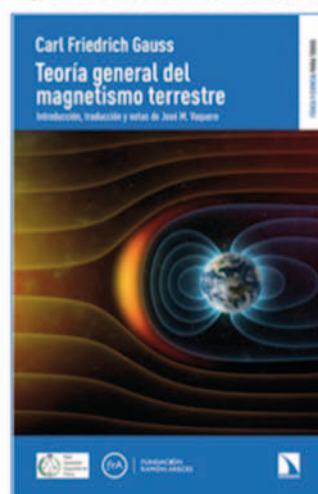


FUNDACIÓN
RAMÓN ARECES

<https://rsef.es/publicaciones/coleccion-fisica-y-ciencia-para-todos>



CATARATA



Noticias

La XXXII Olimpiada Española de Física

“Ojalá que en 2021 hablemos de una Olimpiada normal”, así cerrábamos esta nota resumen el año pasado. Lamentablemente, el deseo no se cumplió y otra vez el desarrollo de la Olimpiada, como el de tantas otras actividades, ha venido marcado por la pandemia. La XXXII Olimpiada Española de Física no pudo celebrarse en Lugo y de forma presencial como estaba previsto; en su lugar, se realizó en modo telemático repitiendo el planteamiento de la pasada edición. La Olimpiada transcurrió del 23 al 26 de abril. En ella concursaron noventa y tres estudiantes de ochenta y cinco centros distintos de todo el territorio nacional, seleccionados en treinta y tres fases locales, lo que es un éxito de participación dadas las circunstancias. Felicitamos a todos los participantes por su clasificación para la fase nacional y por la ilusión y el esfuerzo adicional en un curso académico tan complicado.

Los diez ganadores, medallistas de oro, fueron los siguientes:

1. Javier Sánchez-Bonilla Martínez (Colegio Retamar, Madrid).
2. Pablo Moreno García (IES Sierra Mágina, Jaén).
3. Brais Rodríguez Rodríguez (IES Río Cabe, Lugo).

4. Manuel Bartolomé Melguizo García (IES Jabalcuz, Jaén).
5. Bernat Ibáñez Martínez (Col·legi Sant Miquel dels Sants, Barcelona).
6. Diego Recio Calvo (IES San Mateo, Madrid).
7. Lucía Echevarría Soto (IES Cardenal López de Mendoza, Burgos).
8. Juan Álvarez Ordinas (Colegio Retamar, Madrid).
9. Patricia Rupérez Ferrández (Colegio Escolapios, Soria).
10. Julia Muñoz Torrico (IES Jaume Vicens Vives, Barcelona).

Estos estudiantes recibirán un premio en metálico del Ministerio de Educación y Formación Profesional, de acuerdo a la Convocatoria de Premios Nacionales de las Olimpiadas. Los cinco primeros clasificados participarán en la LI International Physics Olympiad, organizada por Lituania, que se celebrará a distancia desde España del 17 al 25 de julio. Los cuatro siguientes representarán a España en la XXV Olimpiada Iberoamericana de Física, prevista en formato telemático para el mes de noviembre. El listado completo de los premiados, medallas de oro, plata y bronce, y menciones de honor, puede consultarse en la página web: <https://rsef.es/medallero-de-la-oef/>. A todos les damos la enhorabuena.

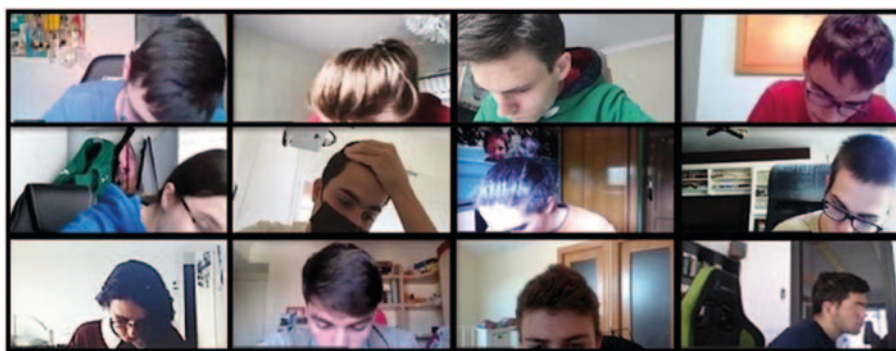
Las pruebas se realizaron durante la mañana del viernes 23 de abril a través de una plataforma de videoconferencia que permitió a los concursantes trabajar conectados desde su domicilio. Previamente, todos ellos recibieron por correo electrónico las instrucciones precisas sobre el desarrollo de la competición. Cada participante devolvió una cláusula ética comprometiéndose a un comportamiento honorable. El día de las pruebas, tras la bienvenida general y el recordatorio de las normas, los estudiantes fueron distribuidos en ocho aulas virtuales formadas por grupos de entre once y doce de ellos, vigiladas cada una por un miembro de la Comisión de Olimpiadas.

