

Revista
Española
de

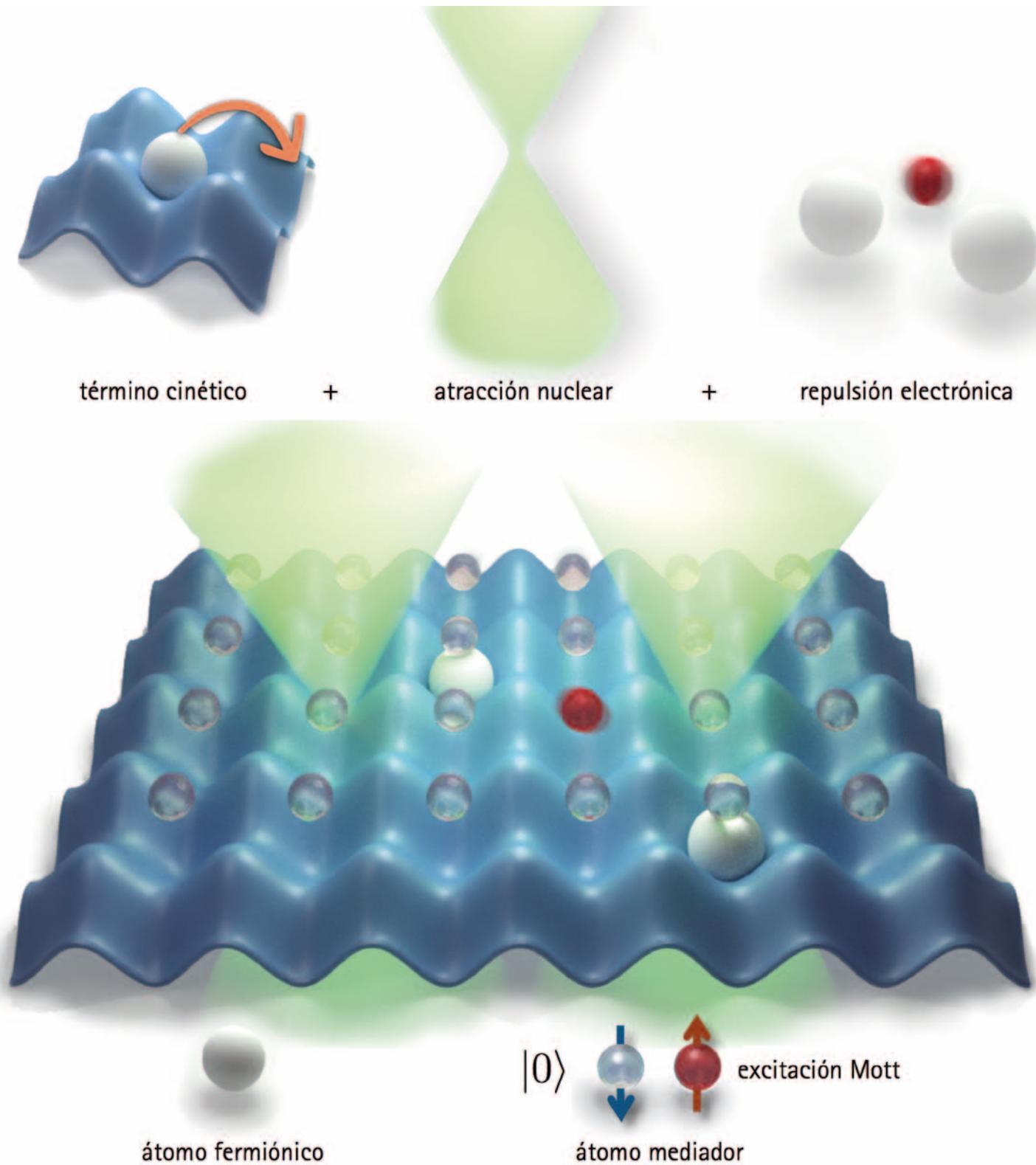
FÍSICA



Real
Sociedad
Española de
Física
R.S.E.F.

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

Volumen 35 • Número 1 • 2021



- Temas de Física
- Notas de clase
- Puntos de interés

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



FECYT
FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



RED DE UNIDADES DE
CULTURA CIENTÍFICA
Y DE LA INNOVACIÓN

REVISTA DE FÍSICA (REF)
www.revistadefisica.es

Es una publicación de la Real Sociedad Española de Física, que es miembro de la Federación Iberoamericana de Sociedades de Física (FEIASOFL) 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 Vergnieri (DIPC)
José Ignacio Iñíguez 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 (IIF-CSIC)
Andrés Santos Reyes (UNEX)
Jesús Miguel Seoane Sepulveda (URJC)
Isabel Tanarro Onrubia (IEM-CSIC)
Mariam Tórtola Baixauli (IIFC, UV)

Composición y edición:

Disegraf Soluciones Gráficas, S. L.
<http://www.disgrafs.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
Sidlab

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

Hamiltoniano electrónico en una molécula: átomos fermiónicos atrapados en una red óptica juegan el papel de los electrones de una molécula. Su salto a sitios vecinos simula su energía cinética, la modulación en intensidad de láser externo induce la atracción nuclear a ciertos puntos de la red. Una especie atómica adicional media una repulsión efectiva entre los electrones simulados, que decrece con la distancia entre ellos. Ilustración del esquema experimental asociado [1] (véase artículo "Simuladores cuánticos analógicos" en la sección Temas de Física).

[1] JAVIER ARGÜELLO-LUENGO, ALEJANDRO GONZÁLEZ-TUDELA, TAO SHI, PETER ZOLLER y J. IGNACIO CIRAC, "Analogue Quantum Chemistry Simulation," *Nature* 574, 215-218 (2019).

ÍNDICE

Temas de Física

- 1 Acerca del Big Bang y el origen del Universo, Emilio Elizalde
- 5 Simuladores cuánticos analógicos: Una herramienta para entender la materia que nos rodea, Javier Argüello Luengo y Alejandro González Tudela
- 11 Newcomb, Benford y la aristocracia del primer dígito, Andrea Burgos y Andrés Santos
- 15 Turbulencia y multifractalidad ochenta años después de la teoría de Kolmogorov 1941, Carlos Granero-Belinchón
- 20 ¿Estás vistiendo un metamaterial? Explorando la física de los tejidos de punto, Denís Arribas Blanco

Notas de clase

- 25 Detección de exoplanetas por el método de los tránsitos: Una simulación en arduino, David Pamos Ortega
- 28 Midiendo el vapor de agua de la atmósfera con un termómetro infrarrojo, Alejandro J.P. Aparicio, Javier Vaquero-Martínez, María Cruz Gallego, Manuel Antón y José Manuel Vaquero
- 30 Rozamiento estático: ¿Fuerza o condición?, Miguel Ángel Rodríguez Valverde y María Tirado Miranda
- 34 Visualización de la ley de Snell a partir del principio de Fermat con el módulo *turtle* de Python, Fernando Blasco, Juan Manuel Pastor y Javier Galeano
- 40 Puntos de interés
- 46 Hemos leído que...

Reseñas de libros de interés

- 48 Más allá del Big Bang, Iván Agulló Ródenas
- 49 ¿A qué altura está el cielo?, Jorge Mira Pérez
- 50 El país de los sueños perdidos, José Manuel Sánchez Ron
- 51 Visión a todas las distancias, Pablo Artal Soriano

In memoriam

- 52 Martinus J. G. Veltman (1931-2021)
- 54 Jack Steinberger (1921-2020)

Noticias

- 56 Olimpiada Iberoamericana de Física Virtual 2020
- 58 Luis Ibáñez, Premio Nacional de Investigación "Blas Cabrera"
- 58 Laura Lechuga, Premio Nacional de Investigación "Juan de la Cierva"
- 59 José Capmany, Premio Nacional de Investigación "Leonardo Torres Quevedo"
- 59 Nazario Martín, Premio Nacional de Investigación "Enrique Molés"
- 60 José Cernicharo, Premio Miguel Catalán a la carrera científica
- 60 Isabel Guillamón, Premio Miguel Catalán a investigadores menores de 40 años
- 61 Pablo Jarillo Herrero, Premio de la National Academy of Sciences al Descubrimiento Científico
- 61 Pascuala García Martínez, Fellow de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica
- 62 Eleonora Viezzer, Premio Manuel Losada Villasante a la Excelencia en la Investigación Científica
- 62 Antonio Guirao, premiado por la Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia
- 63 José María De Teresa, Presidente de la división de Física de la Materia Condensada de la EPS
- 63 María Josefa Yzuel, Premio Presidencial 2021 de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica
- 64 Clara Cuesta, Premio a la Investigación L'Oréal-Unesco 2020
- 64 Luis Vázquez Martínez, Premio Liouville

Acerca del Big Bang y el origen del Universo

No hubo ninguna explosión en el inicio del cosmos

Emilio Elizalde

En este artículo se intenta describir, de manera fácilmente inteligible y siempre de acuerdo con la física actual, el denominado Big Bang: qué fue lo que en realidad pudo ocurrir cuando se originó nuestro universo.

*Y Dios dijo: "Hágase la luz". Y se hizo la luz.
Y Dios vio que la luz era buena, y la separó de la oscuridad.
Y a la luz Dios la llamó "Día", y a la oscuridad "Noche".
Y hubo un atardecer y una mañana, el primer día.*

Del libro del Génesis.

La idea, que hoy sabemos que es errónea, de que hubo un gran estallido en el origen del cosmos sigue tan arraigada en la conciencia popular que resulta extraordinariamente difícil cambiarla. Aunque los físicos/as debemos intentarlo. Y eso es precisamente lo que se pretende en este breve artículo. Contiene una descripción actualizada, incorporando todos los conocimientos científicos que poseemos hoy en día, sobre lo que realmente pudo ocurrir cuando se originó nuestro universo.

Introducción

Sea cual sea la lectura que se haga de ellos, resulta difícil no dejarse cautivar por la extraordinaria belleza de los versículos del Génesis. No importa que los eruditos hayan descubierto que fueron adaptados de descripciones mucho más antiguas de la mitología mesopotámica; ni que podamos objetar que esta narrativa no se sostiene de ninguna manera con los conocimientos que se enseñan actualmente en las escuelas y universidades. De hecho, hay muchísimos libros escritos, con orientaciones muy diversas, donde se establecen estas comparaciones, en las que aquí no voy a entrar (haré sólo una, eso sí). Para escoger un par, de libros, daré las referencias de los de Brooke [1] y Suau [2].

¿Quién no ha oído a estas alturas hablar del Big Bang? Esas dos palabras, en inglés, son las que de alguna manera han sustituido en nuestro bagaje cultural al relato del Génesis sobre la creación del cosmos. Otra cosa es la parte de la misma narración bíblica que se refiere a la creación de los seres vivos, y del hombre y de la mujer. De ello se han hecho cargo las teorías darwinianas.

Al Big Bang me he referido ya numerosas veces. He abordado el tema en diversas conferencias, artículos y presentaciones y éste fue precisamente el título de mi primera contribución al *blog* que tengo en *Divulcat* [3]. Pero, día a día me doy cuenta, hablando incluso con compañeros/as de

profesión, de que aún me he ocupado demasiado poco del tema. La idea (completamente errónea con arreglo a lo que ahora sabemos) de que hubo un gran estallido en los inicios del cosmos sigue tan arraigada que cuesta mucho cambiarla. Está claro que a ello contribuye especialmente el significado literal del término *Big Bang*. Antes de dar, una vez más (esperando que sea la definitiva), la descripción científica actual de lo que sucedió en el origen del universo, la que está de acuerdo con nuestros conocimientos actuales (habiendo entrado ya en el año vigesimoprimer del nuevo milenio) repetiré el relato que encontramos aún en todas partes y que los científicos hemos visto que no se corresponde con los hechos. Corresponde a la ciencia de hace la friolera de noventa años, la de los años treinta del siglo xx, y mucho ha llovido desde entonces en todos los campos del conocimiento, y en éste en particular.

El relato del gran estallido (que jamás tuvo lugar)

Iré directamente al grano y no repetiré lo que ya he explicado en otras ocasiones con mayor detalle (véase, en particular, mi libro [4]). La descripción (falsa), extraordinariamente popular y que se vende como si tuviera una base científica sólida, es la que sigue (Fig. 1). Todo el universo se reducía, en el principio de los tiempos, a un "*átomo primigenio*" o "*huevo cósmico*" (enormemente pequeño, con respecto al universo actual, pero muy grande en comparación a un átomo de verdad). Tenía, por supuesto, una densidad y una temperatura mucho mayores de lo que podamos imaginar. En el origen del tiempo, este átomo estalló con gran estruendo, esparciéndose la materia y la energía que contenía por todo el universo y dando origen además a la expansión que todavía ahora detectamos los cosmólogos. Esta explosión descomunal recibe el nombre de *Big Bang*, palabras que literalmente significan en inglés "*gran explosión*". ¡Y eso es todo!

Tal descripción se debe a Georges Lemaître; se remonta, repto, a la década de 1930 y tiene muy poco que ver con lo que sabemos ahora. Sin embargo, al ser tan simple, algo misteriosa, desde luego, pero creíble, y como el modelo cosmológico sigue recibiendo el nombre de modelo de Big Bang y, como es bien cierto que Big Bang significa de hecho gran explosión, resulta que no hay manera humana de borrar esta caricatura inverosímil y totalmente equivocada de lo que ocurrió en el origen



Fig. 1 La gran explosión en el origen del universo ¡que nunca ocurrió!

del cosmos. Y la seguimos encontrando en libros, encyclopedias, artículos, páginas web y blogs por doquier. Ni siquiera los especialistas se atreven a desmontarla, a veces cuando hablan para el gran público, según yo mismo he podido comprobar en diversas ocasiones; bien sea por no ir contra corriente o por falta del tiempo necesario para embarcarse en una descripción detallada sobre este punto, cosa que no resulta sencilla. Y la burda simplificación se sigue imponiendo. Todo ello me entristece mucho y hace que considere mi deber perentorio insistir una vez más sobre esta importante cuestión.

Para empezar, disfrazándome del genial Dalí e imitando su voz engolada me atrevo a formular la pregunta: ¿De dónde salió la gallina que puso aquel “huevo cósmico”?

Ahora más en serio, pocos años después de la formulación de este modelo, los físicos nucleares se dieron cuenta ya de que no había por donde cogerlo. Era imposible que toda la materia-energía del cosmos pudiera haber estado concentrada (yo prefiero decir *jibarizada*) en un átomo primigenio, por muy diversas razones que aquí no detallaré¹. Y, para terminar este apartado, es bueno saber que ya cuando Fred Hoyle, el mismísimo *autor* de la expresión “Big Bang”, pronunció estas palabras por primera vez, expresó muy claramente que *no se refería* en absoluto a un estallido de la materia en el sentido anterior (lo que pretendía precisamente era burlarse del modelo de Lemaître), sino a una gigantesca *dilatación del espacio* que debería ser capaz de “crear”, a partir de la propia geometría del espacio, “toda la materia y energía del universo” (fueron sus palabras textuales). Pero es que esto resulta ya muchísimo más *difícil* de comprender. ¡El propio Hoyle creía que tal fenómeno era de hecho del todo imposible! Pero Alan Guth, con su teoría de la *inflación cósmica*, demostró treinta años más tarde de que sí se podía conseguir, cuando menos en teoría. La dificultad de comprender tal procedimiento

y teoría es la razón por la que tantos/as retoman la versión caricaturesca y errónea, que puede entender hasta un niño o una niña bastante pequeños.

Como he explicado en uno de mis artículos [5], se ha descubierto recientemente que el primero en intentar crear materia y energía a partir del mismísimo espacio fue el propio Albert Einstein, el autor de la Teoría de la Relatividad General. De hecho, tal posibilidad se hallaba ya implícita en las ecuaciones de su teoría [4]. Lo hizo a principios de 1931 pero, desgraciadamente, no logró su propósito, ya que no fue capaz de encontrar un mecanismo específico para llevarlo a cabo en la práctica. Pretendía conseguirlo con ayuda de la constante cosmológica y vio que no era posible. No cayó en la cuenta de que debía haber involucrado un campo cuántico de creación de materia (como sí hicieron Hoyle, Bondi y Gold diecisiete años más tarde). Y el manuscrito con sus cálculos lo dejó abandonado para siempre en un cajón de su escritorio. Pero no seguiré por aquí, pues he prometido ser muy conciso e ir directamente al grano, a diferencia de otras ocasiones, en que puede que me hayan perdido los detalles.

Haré, en lo que sigue, una narración muy breve y convenientemente actualizada sobre lo que sí que pudo suceder en el origen de nuestro universo. Debo advertir que no es esta la única descripción aceptada, ya que hay otras que son igualmente posibles. Por otra parte, no todo lo que voy a contar ha sido estrictamente comprobado experimental u observacionalmente (lo concretaré luego).

El Génesis, de acuerdo con los conocimientos científicos del año 2021

En el principio no había casi nada: una *pizca de materia* en un espacio-tiempo minúsculo, que acababa de aparecer de una “espuma cuántica” previa en la que aún no se distinguían ni el espacio ni el tiempo. Y también había un campo cuántico, el de *Higgs*, y otro, el *inflatón*, listos para actuar. Una *chispa* (la naturaleza precisa de la cual todavía no hemos fijado) creó las condiciones para que el inflatón produjese, de repente y durante un infinitésimo de tiempo, una expansión gigantesca (que llamamos *inflación cósmica*) del tejido de ese espacio minúsculo (Fig. 2). Y que fue creando más y más espacio, e hizo que el universo, que era al principio poco mayor que un átomo ordinario, pasara a tener ya el tamaño de un guisante, o de un pomelo, más o menos. Y que se continuó expandiendo todavía, aunque a un ritmo cada vez más lento. Al frenarse la tremenda expansión inflacionaria, casi toda aquella energía colossal del propio espacio se transformó en los componentes elementales de la materia y energía actuales: *quarks, gluones, leptones, fotones*, etc., que llenaron uniformemente el aún muy pequeño universo. Aunque una parte de dicha energía se empleó en calentarlos (lo que llamamos *reheating*). Todos aquellos constituyentes elementales formaron una sopa primigenia enormemente caliente, que recibe el

1 De nuevo, véase en particular mi libro [4].

nombre de *plasma primordial* (o plasma de quarks y gluones). Un plasma, eso sí, absolutamente oscuro, dado que los fotones permanecían confinados: cuando alguno lograba salir de una partícula material, no podía dar dos pasos sin ser ya atrapado por otra, que lo absorbía. Y así una y otra vez.

Era un universo completamente oscuro, sin luz. Y aquel plasma latía al unísono, como si fuese todo él un corazón universal (a los latidos se les llama *oscilaciones acústicas de los bariones*, BAO). Los cambios que se fueron produciendo en el plasma durante los primeros segundos y minutos del universo se hallan magníficamente descritos en libros como el de Weinberg [6] y también en Wikipedia [7].

Las condiciones del plasma primordial que constitúa el universo, cuando éste tenía tan solo unas pocas milbillonésimas de segundo de vida se han podido reproducir con enorme precisión en laboratorios de física de partículas como el LHC del CERN, en Ginebra. Cuando el cosmos tenía ya una cien-milésima de segundo, se formaron los protones y neutrones, y cuando alcanzó el segundo de vida los neutrinos se desacoplaron del plasma y pudieron ya viajar por todo él. No así los fotones, todavía. Actualmente se está intentando obtener información sobre esta etapa del universo a partir de neutrinos primordiales, que comienzan a detectarse en ciertos experimentos.

Desde los diez segundos hasta los tres minutos, aproximadamente, protones y neutrones constituyeron los núcleos atómicos más ligeros (de hidrógeno, deuterio, helio, etc.), proceso que recibe el nombre de *nucleosíntesis primordial* [6]. Tomó muchísimo más tiempo, hasta que se pudieron formar los primeros átomos. Gran parte de la física de partículas conocida está involucrada en el estudio de estos procesos, que aquí he simplificado mucho [7]. Es un campo de estudio fascinante.