Las pruebas consistieron en tres problemas de cuarenta y cinco minutos de duración cada uno, con quince minutos intercalados para el escaneo y envío de las respuestas. Los enunciados se facilitaron de forma secuencial, programados para su descarga de la página web de la Olimpiada.

El primer problema trató del amarzaje de la estación espacial Perseverance, que llegó a Marte el pasado mes de febrero. En concreto, se estudió la segunda parte de los “siete minutos de terror” de la entrada en Marte en que la nave despliega el paracaídas cuan-



Ganadores de la XXXII Olimpiada Española de Física (de izquierda a derecha, fila superior: Javier, Pablo, Brais, Manuel, Bernat; fila inferior: Diego, Lucía, Juan, Patricia, Julia)



Resolviendo los problemas en las aulas virtuales

do lleva una velocidad de 420 m/s. La cuestión básica que resolver fue la del frenado del paracaídas en la atmósfera marciana, que es un 1 % menos densa que la nuestra.

El segundo fue un problema de electrostática donde se estudió la polarización de un átomo neutro inducida por un campo eléctrico externo, como el que produce una carga o un ion a cierta distancia del átomo. Se utilizó un modelo sencillo en que el campo externo, que crea fuerzas en sentidos opuestos sobre el núcleo y los electrones, no deforma la nube electrónica esférica, sino que desplaza su centro fuera del núcleo.

La parte experimental se propuso en el tercer problema. Consistió en la determinación de la permitividad relativa de una lámina de PVC, interpuesta entre dos placas metálicas a modo de condensador, a partir de los valores de la frecuencia de la tensión alterna aplicada y de las lecturas del voltímetro y del amperímetro conectados al circuito. Los estudiantes tuvieron que hacer el tratamiento gráfico y numérico, y el habitual cálculo de incertidumbres.

Los enunciados de los problemas con sus soluciones pueden descargarse en la web: <https://rsef.es/problemas-de-la-oef/>. Como es habitual en la Olimpiada, las pruebas, ajustadas al temario oficial de ESO y bachillerato, reunieron preguntas con grados diversos de dificultad sobre temas atractivos de física, y fueron planteadas para evaluar no sólo el nivel de conocimientos de los estudiantes sino, sobre todo, su capacidad de resolver problemas en situaciones nuevas.

La corrección de los ejercicios se realizó durante el fin de semana. Una vez tenidos los resultados y determinado el medallero, fueron aprobados

en reunión posterior por la preceptiva “Comisión de Verificación” formada por los miembros de la Comisión de la RSEF más un representante del Ministerio como secretario. El medallero se comunicó a todos los participantes y se publicó en la página web. La RSEF envió a los estudiantes un diploma de su premio o de su participación, según el caso, y a todos los medallistas su correspondiente medalla.

La sede de esta XXXII Olimpiada hubiera sido la ciudad de Lugo con el Campus Terra como anfitrión, circunstancia condicionada a la evolución de la epidemia, que fue muy desfavorable, como todos sabemos, lo que obligó a cancelar la competición presencial en la ciudad gallega. Expresamos nuestro agradecimiento a la profesora María Villanueva, al frente del Comité Local Organizador, al profesor Luis Miguel Varela y al resto de la Sección Local de Galicia, por todo su esfuerzo y las gestiones y preparativos ya muy avanzados. Esperamos que pronto Lugo pueda acoger la Olimpiada que se merece.

La estructura de la Olimpiada des cansa en sus fases locales, que se realizaron entre los meses de febrero y marzo. Nos congratulamos de que se celebraran la inmensa mayoría de ellas, todas excepto dos. Aprovechamos para agradecer la labor que hacen cada año las personas involucradas en estas fases, y especialmente ahora, cuando resulta aún más meritorio sacar adelante la Olimpiada. Este año, el premio del Concurso al Mejor Problema de las fases locales ha sido para el problema titulado “Midiendo la velocidad a oído”, propuesto por la Comisión Local de Navarra, a la que transmitimos nuestra felicitación.