Y el universo continuó expandiéndose, a un ritmo ya normal, muy parecido al que ahora detectamos. Y era por ello cada vez menos caliente, ya que la propia expansión lo iba enfriando, poco a poco. Hasta que, cuando tenía entre 370 y 380 mil años, ocurrió lo que se describe de manera magistral en el primer versículo del Génesis. Súbitamente ¡se hizo la luz! La temperatura había bajado por debajo del umbral de ionización del átomo más ligero, el de hidrógeno. Súbitamente, estos átomos precipitaron a gran escala, y aquel plasma tan oscuro, el universo entero, se hizo de pronto transparente a los fotones, que pudieran viajar, por vez primera, de extremo a extremo del aún muy joven cosmos (Fig. 3)².

² Es preciso recordar que los átomos están prácticamente vacíos. El de hidrógeno lo podemos esquematizar a escala (muy rudimentariamente) así: si el átomo fuera del tamaño de un campo de fútbol, el núcleo (protón) tendría el tamaño de un guisante colocado en el centro del campo, y el diminuto electrón, casi invisible, menor que una pequeña mota de pol-



Esta fue la primerísima luz del universo, una luz maravillosa, radiación de cuerpo negro homogénea e isotrópica que ahora hemos observado con los satélites COBE, WMAP y Planck: la que denominamos *radiación cósmica de fondo* (CMB), y que a muchos nos cautiva sin remedio. Es, repito, la primera luz del cosmos, la del primer día del Génesis; la que nunca se apaga y continúa viajando por todo el universo actual.

Y además lleva grabadas las huellas indelebles del último latido del plasma primigenio. Y las huellas amplificadas de las fluctuaciones cuánticas de la época preinflacionaria. Y las huellas, en resumen, de todas las vicisitudes ocurridas en las épocas pasadas de la historia del universo, mientras la luz ha ido viajando hasta nosotros, y que cada vez somos más capaces de descifrar.

Decidme pues ahora si esta maravilla que hemos descubierto no es mil veces más impresionante que una simple explosión, por fuerte que hubiese sido el estallido. De todo lo que antecede tengo escritas sendas narraciones en forma poética: *Big Bang inflacionario* [8] y *La primera luz del Cosmos* [9].

Comentarios

Tal como había prometido, he hecho un relato actualizado con bien pocas palabras. Mi descripción es sólo a muy grandes rasgos³, pero contiene lo esencial de todo lo que sabemos hoy en día. Deja abiertos aún muchos interrogantes, pero así es la Ciencia: nunca esperemos de ella una verdad absoluta, definitiva. El que la busque deberá acudir a otras fuentes.

Al igual que antes he inquirido sobre dónde estaba la gallina que había puesto el huevo cósmico, ahora se me podría preguntar: ¿De dónde salieron la espuma de espacio-tiempo preprimigenia, y la brizna de materia inicial, el campo de Higgs, el inflatón,

Fig. 2 Ilustración de la etapa de inflación cósmica en 1+1 dimensiones. El universo es unidimensional y, en un instante dado, se reduce a una circunferencia, cuyo radio va aumentando exponencialmente con el tiempo, lo cual tiene lugar durante una pequeñísima fracción de segundo. La dimensión temporal coincide con el eje de simetría.

vo, iría girando por encima de las gradas alrededor del campo. Todo lo demás es absoluto vacío. Al formarse los átomos de hidrógeno de manera simultánea en todo el universo, este se volvió prácticamente transparente.

³ Y no he mencionado nada de las importantes etapas posteriores, como la de *recombinación*, la formación de las primeras galaxias, ni de la *nucleosíntesis estelar*, de la que Hoyle fue pionero y que dio origen a los elementos pesados [4]. Tanto el principio como la conformación posterior del universo es muchísimo más rica y compleja que un banal gran estallido.

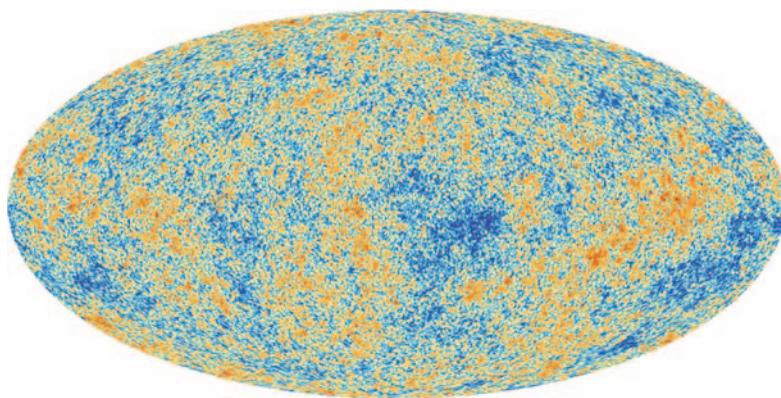


Fig. 3 Mapa de la radiación cósmica de fondo (CMB) observada por el satélite Planck de la Agencia Europea del Espacio (ESA). Se trata de la primera luz del cosmos, que fue emitida cuando tenía entre 370 y 380 mil años y que sigue viajando por todo el universo. Lleva impresas las huellas del último latido del plasma primordial, así como las huellas amplificadas de las fluctuaciones cuánticas de la época preinflacionaria, y las huellas, en definitiva, de todas las vicisitudes ocurridas en las épocas pasadas de la historia del universo, y que cada vez somos más capaces de descifrar.

etc.? Pero, dejémoslo bien claro, por favor; una cosa es ya meter todo el universo jibarizado, escondido en el sombrero de copa, y otra muy distinta introducir tan sólo unos pequeñísimos elementos, que ni con los microscopios más potentes imaginables seríamos jamás capaces de ver. Nuestra chistera está muchísimo más vacía que la que nos muestra el mago Pop. Y a partir de ellos, de estos elementos nimios, y con un “simple” gran soploido del globo del espacio, hemos sido capaces de crear un universo enorme y todo su contenido material y energético. Y a coste *cero*, aunque este punto no tengo ahora tiempo de explicarlo. Quien quiera saber más, puede leer mi nuevo libro, recientemente publicado: *Cosmología moderna: desde sus orígenes* [4].

Obsérvese que mi descripción se sitúa en la frontera más lejana de la física fundamental que conocemos. No se puede afirmar aún que la inflación cósmica haya sido comprobada del todo. Pero se tienen muchos y muy importantes indicios de que ocurrió. Y las teorías alternativas (de un universo pulsante, en cosmología de lazos, etc.) lo que hacen es intentar recrear en esencia sus mismos efectos, aunque partiendo de otros principios. Quede claro que lo que sí hemos comprobado sin lugar a duda alguna es que, del átomo primigenio y del gran estallido que muchos mal informados siguen afirmando que se produjo, no hay ni el menor rastro; eso sí que es cien por cien seguro que no sucedió jamás.

Otra observación, esta para las lectoras y lectores avanzados, es que no he mencionado en ningún lugar los *multiversos*. No queda excluida, ni mucho menos, la posibilidad de que el universo total sea infinito y que todo lo que he descrito hasta aquí sucediera simplemente en una pequeña región de un grandioso espacio-tiempo multidimensional; que sólo un pequeño puntito del mismo inflacionase, etc. En otras palabras, que mi descripción se refiera únicamente a *nuestro* universo. Y que, como el nuestro, pueda haber toda una multitud ingente de otros universos, creándose y desapareciendo por todas partes. Las teorías de *supercuerdas* y *branas* admiten de hecho estas posibilidades, incluso las favorecen. Pero, de prueba física, real, no hay ninguna, hasta ahora.

Como siempre, tengo que terminar recordando que nos queda aún mucho camino por recorrer, antes de poder llegar a responder las preguntas anteriores que he planteado. No tenemos una teoría que unifique la física cuántica con la gravedad. Pero ya he mencionado otras veces que es muy posible que esa teoría tan deseada, aunque la encontráramos, quizás todavía no sería suficiente para llegar al mismísimo punto inicial, $t=0$, a la *singularidad* del Big Bang, que aparece en las teorías de gravitación actuales (y por la que, entre otras cosas, a Roger Penrose le concedieron el Premio Nobel de Física 2020). Lejos de desanimarnos, ello nos empuja a seguir investigando.

Por último, es muy saludable de vez en cuando echar la vista atrás, y observar, pausadamente, de dónde venimos y todo lo que hemos conseguido entender hasta ahora. Lo que vamos avanzando, paso a paso, año tras año, siglo tras siglo. Y no obcecarse, una y otra vez, en las mismas cuestiones de respuesta muy difícil y que es bien posible (como muestra nuestra experiencia de descubrimientos pasados) que aún se tarde cien o doscientos años, si no más, en poder llegar a contestarlas.

Y es completamente seguro que, para entonces, habrán aparecido nuevas preguntas en busca de respuestas.

Bibliografía

- [1] JOHN HEADLEY BROOKE, *Ciencia y religión. Perspectivas históricas* (Santander, Sal Terrae, José Pérez Escobar [trad.], 2016, 1991 [ed. original]).
- [2] TEODOR SUAU, *Del caos al cosmos: lectura de Gènesi 1-11* (Publicacions de l'Abadia de Montserrat, ISBN: 9788484156116).
- [3] <https://www.encyclopedia.cat/divulcat/big-bang>.
- [4] EMILIO ELIZALDE, *Cosmología moderna: desde sus orígenes* (Ed. Catarata, Madrid, 2020).
- [5] EMILIO ELIZALDE, “Some issues on the foundations of Modern Cosmology, Gravitation and Quantum Physics”, *Universe* **6**, 189 (2020).
- [6] STEVEN WEINBERG, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*, (Basic Books, Nueva York, 1993, 2nd ed.); (Basic Books, Nueva York, 1977, 1st ed.).
- [7] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Chronology_of_the_universe.
- [8] EMILIO ELIZALDE, https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/inflacionariBB_esp_r.pdf
- [9] https://www.ice.csic.es/personal/elizalde/eli/La%20primera%20luz%20del%20Cosmos_1.pdf

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



Simuladores cuánticos analógicos: Una herramienta para entender la materia que nos rodea

Javier Argüello Luengo y Alejandro González Tudela*

La mecánica cuántica exige grandes recursos computacionales para describir problemas de muchas partículas que interaccionan entre sí. Nuevos dispositivos experimentales, conocidos como simuladores cuánticos, permiten estudiar estos sistemas sin las limitaciones de los métodos de cálculo convencionales.

Numerosos problemas, tanto prácticos como fundamentales, requieren comprender cómo se comportan los electrones que forman un material o participan en una reacción química. Al estar descritos por leyes cuánticas, los métodos numéricos clásicos se encuentran muy limitados para describir su comportamiento. El desarrollo de simuladores cuánticos capaces de reproducir las leyes físicas de estos sistemas ofrecen una alternativa para estudiar estos fenómenos, ayudando con ello a entender la materia que nos rodea.

¿De qué está hecha la materia y cómo surgen sus propiedades?

Entender cómo y de qué está compuesto el mundo que nos rodea —yo incluso nosotros mismos!— ha despertado la curiosidad de filósofos y científicos desde tiempos remotos. Ya en la antigua Grecia, Demócrito, Leucipo y Epicuro postularon que la materia estaba formada por un conjunto de partículas indivisibles (en griego *átomon*) que se diferenciaban entre sí en forma y tamaño, y que se agruparían para formar los distintos materiales que conocemos. Esta hipótesis atomística fue muy avanzada a su tiempo, ya que hubo que esperar hasta finales del siglo XVIII para que se sentaran las bases científicas de la teoría atómica que se ha ido perfeccionando hasta nuestros días a través de experimentación y el desarrollo de nuevas teorías, como la mecánica cuántica.

Hoy en día, sabemos a ciencia cierta que la materia está formada efectivamente por átomos, aunque estos están compuestos a su vez por partículas más elementales: protones y neutrones, que forman el núcleo del átomo, y los electrones, que se encuentran deslocalizados alrededor del mismo. También sabemos que es la configuración de estos electrones, y la interacción entre ellos, lo que determina cómo los átomos se agrupan para formar entidades más complejas, las moléculas, que se unen a su vez para formar la materia tal y como la conocemos. Además, gracias al desarrollo de la mecánica

cuántica, podemos escribir de manera muy precisa las leyes que gobiernan la formación de moléculas y sus propiedades, estudiadas por el campo que se conoce como *química cuántica*. Podría parecer, por tanto, que ya no existen grandes misterios y preguntas abiertas a la hora de descifrar y entender las propiedades de la materia, pero ¿es realmente así?

Como imaginará el lector, si estamos escribiendo este artículo es porque la realidad dista mucho de ser tan simple.

El gran reto de la química cuántica

El problema central de la química cuántica consiste en descubrir cuál es la nueva estructura electrónica de equilibrio cuando varios átomos se juntan para formar una nueva molécula, ya que esta configuración determinará en última instancia sus propiedades. El interés de esta cuestión se expande más allá del mundo académico, ya que estos problemas aparecen de manera recurrente en la industria química, p. ej., para acelerar la búsqueda de nuevos fármacos, o desarrollar mejores fertilizantes. Se trata por tanto de un problema extremadamente importante tanto a nivel teórico como práctico.

¿Cómo se resuelven estos problemas? Como los núcleos de los átomos son mucho más pesados que los electrones, una primera aproximación consiste en asumir que estos están fijos al calcular la estructura electrónica. La formulación del problema es por tanto simple: tenemos que calcular el estado de equilibrio (o estado fundamental) de los electrones teniendo en cuenta su energía cinética, el potencial de Coulomb atractivo generado por los núcleos fijados a una posición y, por supuesto, la interacción de Coulomb repulsiva entre electrones. Sin embargo, su resolución es extremadamente difícil incluso para moléculas de un tamaño moderado.

La complicación principal es que los problemas de muchos cuerpos en mecánica cuántica exigen unos recursos computacionales que aumentan exponencialmente con el número de partículas que queremos describir. Esta explosión exponencial de recursos es muchas veces descrita como la *maldición exponencial* de la mecánica cuántica, por las dificultades de cálculo que impone para entender los fe-

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

Fig. 1. (a) Arco natural en el parque nacional del Glen Canyon, Utah. (b) Arcos de entrada al Palau Güell, Barcelona. (c) Reconstrucción de la maqueta funicular utilizada por Gaudí para diseñar la cripta de la colonia Güell, expuesta en el museo de la Sagrada Familia, Barcelona [1].



nómenos emergentes en problemas con muchas partículas involucradas. En muchos casos, las correlaciones entre esas partículas son débiles, lo que permite realizar aproximaciones y describirlos eficientemente con métodos numéricos. Desafortunadamente, esto no es fácil en el caso de los problemas de química, ya que las interacciones entre electrones son de largo alcance y generan fuertes correlaciones entre ellos. Es por ello que una de las principales líneas de trabajo dentro de la química cuántica consiste precisamente en encontrar mejores aproximaciones y descripciones efectivas del problema para poder resolverlo numéricamente. A pesar de los increíbles avances teóricos, como la teoría del funcional de la densidad, la resolución de este tipo de problemas es la que más volumen de cálculo ocupa en los superordenadores actuales, siendo uno de los principales cuellos de botella en el desarrollo de muchos procesos industriales relevantes, así como de otras muchas preguntas fundamentales. Nos encontramos por tanto en una situación muy paradójica: conocemos con precisión las leyes que gobiernan estos procesos, pero no podemos predecirlos con las herramientas que tenemos. ¿Podemos hacer algo para evitar esa maldición?

Echando la vista atrás: Simuladores analógicos “clásicos”

Si uno reflexiona, la falta de recursos computacionales para resolver problemas complejos ha sido la norma, y no la excepción, a lo largo de la historia; y eso no ha impedido la realización de grandes avances en la humanidad.

Un ejemplo muy claro de esto es el campo de la arquitectura: ¿acaso los antiguos romanos necesi-

taban ordenadores para calcular la estabilidad de los acueductos que han llegado a nuestros días? ¿O los egipcios para construir sus pirámides?

Para ilustrar mejor los métodos alternativos que se usaban vayámonos a una época más cercana, y pongámonos por un momento en la piel del arquitecto Antoni Gaudí. Siguiendo las corrientes modernistas de su época, para él, la verdadera originalidad consistía en regresar a lo natural. Para ello, deseaba plasmar en su obra la geometría de los arcos que observaba en la naturaleza donde, talladas en la roca por la acción del viento y el agua, únicamente aquellas formas que fuesen estables y funcionales permanecerían en pie para ser observadas (Figura 1(a)). Las buenas propiedades estructurales de estos arcos naturales ya eran conocidas desde hacía tiempo, y es que, traduciendo las presiones estructurales en tensiones, la forma más estable para un arco que soporta su propio peso es la curva descrita por una cadena que cuelga sus extremos, denominada *catenaria*. Siendo la curva más estable y funcional, Gaudí deseaba convertirla en la base de estructuras más complejas (Figura 1(b)). Se planteó así el desafío de diseñar la Cripta de la Colonia Güell de manera que sus columnas, muros y cubiertas siguiesen los principios estructurales de las catenarias. Si bien comprender las leyes que describen un arco catenario es relativamente sencillo, encontrar la configuración más estable para una serie de arcos acoplados entre sí es una tarea ardua, mucho más compleja que lo que la capacidad de cálculo de comienzos del siglo xx permitía.

Como uno comprueba hoy visitando Barcelona, esta limitación computacional no sería un

obstáculo para el ingenio de Gaudí. Su solución: simular aquello que aún no podía calcular. Para ello, exploraría al límite la conexión entre el arco catenario y una cuerda que cuelga de sus extremos. Asistido por sus ayudantes, levantaría una maqueta invertida donde cientos de cordeles simulaban los arcos y columnas de su construcción, y pequeños saquitos llenos de perdigones representaban las cargas estructurales que el edificio debía soportar (Figura 1(c)). Al estar sometida a la misma configuración de fuerzas que la construcción final, Gaudí podía trasladar las formas de esta maqueta directamente al plano, sin necesidad de realizar ningún cálculo intermedio. Había encontrado un simulador mecánico para su problema mecánico, con lo que la naturaleza que tanto admiraba le proporcionaba directamente una solución a su problema estructural. Esta es la belleza y la fortaleza de la simulación “analógica”.

Simulación analógica de problemas cuánticos

Sabiendo del éxito que esta estrategia ofreció a Gaudí y otros tantos arquitectos, ¿por qué no buscar también nosotros simuladores para nuestros problemas cuánticos? Esta es una idea que ha rondado la cabeza de varias generaciones de físicos. En una conferencia pronunciada en Caltech en 1981 [2], Richard Feynman postuló que, si fuera posible diseñar un sistema cuántico que *simulara* las interacciones del problema de muchos cuerpos que uno quiere estudiar, los recursos computacionales, tales como su tamaño o tiempo de cálculo, no explotarían exponencialmente. Esta intuición fue formalizada por Seth Lloyd en 1996, cuando demostró que era posible construir un simulador cuántico universal para resolver eficientemente problemas de muchos cuerpos [3]. El funcionamiento del simulador que propuso es parecido al de un ordenador: se divide el tiempo de ejecución en intervalos cortos, durante los que se ejecutan sucesivamente puertas lógicas entre bits (cuánticos) hasta conseguir simular el proceso deseado. Por este motivo se conoce a este tipo de sistemas como *simuladores cuánticos digitales* u *ordenadores cuánticos*. Gracias a los grandes avances tecnológicos en el campo, se ha conseguido ya construir los primeros prototipos que demuestran su funcionamiento, incluso para el estudio de problemas químicos [4]. Sin embargo, la principal limitación de estos simuladores cuánticos digitales es que, si no se dispone de protocolos de corrección de errores —y estos no estarán disponibles en un futuro cercano—, los errores se van acumulando en la simulación, restringiendo mucho la capacidad actual de cálculo de los mismos [5]. Llegados a este punto, la pregunta lógica es: ¿qué podemos hacer mientras llegan estos ordenadores cuánticos?