A grandes males, grandes remedios. Pero hay que reconocer las dificultades

adicionales que conlleva el desarrollo de la Olimpiada en esta situación pandémica, como el reto de la ejecución telemática de las pruebas tanto en las fases locales como en la fase nacional. A ello se suma la burocracia creciente que vienen sobrellevando las Olimpiadas Científicas en los últimos tiempos. Un ejemplo es el registro, no sencillo, que todos los participantes están obligados a realizar en la sede electrónica del Ministerio, lo que supone un sobreesfuerzo para los propios estudiantes, sus padres, los organizadores locales y la gestión en la RSEF. Esperamos que estos procesos puedan simplificarse en el futuro.

Pese a todo, estamos muy satisfechos por haber evitado dos años en blanco y mantenido la continuidad y el espíritu de la Olimpiada. Ésta contribuye al fomento de vocaciones, la cultura científica y la motivación de muchos jóvenes. Y desde el punto de vista competitivo permite destacar y reconocer a estos brillantes estudiantes, además de hacer la selección de los equipos españoles para las competiciones supranacionales. La actividad ha sido posible gracias al esfuerzo de todos los organizadores de las fases locales y a la Comisión de Olimpiadas de la RSEF, por lo que me gustaría apreciar el trabajo de los compañeros que me acompañan en ella: Alejandro del Mazo, Juan Fco. Gómez, Juan León, Luis Roca, M.^a Carmen Carrión, Óscar Cabeza y Ramón Román. Aprovechamos para agradecer la labor de Itziar Serrano y Conchi Zocar, desde la Secretaría de la RSEF. Conste también el agradecimiento al Ministerio de Educación y Formación Profesional por la resolución de la convocatoria de Olimpiadas.

Finalmente, queremos dar las gracias de modo especial a José Adolfo de Azcárraga, quien en estos ocho años como presidente de la RSEF ha apoyado decididamente la Olimpiada, respaldando nuestra labor en la Comisión, compartiendo cuitas en un período de progresivos inconvenientes y defendiendo la actividad ante las altas instancias.

Ojalá que en 2022 hablemos de una Olimpiada normal.

Antonio Guirao Piñera
Presidente de la Comisión
de Olimpiadas de Física de la RSEF

XVI Feria-Concurso “Experimenta” ha vuelto, también en *streaming*

El pasado 25 de abril se celebró la XVI Feria-Concurso “Experimenta” de demostraciones y experimentos de física y tecnología organizada por la Facultad de Física de la Universidad de Valencia y dirigida a la enseñanza secundaria. Unas 800 personas pasaron a lo largo de la mañana por las instalaciones al aire libre de la ETSE, en el campus de Burjasot, habilitada con limitación de aforo y medidas de prevención. También hubo 1.750 personas siguiendo la retransmisión de la feria en tiempo real.

La Feria-Concurso “Experimenta” forma parte del conjunto de iniciativas “Aula Experimenta”, que estrechan la relación universidad-secundaria y están pensadas para involucrar a profesorado y alumnado en un aprendizaje de la física más activo, centrado en la observación de los fenómenos naturales, la experimentación y la comprensión de los principios físicos.

En particular, el objetivo de la Feria-Concurso “Experimenta” es que el alumnado ESO, Bachillerato y CC. FF. trabaje proyectos STEM experimentales con ayuda de su profesorado, intentando comprender los aspectos básicos de física presentes. Tras la inscripción en febrero y un periodo de asesoría e interacción con el comité científico, los proyectos admitidos se exponen y explican en la feria abierta al público. En esta se valora especialmente la comprensión que el alumnado tiene de su proyecto y la calidad de la divulgación. Al finalizar la mañana los grupos de jurados deciden los galardones de las cuatro categorías de concurso que incluye el premio de público, por votación, que

este año se ejerció en modalidad telemática sumando 4.222 votos.

En el acto de premiación celebrado el 14 de mayo en el campus de Burjasot, también en *streaming*, además de los cinco premios, se otorgaron siete menciones de honor. Los proyectos premiados en la categoría de “demostraciones



y experimentos de física”, fueron ¡Uy! *Que tensión* del IES Peset Aleixandre de Paterna, y *Electromagnetismo y resonancia para salvar vidas* del Colegio San José de Calasanz. En cuanto a la categoría de “Aplicaciones tecnológicas” fueron galardonados los proyectos *Clases sin COVID ni resfriados* del IES Ramon Llull y *PÉSER 1.0.: Geolocalizador-Orientador Laser*, del IES La Canyada (Paterna). El premio del público recayó en el proyecto *Cohete de Agua*, del Colegio Nuestra Señora del Pilar.