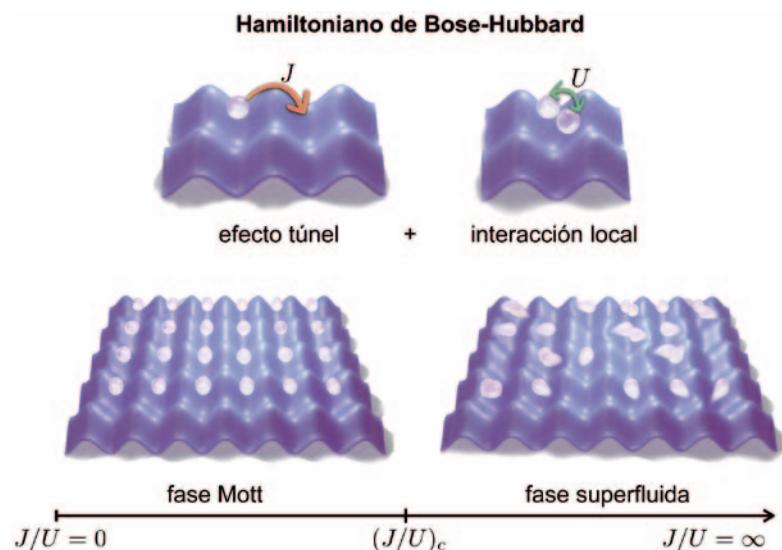
Recogiendo el espíritu de Gaudí, una idea sería intentar construir "maquetas" analógicas en las

que simular el problema de manera global y simultánea, en lugar de romperlo en piezas y ejecutarlo de manera digital. Estas “maquetas” cuánticas es lo que se conoce como *simuladores cuánticos analógicos*. A diferencia de sus equivalentes digitales, suelen estar diseñados para resolver sólo un tipo de problema, p.ej., química o transporte electrónico. Sin embargo, gracias a eso, son mucho más resilientes al ruido, permitiendo obtener resultados impresionantes ya con la tecnología actual. Esto les ha llevado a convertirse en una de las áreas más activas dentro del campo de las tecnologías cuánticas. En los siguientes párrafos explicaremos al lector cómo se construyen estas “maquetas” en el mundo cuántico, tomando como ejemplo la plataforma con la que nació el campo: átomos fríos atrapados en redes ópticas.

Simulación cuántica analógica con átomos fríos en redes ópticas

A finales del siglo XX se produjeron grandes avances en el control cuántico de los sistemas atómicos. Por un lado, se desarrollaron técnicas para enfriar y atrapar átomos usando láseres (Premio Nobel 1997 a Chu, Philips y Cohen-Tannoudji). La idea consistía en que la interacción del láser con las transiciones ópticas de los átomos ejercía fuerzas sobre ellos que podían llegar a disminuir su movimiento (y con ello su temperatura), e incluso atraparlos en ciertas regiones del espacio. Además, usando esas técnicas se consiguió por primera vez condensar átomos alcalinos en su estado fundamental (condensado de Bose-Einstein, Premio Nobel 2001 a Ketterle, Cornell y Wieman). Motivados por esos avances experimentales, un equipo de investigadores de la Universidad de Innsbruck se dio cuenta en 1998 de que si, en lugar de atrapar átomos en potenciales ópticos homogéneos, se hacía en potenciales periódicos, como los que aparecen al hacer interferir un láser con su reflejo en un espejo, el movimiento de estos átomos

Fig. 2. El modelo de Bose-Hubbard describe bosones sin espín que saltan en la red a primeros vecinos con ratio J , y experimentan una energía extra U cuando dos bosones coinciden en un mismo sitio de la red. Cuando esta interacción domina sobre el efecto túnel, el sistema se encuentra en una fase de Mott, en la que los átomos se localizan, siendo cada sitio ocupado por un número fijo de átomos. A medida que el efecto túnel domina, el sistema transiciona a una fase superfluida en la cual los átomos se deslocalizan y la ocupación sigue fluctuaciones de Poisson.



reproducía la dinámica de un modelo de muchos cuerpos denominado modelo de Bose-Hubbard [6]. Este modelo está definido por dos términos: la energía cinética de los átomos al saltar de un sitio a otro de la red (J), y la interacción que aparece cuando dos de ellos *colisionan* en el mismo sitio de la red (U) (Figura 2). La competición entre estos dos términos da lugar a una transición de fase cuántica entre una fase superfluida donde la energía cinética es la dominante a una segunda fase en la que cada sitio es ocupado por exactamente un sólo átomo, conocida como aislante de Mott, donde ahora es la energía de colisión la dominante. Lo interesante del simulador propuesto por el equipo de Innsbruck es que, sin más que cambiar la intensidad de los láseres, uno podría hacer que los átomos pasaran de una fase a otra de manera dinámica. Sería cuatro años más tarde cuando un grupo del Instituto Max Planck de Óptica Cuántica liderado por Immanuel Bloch observó experimentalmente esa transición de fase cuántica usando átomos de rubidio, dando el pistoletazo de salida al campo de la simulación cuántica analógica con átomos fríos [7].

Estos sistemas basados en átomos fríos atrapados en redes ópticas tienen características que los hacen muy interesantes como simuladores cuánticos analógicos. Por un lado, permiten observar la física de manera muy distinta a la del sistema real que queremos estudiar, ya que las escalas de tiempo de estos simuladores son en general mucho más lentas que las del sistema real (del orden de milisegundos, frente a procesos con tiempos característicos de femtosegundos). Por otro lado, se han desarrollado herramientas, como el microscopio de gas atómico, que permiten observar y controlar cada átomo individualmente. La combinación de ambas posibilidades hace de los átomos fríos atrapados en redes ópticas un sistema muy útil a la hora de explorar física fuera del equilibrio, en general muy difícil de caracterizar numéricamente, y donde estos simuladores han comenzado a dar muestras de su capacidad para superar los mejores métodos numéricos actuales [8].

Otra característica importante es que se trata de sistemas muy *versátiles* que permiten simular problemas relevantes más allá del considerado en la propuesta original:

- Por ejemplo, basta atrapar un isótopo distinto del átomo que tenga carácter fermiónico (p.ej., K^{40}) para simular modelos de Fermi-Hubbard [9]. Estos pueden describir el movimiento de los electrones en sólidos sujetos al potencial periódico de los iones, así como a interacciones entre ellos. Este modelo es muy difícil de simular numéricamente, debido a su carácter fermiónico, y además despierta mucho interés, pues se cree que guarda relación con la física de los superconductores de alta temperatura, cuyo mecanismo está aún por descubrir.

- Además, cuando los átomos se encuentran en el régimen de aislante de Mott, se pueden estudiar problemas de magnetismo cuántico definiendo un pseudo-spin en base a la presencia/ausencia de un átomo en un sitio de la red [10]. Estos pseudo-espines pueden saltar de un sitio a otro debido a fluctuaciones cuánticas en la energía cinética, dando lugar a interacciones de canje entre los mismos.
- Cambiando la configuración de los láseres, pasando por ejemplo de redes cúbicas a hexagonales, uno puede simular fermiones de Dirac [11], como en grafeno; o incluso obtener campos Gauge efectivos que describan modelos con transiciones de fase topológicas, como el modelo de Haldane [12] o el de Harper-Hofstadter [13].
- Atrapando mezclas de átomos fermiónicos y bosónicos [14], es posible simular modelos de altas energías en regímenes donde los efectos no perturbativos dificultan hacer predicciones numéricas.

Como habrá notado el lector en este punto, la química cuántica no aparece aún en esa lista de campos donde la simulación cuántica analógica se ha empezado a aplicar. Dada la relevancia del campo, debe de haber un motivo que haya ralentizado su exploración. ¿Cuál?

El reto de usar átomos fríos para simular química cuántica

Siguiendo el ejemplo de los primeros simuladores cuánticos, una idea natural es utilizar átomos fermiónicos ultrafríos para jugar el papel de los electrones. A diferencia de los electrones de una molécula, que pueden ocupar cualquier posición deseada, estos átomos a bajas temperaturas están atrapados en una red óptica. Esto impone un discretizado en las posiciones posibles que, a medida que se toma una red suficientemente grande, se aproximan cada vez más a la dinámica original en el continuo. Es por ello que el salto de los átomos de un sitio a otro de la red debido al efecto túnel simula la energía cinética de los electrones de manera bastante natural (Figura 3).

Una vez establecido su movimiento, el segundo ingrediente necesario en la simulación es lograr que estos átomos se vean atraídos a ciertas posiciones de la red. Esto reproduce el potencial atractivo de los núcleos de una molécula que, siguiendo la aproximación que introdujimos al principio del artículo, pueden considerarse fijos durante la evolución de los electrones simulados. Explotando el mismo mecanismo que usamos para atrapar los átomos en redes periódicas, ahora uno puede modular la intensidad de un láser para que tenga la forma de la atracción nuclear y así inducir el potencial deseado en cada sitio de la red (Figura 3).

El último ingrediente de la simulación es ahora el más complejo: lograr que estos áto-

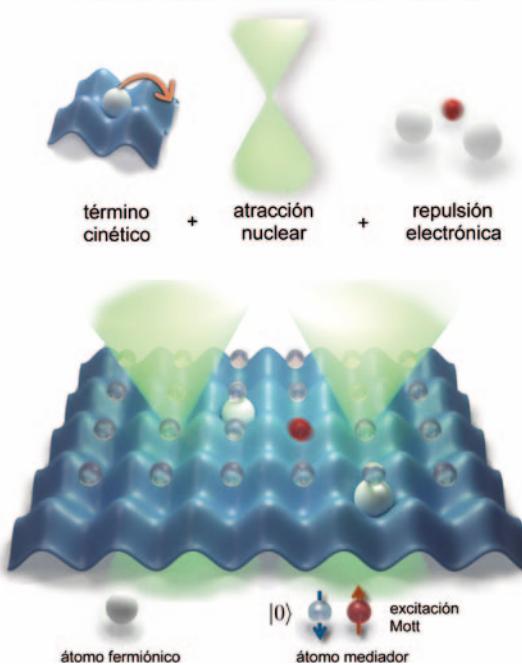
mos neutros, que se desplazan por la red óptica, sientan entre sí una repulsión que dependa de la distancia que los separa en cada momento. Como hemos visto, esta repulsión entre los electrones simulados no es nada natural en estos sistemas, ya que los átomos sólo interactúan cuando colisionan en el mismo sitio de la red. Esta es una interacción extraordinariamente local, a diferencia de la repulsión a largo alcance que necesitamos inducir. ¿Cómo lograr entonces que átomos neutros en distintos puntos de la red se repelan entre sí siguiendo un potencial de Coulomb?

En estos momentos uno puede regresar al espíritu creativo de Gaudí, y buscar soluciones en la naturaleza. Echando un vistazo a los libros de física, uno recuerda que el mecanismo por el que dos electrones se repelen entre sí tiene su origen en un fotón que virtualmente “viaja” rápidamente desde un electrón al otro. Cuanto más alejados estén los electrones, menos probable es que ocurra esta propagación virtual, con lo que el potencial resultante decae con la distancia que los separa. Siguiendo con esta idea, ¿por qué no buscar un “mensajero” que, desplazándose por la red de uno de nuestros átomos neutros a otro, induzca entre ellos una repulsión efectiva?

En unas recientes propuestas [15, 16] los autores de este artículo, junto con otros colaboradores: T. Shi (Chinese Academy of Sciences, Beijing), P. Zoller (Institute of Quantum Optics and Information, Innsbruck), y J. I. Cirac (Max Planck Institute of Quantum Optics), han propuesto varios candidatos para conseguir ese objetivo. Por ejemplo, uno puede pensar en otra especie atómica, que se mueve por la red con una dinámica más rápida que los electrones simulados, y que colisiona con ellos cuando ocupan el mismo sitio de la red [16]. Si bien este esquema experimental sencillo es capaz de inducir una repulsión efectiva entre los átomos fermiónicos, esta tiene una forma diferente al potencial de Coulomb que aparece en la naturaleza. Aún así, esta configuración puede ser ya interesante como un primer paso experimental que permitiría simular modelos simplificados de química con los que contrastar y optimizar métodos numéricos, lo que, para unas pocas decenas de átomos simulados, ya supone un gran desafío computacional.

Para poder conseguir simular la química que observamos en la naturaleza, en la que la repulsión electrónica sigue un potencial de Coulomb, es necesario diseñar por tanto un esquema experimental más complejo para nuestro átomo “mensajero”. En nuestra reciente propuesta [15] vimos de manera teórica que una manera de conseguirlo es que ese átomo “mensajero” esté en su fase de Mott, y que lo que viaje de un sitio a otro sean las excitaciones de espín de sus niveles internos y no el átomo directamente. Serán

Hamiltoniano electrónico en una molécula



estas excitaciones de espín las que jugarán un papel muy similar al de los fotones virtuales que median la repulsión de Coulomb entre electrones. Así, eligiendo apropiadamente las energías de estos niveles, se logra inducir una repulsión efectiva entre los átomos que en una red tridimensional escala como $1/r$, tal y como ocurre en el mundo que nos rodea (Figura 3).

Si bien este último ejemplo es experimentalmente mucho más complejo de construir, se trata de la primera propuesta de un sistema cuántico, experimentalmente accesible y controlable, cuyas fuerzas e interacciones reproducen las de los electrones dentro de una molécula. Al igual que Gaudí podía medir ángulos y distancias en su simulador para aprender sobre su problema arquitectónico original, las energías de este simulador cuántico corresponden a los niveles de energía de la molécula simulada. Pensando en uno de los casos más sencillos, si uno induce el potencial nuclear asociado a dos núcleos y mide la energía del simulador a medida que aleja sus posiciones, el resultado que obtiene es la curva de disociación de esta especie biamérica. La fortaleza de esta propuesta es que, al igual que ocurría en arquitectura, esta curva no ha requerido ningún cálculo, sino que es la naturaleza quien ofrece directamente la solución a nuestro problema. Dado el discretizado inherente al simulador, los primeros simuladores previsiblemente atacarán moléculas pequeñas, no demasiado afectadas por el tamaño finito de la red. Estas primeras pruebas de concepto posiblemente den lugar a simulaciones más complejas, para las que será necesario continuar con el desarrollo experimental actual y poner en práctica estrategias que mitiguen los efectos de tamaño finito y ruido.

Fig. 3. Átomos fermiónicos atrapados en una red óptica juegan el papel de los electrones de una molécula. Su salto a sitios vecinos simula su energía cinética, la modulación en intensidad de un láser externo induce la atracción nuclear a ciertos puntos de la red. Una especie atómica adicional media una repulsión efectiva entre los electrones simulados, que decae con la distancia entre ellos. Ilustración del esquema experimental asociado a la simulación de H_2 (dos núcleos de hidrógeno), donde excitaciones de una especie atómica en fase Mott inducen una repulsión efectiva de Coulomb [15].

Conclusión

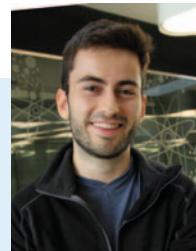
Tal y como hemos ilustrado a lo largo de este artículo, los simuladores cuánticos analógicos son una herramienta muy potente para el estudio de problemas de muchos cuerpos con la tecnología con la que disponemos hoy en día. Con las recientes propuestas para simular interacciones de Coulomb entre átomos fríos, se abre —¡por fin!— la puerta a enfrentar con ellos problemas propios de la química. Al igual que las torres que Gaudí proyectara para la Sagrada Familia con cuerdas y sacos de perdigones son hoy levantadas bajo la guía del más avanzado *software* 3D, los ordenadores cuánticos a buen seguro tomarán el relevo de los simuladores analógicos en el futuro (aún lejano) en que admitan corrección de errores y un desarrollo a gran escala. Mientras tanto, estas “maquetas” nos seguirán permitiendo explorar el mundo cuántico y realizar descubrimientos que, también seguro, sobrevivirán más allá de los nuevos paradigmas en computación aún por llegar.

Referencias

- [1] Wikimedia. (a) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow_Bridge_Natural_Arch_Utah_USA.jpg
(b) fotografía del autor, (c) https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Maqueta_funicular.jpg.
- [2] R. P. FEYNMAN, “Simulating Physics with Computers,” *International Journal of Theoretical Physics* 217 (1982).
- [3] S. LLOYD, “Universal quantum simulators,” *Science* 273, 1073-1078 (1996).
- [4] F. ARUTE *et al.*, *Science* 369, 1084-1089 (2020).
- [5] J. I. CIRAC, “Quantum Computing and Simulation: Where We Stand and What Awaits Us,” *Nanophotonics* (2020), 10.1515/nanoph-2020-0351.
- [6] D. JAKSCH, C. BRUDER, J. I. CIRAC, C. W. GARDINER y P. ZOLLER, “Cold Bosonic Atoms in Optical Lattices,” *Physical Review Letters* 81, 3108-3111 (1998).
- [7] M. GREINER, O. MANDEL, T. ESSLINGER, T. W. HANSCH e I. BLOCH, “Quantum Phase Transition from a Superfluid to a Mott Insulator in a Gas of Ultracold Atoms,” *Nature* 415, 39-44 (2002).
- [8] S. TROTZKY *et al.*, “Probing the Relaxation Towards Equilibrium in an Isolated Strongly Correlated One-Dimensional Bose Gas,” *Nature Physics* 8, 325-330 (2012).
- [9] T. ESSLINGER, “Fermi-Hubbard Physics with Atoms in an Optical Lattice,” *Annual Review of Condensed Matter Physics* 1, 129-152 (2010).
- [10] S. TROTZKY *et al.*, “Time-resolved Observation and Control of Superexchange Interactions with Ultracold Atoms in Optical Lattices,” *Science* 319, 295-299 (2008).
- [11] L. TARRUELL, D. GREIF, T. UEHLINGER, G. JOTZU y T. ESSLINGER, “Creating, Moving and Merging Dirac Points with a Fermi Gas in a Tunable Honeycomb Lattice,” *Nature* 483, 302-305 (2012).
- [12] G. JOTZU *et al.*, “Experimental Realization of the Topological Haldane Model with Ultracold Fermions,” *Nature* 515, 237-240 (2014).
- [13] M. AIDELSBURGER *et al.*, “Measuring the Chern Number of Hofstadter Bands with Ultracold Bosonic Atoms,” *Nature Physics* 11, 162-166 (2015).
- [14] E. ZOHAR, J. I. CIRAC y B. REZNIK, “Quantum Simulations of Lattice Gauge Theories Using Ultracold Atoms in Optical Lattices,” *Reports on Progress in Physics* 79 (2015).
- [15] J. ARGÜELLO-LUENGO, ALEJANDRO GONZÁLEZ-TUDELA, TAO SHI, PETER ZOLLER y J. IGNACIO CIRAC, “Analogue Quantum Chemistry Simulation,” *Nature* 574, 215-218 (2019).
- [16] J. ARGÜELLO-LUENGO, A. GONZÁLEZ-TUDELA, TAO SHI, P. ZOLLER y J. I. CIRAC, “Quantum Simulation of 2D Quantum Chemistry in Optical Lattices,” *Physical Review Research* 2, 042013(R) (2020).