El día 17 de junio se retransmite el taller Experimenta TOP, en el que los centros de secundaria que deseen ins-

cribirse tienen la oportunidad de ver y entender algunos de estos proyectos, conocer más de cerca el proceso seguido hasta su finalización y formular preguntas en directo a los grupos premiados.

Esta iniciativa cuenta con la colaboración de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología-Ministerio de Ciencia e Innovación, y de numerosas entidades e instituciones, entre las que destaca la RSEF y la División de Enseñanza y Divulgación de la Física (DEDF).

Chantal Ferrer Roca



Teresa Rodrigo Anoro, homenajeada en la Universidad de Cantabria

El pasado 21 de mayo el Paraninfo de la Universidad de Cantabria (UC) acogió la celebración del homenaje a la catedrática de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la UC, investigadora del Instituto de Física de Cantabria (IFCA, centro mixto UC-CSIC) y miembro de la RSEF, Teresa Rodrigo Anoro, fallecida el pasado año.

Con las limitaciones de aforo y medidas sanitarias que exige la situación actual, el acto estuvo presidido por el vicerrector de Investigación y Política Científica de la UC, Luigi dell'Olio, y el vicepresidente de Investigación Científica y Técnica del CSIC, Jesús Marco de Lucas. El homenaje se pudo seguir en directo por Internet y contó con la asistencia de autoridades académicas y de las distintas administraciones regionales y locales.

El acto estuvo conducido por el director del IFCA, José Manuel Gutiérrez Llorente, que destacó “dos palabras que enmarcaría” sobre Teresa Rodrigo: “generosidad y humildad”. También hizo referencia a su “tenacidad, fuerza y liderazgo”, así como a la visión que tenía sobre política científica para fijar objetivos realistas. “Dejó en todos una huella imborrable”, apuntó el Prof. Gutiérrez, anunciando que se dará el nombre de Teresa Rodrigo Anoro a la sala de juntas del Instituto y a las becas que el IFCA y la UC convocan junto a la Fundación Mujeres por África para cursar el Máster de Física de Partículas y del Cosmos. Asimismo, el homenaje contó con la intervención de una de las hermanas de Teresa, Pilar Rodrigo, que pronunció un emotivo discurso en nombre de su familia.

Durante el acto se reprodujeron varios vídeos. El primero de ellos, de *laudatio*, repasando la brillante trayectoria profesional de Teresa Rodrigo, tanto en su faceta como investigadora, docente y divulgadora científica, como en la de promoción de la igualdad. En el segundo vídeo se recogieron testimonios de amigos y compañeros de la homenajeada, destacando tanto su valía pro-



fesional como sus valores personales. Comentaron la huella que la científica dejó en cada uno, con nostalgia y cariño, María Josefa Yzuel, Alberto Casas, Antonio Pich, Antonio Molinero, Manuel Aguilar, María Isabel Josa, Vaia Papadimitriou, Alberto Ruiz Jimeno, Mary Cruz Fouz, Teresa Barriuso, Saturnino Marcos, Guillermo Gómez-Ceballos, Begoña de la Cruz, el Grupo de Física Experimental de Altas Energías de la Universidad de Oviedo, Marcos Cerrada, Francisca Muñoz, Cristina Fernández, Lara Lloret, Pablo Martínez, Francisca García y Montserrat Cabré. Por último, se ha podido ver un tercer vídeo realizado como trabajo de clase por estudiantes de sexto de Primaria de la Escuela Pública Antònia Simó Arnó de Almacelles (Lérida), donde ella estudió. En esta pieza han recordado su figura y trayectoria.

En el acto también intervinieron Carmen García (IFIC, CSIC), Rocío Vilar (IFCA, CSIC-UC), Jacobo Konigsberg (Universidad de Florida) y Pilar López (ICMM, CSIC), que mostró la figura de Teresa Rodrigo como ejemplo para las científicas españolas y como pionera en su campo siendo mujer. Pilar López también habló de su lucha por destacar el trabajo y el papel de las mujeres en la ciencia y cómo ha servido de referente para las nuevas generaciones. El vicerrector de la UC Luigi dell'Olio cerró la sesión destacando la importancia para la sociedad de los “buenos profesores” y del “desarrollo científico y tecnológico”, vertientes ambas importantes de la homenajeada.

Fallecida en 2020, Teresa Rodrigo Anoro (Lleida, 1956) trabajó en experimentos punteros en el campo de las partículas elementales y en las grandes instalaciones donde se llevan a cabo, como el CERN, donde dirigió uno de los equipos que colaboró en el descubrimiento del bosón de Higgs, considerado uno de los mayores logros científicos de los últimos 50 años. La científica abrió camino a los físicos españoles en estas grandes instalaciones internacionales.

Luchadora incansable y firme defensora del papel de la mujer en el mundo científico, Teresa Rodrigo fue catedrática de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la UC e investigadora del CSIC. En 2016 asumió la dirección del IFCA, del que era investigadora y responsable del Grupo de Física de Altas Energías e Instrumentación. Coautora de un gran número de publicaciones científicas y libros, Teresa Rodrigo fue Medalla de Plata de la UC, doctora *honoris causa* por la Universidad Internacional Menéndez Pelayo (UIMP) y recibió el I Premio Julio Peláez a Pioneras de la Física, la Química y las Matemáticas, entre otros reconocimientos.

En 2010 fue nombrada presidenta de su Consejo de Colaboración Internacional, en el que participan instituciones de más de 40 países, y desde 2012 formó parte del Comité de Política Científica del CERN, siendo la primera física española en formar parte de este organismo y una de las pocas personas de esta nacionalidad que han asesorado en cuestiones científicas al mayor laboratorio mundial en física de partículas.

Además de en el CERN, trabajó en el Fermi National Accelerator Laboratory-FERMILAB, del Departamento de Energía de Estados Unidos, el laboratorio de física de partículas más importante de este país. Allí destacó su trabajo en el experimento Collider Detector-CDF, que llevó al descubrimiento del quark top en 1995, un hito en el campo de las partículas.

El vídeo completo del acto está disponible en <https://youtu.be/CWoLzMtc6cl>

José Edelstein recibe el Premio RAICES a científicos argentinos residentes en el exterior

El pasado 5 de mayo, el Prof. José Edelstein, miembro de la RSEF, recibió el Premio RAICES del Gobierno argentino. El acto de entrega tuvo lugar de forma virtual con la participación de los ministros de Relaciones Exteriores y de Ciencias de la República Argentina, Felipe Solá y Roberto Salvarezza, desde Buenos Aires, mientras el galardonado y la cónsul general, Silvina Montenegro, se conectaron desde la sede diplomática en Vigo.

El Premio a la Cooperación en Ciencia, Tecnología e Innovación RAICES se otorga desde 2010, y está destinado a investigadores y tecnólogos argentinos residentes en el exterior, que hayan colaborado activamente con el fortalecimiento del sistema argentino de ciencia, tecnología e innovación, pro-



moviendo la vinculación entre instituciones locales y del extranjero, para beneficio de las capacidades científicas y tecnológicas de ese país. En esta ocasión, el reconocimiento fue para ocho científicos con una distinguida trayectoria en distintas áreas del conocimiento, quienes fueron nominados en 2018, y a los que hasta ahora no se les había podido entregar el premio. En el caso de Edelstein se reconoció especialmen-

te su trabajo como fundador y coordinador de la red de física teórica Strings@ar, que funciona desde 2003 y reúne a un centenar de investigadores.

José Edelstein es investigador del Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) y profesor de la Universidade de Santiago de Compostela (USC). Nacido en Buenos Aires, realizó

la licenciatura en el Instituto Balseiro y se doctoró en la Universidad Nacional de La Plata. Ha realizado estancias posdoctorales en la USC, Harvard y el IST de Lisboa. Es autor de un gran número de artículos científicos en el campo de la física teórica de altas energías, entre ellos uno de los más citados de los últimos años, escrito junto a Xián Camanho, Juan Maldacena y Alexander Zhiboedov.

Sergio Carbajo, premio 2021 SPIE Early Career en reconocimiento a sus logros como investigador joven

El premio 2021 de la sociedad de óptica y fotónica internacional SPIE ha sido otorgado a Sergio Carbajo en reconocimiento a su capacidad de unificar física atómica y molecular, óptica cuántica y ciencia de rayos X ultrarrápidos. Este premio se otorga anualmente a un investigador joven que haya realizado contribuciones de gran impacto en ciencia y tecnología fotónica.