Javier Argüello Luengo

Instituto de Ciencias Fotónicas
(ICFO)



Alejandro González Tudela

Instituto de Física Fundamental
(IFF-CSIC)



EDICIÓN DE LOS PREMIOS FOTÓN
DE COMUNICACIÓN CIENTÍFICA Y DE
DOCENCIA EN LA ESCUELA

INSTITUTO DE ÓPTICA 'DAZA DE VALDÉS'
DEL CSIC

<https://www.io.csic.es/premiosfoton/>

Newcomb, Benford y la aristocracia del primer dígito

Andrea Burgos y Andrés Santos

Oculta en cualquier tabla de datos de la física o del mundo real rige una sutil aristocracia: los datos que empiezan por 1 resultan ser unas 7 veces más frecuentes que los que empiezan por 9. ¿Por qué las frecuencias no se reparten por igual entre todos los dígitos del 1 al 9?

La ley de Newcomb-Benford proporciona la distribución de probabilidad del primer dígito de una enorme variedad de datos (constantes físicas, medidas experimentales, poblaciones de ciudades, datos fiscales o electorales, etc.). Según esta poco intuitiva ley, el primer dígito significativo tiene una probabilidad del 30,1 % de ser 1 y del 4,6 % de ser 9. Lo que mejor caracteriza la ley de Newcomb-Benford es que debe aplicarse a datos con unidades (invariancia bajo cambio de escala). Sorprendentemente, también se aplica a datos no relacionados directamente con magnitudes físicas, como los números de Fibonacci o las potencias de 2.

Introducción

Finales del siglo XIX. Un astrónomo y matemático visita la biblioteca de su institución y consulta una tabla de logaritmos para realizar ciertos cálculos astronómicos. Como en ocasiones anteriores, le llama la atención el hecho de que las primeras páginas (las que corresponden a números que comienzan por 1) están mucho más gastadas que las últimas (correspondientes a números que comienzan por 9). Intrigado, esta vez decide no dejar pasar el asunto por alto. Cierra los ojos para concentrarse, esboza unos cuantos cálculos sobre un papel y finalmente sonríe. Ha encontrado la respuesta y es enormemente simple y elegante.

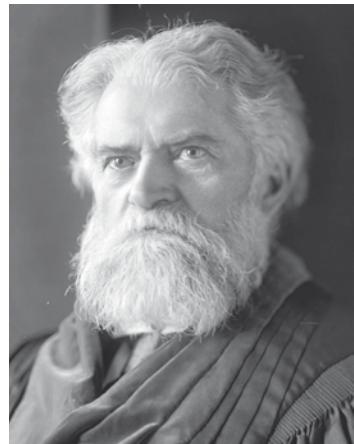


Figura 1. Simon Newcomb (1835-1909).



Figura 2. Frank Benford (1883-1948).

Algo más de medio siglo después, un físico e ingeniero eléctrico que ignora el descubrimiento de su predecesor, observa el mismo curioso fenómeno en las páginas de las tablas de logaritmos y llega a idéntica conclusión. Ambos han comprendido que, en una larga lista de registros obtenidos de la naturaleza, la fracción p_d de registros que comienzan por el dígito significativo $d = 1, 2, \dots, 9$ no es $p_d = 1/9$, como ingenuamente podría esperarse, sino que sigue una ley logarítmica. Más concretamente,

$$p_d = \log_{10} \left(1 + \frac{1}{d} \right), d = 1, 2, \dots, 9. \quad (1)$$

Los valores numéricos de p_d se muestran en la segunda columna de la Tabla I. Vemos que los registros que comienzan por 1, 2 o 3 acaparan en torno al 60 % del total, mientras que los demás 6 dígitos deben conformarse con el 40 % restante.

Nuestro personaje del siglo XIX se llama Simon Newcomb (Figura 1) y publicó su hallazgo en una modesta nota de dos páginas [1]. El segundo personaje es Frank Benford (Figura 2) y escribió un artículo de 22 páginas [2] en el que, además de justificar matemáticamente la Ec. (1), mostró su

Tabla I. Probabilidades para el primero, segundo, tercero y cuarto dígito significativo.

Dígito	Primero	Segundo	Tercero	Cuarto
d	p_d	$p_d^{(2)}$	$p_d^{(3)}$	$p_d^{(4)}$
0		0,11968	0,10178	0,10018
1	0,30103	0,11389	0,10138	0,10014
2	0,17609	0,10882	0,10097	0,10010
3	0,12494	0,10433	0,10057	0,10006
4	0,09691	0,10031	0,10018	0,10002
5	0,07918	0,09668	0,09979	0,09998
6	0,06695	0,09337	0,09940	0,09994
7	0,05799	0,09035	0,09902	0,09990
8	0,05115	0,08757	0,09864	0,09986
9	0,04576	0,08490	0,09827	0,09982

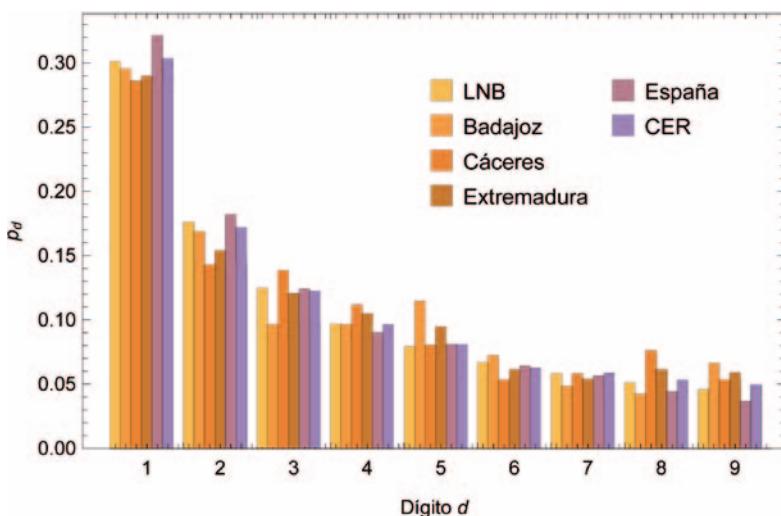


Figura 3. Comparación con la LNB de la distribución del primer dígito en las poblaciones de los municipios de las provincias de Badajoz y Cáceres, de la comunidad de Extremadura y de España, así como del censo electoral de españoles residentes en España (CER).

validez en el análisis de más de 20.000 primeros dígitos tomados de fuentes tan variadas como áreas de ríos, poblaciones de ciudades americanas, constantes físicas, pesos atómicos y moleculares, calores específicos, números extraídos de periódicos o del *Reader's Digest*, direcciones postales, etc., o las series n^{-1} , \sqrt{n} , n^2 o $n!$, entre otras, con $n = 1 - 100$.

Con tan apabullante evidencia, no es de extrañar que la Ec. (1) se conozca como *ley de Benford* (o ley del primer dígito), a pesar de que fue encontrada casi sesenta años antes por Newcomb. Esta no es sino una manifestación más de la llamada ley de Stigler, según la cual ningún descubrimiento científico recibe el nombre de quien lo descubrió en primer lugar. De hecho, como el propio Stigler señala [3], la ley que lleva su nombre fue en realidad enunciada de forma parecida veintitrés años antes por el sociólogo estadounidense Robert K. Merton. A fin de no caer totalmente en la ley de Stigler, muchos autores se refieren a la Ec. (1) como *ley de Newcomb-Benford* y ese es el criterio (mediante las siglas LNB) que seguiremos en este artículo.

Invariancia bajo cambio de escala

Con frecuencia, cuando por primera vez le hablamos a un amigo, un familiar o incluso un colega acerca de la LNB, su primera reacción suele ser de escepticismo. ¿Por qué el primer dígito no se encuentra distribuido uniformemente entre los 9 valores posibles? Un argumento sencillo muestra que, de existir una ley de distribución robusta, esta no puede ser la distribución uniforme.

Imaginemos una larga lista de longitudes de ríos, alturas de montañas y superficies de países, por ejemplo. Es posible que las longitudes de los ríos estén en km, la altura de las montañas en m y las superficies de países en km^2 , pero podrían también estar en millas, pies o acres, respectivamente. ¿Dependerá la distribución p_d de si utilizamos unas unidades u otras o incluso de si las mezclamos? Parece lógico que no, es decir, que la distribución p_d sea (estadísticamente) independiente de las unidades elegidas, o en otras palabras, que sea *invariante bajo cambio de escala*. La distribución uniforme $p_d = \frac{1}{9}$ obviamente no verifica esa propiedad de invariancia. Supongamos que partimos de una lista en la que todos los valores del primer dígito están igualmente representados. Si multiplicamos todos los registros de la lista por 2 [4], podemos ver que aquellos registros que empezaban antes por 1, luego empiezan por 2 o por 3; los que empezaban por 2, luego empiezan por 3 o por 4; los que empezaban por 3, luego empiezan por 6 o por 7; y los que empezaban por 4, luego empiezan por 8 o por 9. Por el contrario, todos los que empezaban por 5, 6, 7, 8 o 9 empezarán ahora por 1. Por consiguiente, si $p_d = \frac{1}{9}$ inicialmente, entonces $p_1 = \frac{5}{9}$ y $p_2 + p_3 = p_4 + p_5 = p_6 + p_7 = p_8 + p_9 = \frac{1}{9}$ tras multiplicar por 2 todos los registros, destruyéndose así la uniformidad inicial. Podemos continuar multiplicando por 2 y la distribución continuará evolucionando hasta alcanzarse una distribución estacionaria e invariante bajo ese cambio de escala [5].

Así pues, el sello más identificativo de la LNB es que debe ser de aplicación a registros que tienen unidades, de modo que la ley es invariante bajo cambio de escala, lo que permite deducir fácilmente la Ec. (1) [5]. Y no solo eso, sino que es posible generalizar la Ec. (1) más allá del primer dígito para así obtener la probabilidad p_{d_1, d_2, \dots, d_m} de que los m primeros dígitos coincidan con una cierta cadena ordenada (d_1, d_2, \dots, d_m) , donde $d_i \in \{1, 2, \dots, 9\}$ y $d_i \in \{0, 1, 2, \dots, 9\}$ si $i \geq 2$. Por ejemplo, la probabilidad de que los tres primeros dígitos de un registro formen precisamente la cadena (3, 1, 4) es $p_{3,1,4} = \log_{10}(1 + 1/314) = 0,00138$. A partir de p_{d_1, d_2, \dots, d_m} , podemos calcular la probabilidad $p_d^{(m)}$ de que el m -simo dígito sea d , independientemente de los valores de los $m - 1$ dígitos anteriores, sumando para todos los valores posibles de esos $m - 1$ dígitos anteriores. En la Tabla I, la ley del primer dígito, p_d , está acompañada de las leyes para el segundo, tercero y cuarto dígitos. Como puede observarse, a medida que el dígito es más interno, la probabilidad se hace menos dispar.