Sergio trabaja con su equipo en la universidad de Stanford y el laboratorio nacional estadounidense SLAC en el avance en tecnologías bioquímicas, médicas y del medio ambiente. La excepcional trayectoria científica de Sergio se basa en su experiencia y resultados basados principalmente en el desarrollo y uso de fuentes ultrarrápidas de fotones. El láser de rayos X de



electrones libres (*X-ray free electron lasers* [XFEL] en inglés), es uno de los inventos científicos más emblemáticos de nuestro tiempo, capaz de abordar grandes cuestiones fundamentales en física, química y biología. Sergio y su equipo, que consta de varios estudiantes, profesores e ingenieros en Stanford y SLAC, desarrollan y usan XFELs para rodar “películas moleculares” con las cuales observan y reproducen la dinámica

de electrones, átomos y moléculas en movimiento tal y como ocurren en la naturaleza. Estas películas les permiten descifrar las funciones y propiedades de nuevos materiales, y sistemas biológicos y físicos para el desarrollo de nuevas tecnologías en computación cuántica, biotecnología y ciencias del medio ambiente, entre muchas otras.

En su breve y productiva trayectoria, Sergio ha recibido numerosos reconocimientos, como la Japan Society for the Promotion of Science Fellowship en 2019, el premio SRI 2018 Young Scientist Award, y el premio PIER Helmholtz Foundation Dissertation Award en 2015.

Dpto: <https://lcls.slac.stanford.edu/l4a-rd/>

Bio: <https://profiles.stanford.edu/scarbajo>

Holografía: 50.º Aniversario del Premio Nobel de Dennis Gabor

Los días 18 y 20 de mayo de 2021 tuvo lugar el ciclo de conferencias online “Holografía: 50.º Aniversario del Premio Nobel de Dennis Gabor” (https://youtube.com/playlist?list=PLoGFizEtm_6ivXS3fVQLxfY_ft9KjvIBv), en cuya organización colaboró la Sección Local de Aliante de la RSEF.

En 1971 el ingeniero húngaro afincado en Inglaterra Dennis Gabor fue galardonado con el Premio Nobel de Física por la invención y desarrollo del método holográfico. Para conmemorar el cincuenta aniversario de este premio se ofrecieron dos sesiones como parte de este ciclo, con cerca de 80 asistentes en cada una de ellas.



La primera conferencia, “¿Dónde está el tren?: Una aproximación a los orígenes de la holografía”, fue impartida por Augusto Beléndez Vázquez, catedrático de Física Aplicada de la UA, miembro de la RSEF y director de la *Revista Española de Física*. En esta conferencia se

realizó una revisión histórica de los orígenes de la holografía, haciendo especial énfasis en las contribuciones de Gabor, Denisyuk, Leith y Upatnieks.

La segunda sesión, titulada “Holography: Engineering the future”, fue impartida por el Prof. John T. Sheridan, de la School of Electrical and Electronic Engineering (University College Dublin) y en ella se mostraron algunos modelos electromagnéticos de la holografía, aplicaciones de la holografía en ciencia e ingeniería y perspectivas de futuro de la técnica holográfica.

Ambas sesiones fueron presentadas por Inmaculada Pascual, catedrática de Óptica de la UA y miembro de la RSEF.

Tercera edición del acto central del Día Internacional de la Luz en la ciudad de Terrassa

Cuando en abril del 2019 el Comité Español del Día Internacional de la Luz (DIL) aceptó la propuesta de la Facultad de Óptica y Optometría de Terrassa (FOOT) para organizar el acto central del DIL en el año 2020, nadie se podía imaginar que tendríamos que esperar más de dos años en hacer posible la celebración, y que viviríamos unas condiciones tan distintas a las previstas en el primer momento. A pesar de las dificultades que todos conocemos, entre el 12 y el 16 de mayo del 2021, se han podido realizar la mayoría de actividades que habíamos preparado para este evento.

En su inicio, para la organización del acto central, se creó un comité local con la participación de profesores de la FOOT (María S. Millán, Jesús Armengol, Genís Cardona), del Ayuntamiento de Terrassa a través de su Servicio de Universidades, de la UPC, con representación del equipo rectoral y del equipo de comunicación del Campus de Terrassa, y del patronato de empresas de la FOOT, presidido por la Prof.^a Elisabet Pérez. El



Concierto de inicio de la Ruta de la Luz a cargo del *ensemble* de saxofones de la Escuela Municipal de Música y Conservatorio de Terrassa. (Fotografía: Rafel Casanova.)

programa de actividades buscaba mostrar la transversalidad de la luz en múltiples ámbitos, llegar a un público amplio y variado, y poner de relieve las numerosas entidades e instituciones de la ciudad y sus alrededores que tienen vinculación con la luz y sus tecnologías.

Finalmente, el acto central ha englobado más de 35 actividades distintas, desde conferencias divulgativas, debates, un café científico para jóvenes investigadores, espectáculos culturales y lúdicos, exposiciones de temática variada, in-

tervenciones de sensibilización a la población, talleres educativos y visitas a centros y empresas especializados dirigidos a centros escolares de todos los niveles educativos, un concurso fotográfico, etc. Todos los actos se han adaptado a los requerimientos de la situación sanitaria del momento, adquiriendo, en la mayoría de casos, un formato híbrido, con asistencia presencial limitada, pero también con retransmisión en directo vía telemática. El acto más participativo ha sido la Ruta de la Luz, en la cual

10 monumentos de la ciudad se han iluminado especialmente para esta ocasión, y en cada uno de ellos un código QR daba acceso a una historia sorprendente sobre la luz. Esta conmemoración ha significado, para muchas personas, recobrar cierta actividad presencial, después de este largo periodo de virtualidad. De forma general, en todos los actos de esta celebración se estima que han participado de forma directa más de 1.600 personas.

Elisabet Pérez

Ángel Rubio, nombrado *fellow* de la European Physical Society

Ángel Rubio Secades, Director del Departamento de Teoría del Instituto Max Planck para la Estructura y la dinámica de la materia en Hamburgo y miembro de la RSEF, ha sido nombrado *fellow* de la European Physical Society (EPS) por sus contribuciones pioneras a la física computacional del estado sólido, en particular por el desarrollo de marcos ampliamente utilizados para la descripción de la estructura y dinámica de sistemas electrónicos correlacionados, así como sus predicciones de propiedades del material a escala nanométrica y en dimensiones reducidas.

El Prof. Ángel Rubio se doctoró en Física en 1991 por la Universidad de Valladolid (UVA) y su trabajo postdoctoral lo realizó en la Universidad de California en Berkeley (EE. UU.). Después de unos años



en la UVA, en 2001 se trasladó a la Universidad del País Vasco (UPV/EHU) y desde 2015 es Director del Departamento de Teoría del Instituto Max Planck para la Estructura y la dinámica de la materia en Hamburgo. El Prof. Rubio tiene un excelente historial de publicaciones relaciona-

das con la teoría y la modelización de las propiedades electrónicas y estructurales. Ha recibido numerosos premios y reconocimientos, entre los que se encuentran: Sir Allan Sewell Escuela de becas de Ciencias, Universidad de Griffith, Australia; 2004, Fellow of the American Physical Society: Materials Science Division 2005 Friedrich Wilhelm Bessel Premio, Humboldt Stiftung, Alemania; Fellow of the American Association for Advanced Science (AAAS) 2010; y dos proyectos del "European Research Council Advanced Grant" 2011 (DYNAmo) y 2016 (QSpec-NewMat). Premio Rey Jaime I de Investigación Básica (2014), Foreign Associate member of the U. S. National Academy of Sciences (2014) y Miller Visiting Professor, University of California at Berkeley. En 2016 recibió la Medalla de Física de la RSEF y la Fundación BBVA.

Resolución del Premio Salvador Senent 2021

El pasado 30 de abril de 2021 se falló la VIII edición del Premio Salvador Senent, convocado por el Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química, común a la RSEQ y la RSEF. El premio se concede al mejor trabajo científico especializado, de revisión o de carácter divulgativo, relacionado con la didáctica o con la historia de la física o de la química, y en esta ocasión los galardonados han sido **D. José Pastor Villegas** y **D. Jesús F. Pastor Valle**, por su trabajo "En el bicentenario de la fundación del Museo Nacional del Prado": (I) Aspectos químicos de la Ilustración Española en la villa y corte de Madrid y en la Ciudad de México. (II) Aspectos químicos de algunas pinturas relacionadas con la historia de la química. Ambos artículos están publicados en los dos últimos números de *Anales de Química*.

José Pastor (Cáceres, 1945) estudió Magisterio, Licenciatura en Ciencias (Sección Químicas) y Doctorado en la Universidad de Extremadura (UEX). Actualmente

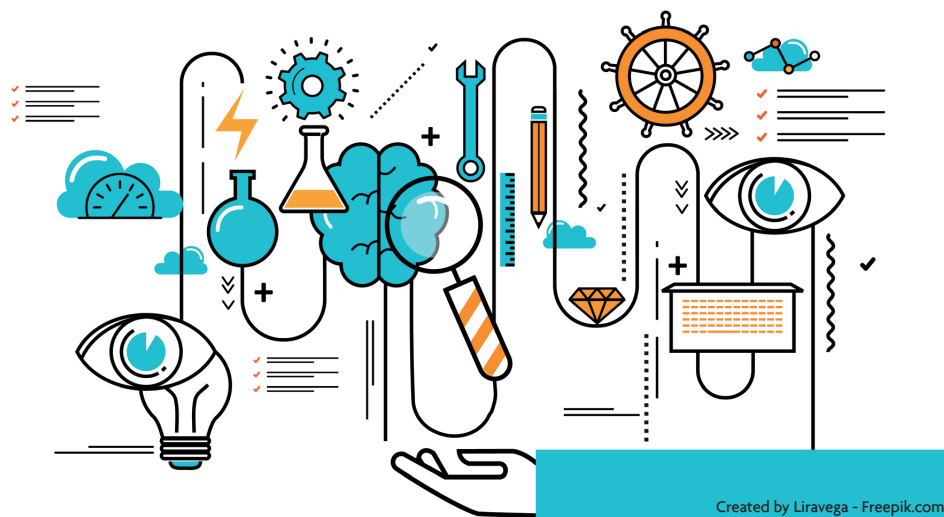


jubilado, ha ejercido la docencia en todas las etapas educativas, desde educación primaria a universidad, incluyendo doctorado y Universidad de Mayores. Ha investigado sobre Historia de la Ciencia y la Tecnología, con atención especial a asuntos de Extremadura y América

Jesús Pastor (Cáceres, 1976), antes de sus estudios universitarios redactó

el trabajo "Páginas científicas hispano-americanas", con el que participó en la Expedición Aventura 92, dirigido por Miguel de la Quadra-Salcedo y Gayarre, visitando diversos lugares de España y varios países hispanoamericanos. Ingeniero Industrial en la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz (UEX). Ejerce la profesión de ingeniero y tareas docentes.

Esperamos tus trabajos
para la **Revista Española de Física** en:
revistadefisica.es



Las contribuciones, que han de tener un **tono divulgativo**, pueden tener cabida en alguna de nuestras secciones, aunque destacamos: “Temas de Física” para contenidos relacionados con investigación y “Notas de Clase” para trabajos de enseñanza.

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

Real Sociedad Española de Física. Junta de Gobierno

PRESIDENTE

José Adolfo de Azcárraga Feliu

VICEPRESIDENTES

Íñigo Luis Egusquiza Egusquiza
Elena Pinilla Cienfuegos

SECRETARIO GENERAL

Fernando Sols Lucia

TESORERA

María Varela del Arco

EDITOR GENERAL

Miguel Ángel Fernández Sanjuán

VOCALES

M.^a L. Amieva Rodríguez, F. Bartolomé Usieto,
A. Beléndez Vázquez, M.^a C. Carrión Pérez
M.^a V. Fonseca González, J. Guisasola Aranzábal,
J. Herrero Albillos, J. M.^a Pastor Benavides
R. Pérez Pérez, R. Ranchal Sánchez, A. Robles
Arques M.A. Sanchis Lozano, J. Santamaría
Sánchez-Barriga M. Santander Navarro, Á. Sastre
Santos, L. Viña Liste

PRESIDENTES DE SECCIONES LOCALES

M.^a del Mar Sánchez López (Alicante)
F. Bartolomé Usieto (Aragón)
J. Pisonero Castro (Asturias)
J. Rodríguez Fernández (Cantabria)
M. A. López de la Torre (Castilla-La Mancha)
J. Jesús Ruiz Lorenzo (Extremadura)
L. M. Varela Cabo (Galicia)
C. García Recio (Granada)
J. F. Echávarri Granado (La Rioja)
V. Madurga Pérez (Navarra)
I. L. Egusquiza Egusquiza (País Vasco)
M.^a J. Santos Sánchez (Salamanca)
V. Losada Torres (Sevilla)
A. Cros Stotter (Valencia)
M. Santander Navarro (Valladolid)
J. Buceta Fernández (Sección Exterior)

PRESIDENTES DE DIVISIONES Y GRUPOS ESPECIALIZADOS

J. Herrero Albillos (División de Física de la Materia Condensada DFMC-GEFES)
A. Dobado González (División Física Teórica y de Partículas-DFTP)
J. M.^a Pastor Benavides (División de Enseñanza y Divulgación de la Física-DEDF)
A. Fernández Muñoz (Grupo de Estudiantes de la RSEF, GdeE)

J. B. Parra soto (Adsorción, GEADS)
V. J. Martínez García (Astrofísica, GEAS)
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, GECL)
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 Zafrilla (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, GEOCONL)
M. A. Herranz Estudillo (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. Tabarés Vázquez (Física de Plasmas, GEFP)
A. Guerrero Conejo (Reología, GEREO)
M. Martínez Piñeiro (Termodinámica, GET)
G. Llosá 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