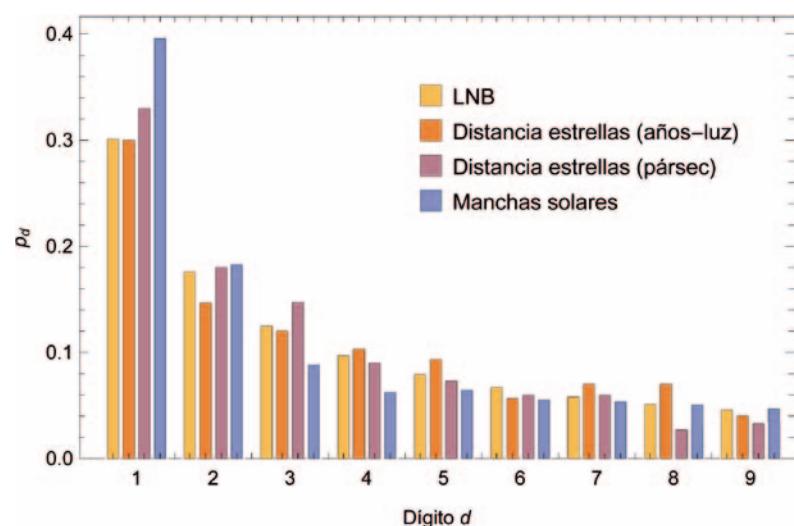
Aplicaciones y ejemplos

Las aplicaciones y verificaciones de la LNB son numerosas y abarcan temas tan variados y prosaicos como el estudio del genoma, la vida media de los núcleos inestables, física de partículas, astronomía, fenómenos críticos cuánticos, emisiones tóxicas, auditorías fiscales, fraudes electorales o científicos, producto interior bruto, mercado bursátil, datos de inflación, *world wide web*, actividades religiosas, fechas de nacimiento, caudales de ríos, o incluso la COVID-19. Otros ejemplos pueden verse en el enlace [6]. En esta sección presentaremos algunos ejemplos adicionales.

Comencemos con una de las situaciones que el propio Benford estudió en su clásico artículo [2]: el de las poblaciones de ciudades. Utilizando los datos del Instituto Nacional de Estadística (INE), hemos considerado la población (en 2019) de los 165 municipios de la provincia de Badajoz (más la población total de la provincia de Badajoz), de los 223 municipios de la provincia de Cáceres (más la población total de la provincia de Cáceres) y el conjunto de los 388 municipios de la comunidad de Extremadura (más las poblaciones totales de las provincias de Badajoz y Cáceres). También hemos considerado la población (según el padrón de 2016) de los 8.110 municipios españoles, así como los 8.184 datos del censo electoral de españoles residentes en España (CER, agosto de 2020) correspondientes al número de electores por municipio de inscripción (más el total de los electores de cada comunidad y el total nacional). Con todas estas listas de registros hemos analizado la frecuencia de aquellos que empiezan por $d = 1, 2, \dots, 9$ y los resultados se comparan en la Figura 3. Se observa un buen acuerdo general entre los datos de poblaciones (especialmente en el caso del CER) y las predicciones de la LNB. Esto es interesante, ya que no es obvio que la distribución de los significandos del número de habitantes de municipios deba ser invariante bajo cambio de escala.

Pasemos ahora a dos ejemplos relacionados con la astronomía. En el primero de ellos, tomamos la distancia a la Tierra (en años-luz y en pársec) de las 300 estrellas más brillantes [7]. En el segundo caso, los datos considerados corresponden al número diario de manchas solares desde 1818 hasta la actualidad [8]. Como se observa en la Figura 4, las distancias entre nuestro planeta y las estrellas siguen generalmente bien la LNB, a pesar de que la lista no es excesivamente extensa (solo 300 datos) y de que hay desviaciones “locales” (por ejemplo, $p_6 < p_7$ en las dos elecciones de unidades). Este buen acuerdo general era de esperar, ya que la distribución de dígitos en distancias (que se expresan en unidades) es un claro ejemplo de invariancia bajo cambio de escala. Sin embargo, en el caso del número diario de manchas solares se observan diferencias cuantitativas (aunque no cualitativas) con la LNB, sobre todo en los casos $d = 1, 3, 4$ y 5. Conviene tener en cuenta que, aunque la serie es muy larga (más de 59.000 registros, una vez excluidos los días sin datos o con 0 manchas), cada registro solo tiene una, dos o tres cifras (el número máximo de manchas solares es de 528 y corresponde al 26 de agosto de 1870).

Por último, hemos analizado los precios de 1.016 artículos de una cadena de marca de moda [9] y de 1.373 productos de una red de hipermercados [10]. Los resultados se muestran en la Figura 5. En este caso, las discrepancias con la LNB son más acusadas. Aunque las frecuencias mayores se



presentan para $d = 1$ y $d = 2$, los valores observados de p_d no disminuyen monótonamente al aumentar d . En el caso de la cadena de marca de moda, se tiene que $p_4 > p_3$ y $p_9 > p_8 > p_6 > p_7$; en los precios de la red de hipermercados, $p_8 > p_9 > p_7 > p_6$. En principio, podría pensarse que, puesto que pueden expresarse en euros, dólares, rublos, yenes, etc., los precios debieran satisfacer la propiedad de invariancia bajo cambio de escala inherente a la LNB. Sin embargo, a esa invariancia hay que superponer las estrategias comerciales y artificiales de asignación de precios, lo que genera desviaciones relevantes respecto de la LNB.

Comentarios finales

Esperamos que este artículo haya contribuido a mostrar que, en contra de lo que en un primer momento pudiera pensarse, el primer dígito significativo de un conjunto de datos extraídos de la naturaleza o del mundo real no está distribuido de manera uniforme entre los nueve posibles valores ($d = 1, 2, \dots, 9$), sino que típicamente la frecuencia es mayor para $d = 1$ y va disminuyendo

Figura 4. Comparación con la LNB de la distribución del primer dígito en la distancia a la Tierra (en años-luz y en pársec) de las 300 estrellas más brillantes y en el número diario de manchas solares.

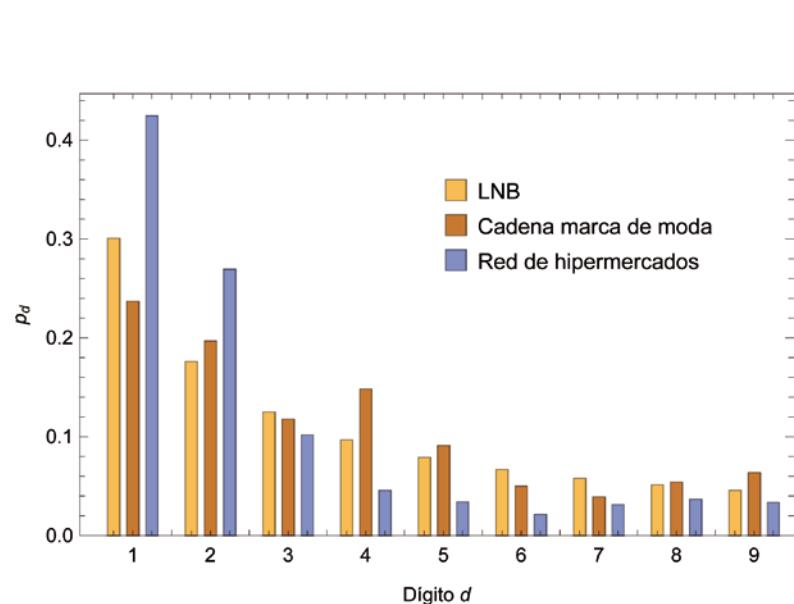


Figura 5. Comparación con la LNB de la distribución del primer dígito en los precios de artículos de una cadena de marca de moda y de una red de hipermercados.

do a medida que aumenta d . La LNB (1) da una expresión matemática a ese hecho empírico, aunque no siempre tiene por qué verificarse de modo riguroso. Sí es de esperar que, salvo las inevitables fluctuaciones estadísticas, la ley se cumpla en conjuntos de datos acompañados de unidades (como sucede generalmente en física), de modo que la distribución del primer dígito sea independiente de las unidades escogidas (invariancia bajo cambio de escala). Más en general, la LNB se satisface cuando la mantisa de los logaritmos (en cualquier base) de los datos considerados está distribuida uniformemente. Eso hace que listas tan poco relacionadas en principio con magnitudes físicas como la de los números de Fibonacci o las potencias de 2 también verifiquen la LNB. Además, si una lista inicial de datos no cumple la ley, la multiplicación iterada de los datos por una potencia irracional de 10 lleva a que la distribución del primer dígito en las listas resultantes converja hacia la LNB [5].

Hasta los años setenta del pasado siglo (que es cuando empezaron a usarse las calculadoras científicas de bolsillo) los físicos utilizaban las tablas de logaritmos (o su aplicación en las reglas de cálculo) para pequeños cálculos científicos cotidianos, aunque si los cálculos eran más complicados podían utilizar programas de ordenador en las computadoras de la época. En la actualidad, esos cálculos se realizan en calculadoras de bolsillo, en teléfonos móviles o en los ordenadores personales con la amplia variedad de programas matemáticos existentes. Como los datos que se manipulan en física están extraídos de situaciones “reales”, tales como experimentos, modelos, constantes físicas, etc., podemos concluir, como homenaje a Newcomb y Benford y sus tablas de logaritmos, que la tecla del 1 será la que presente un mayor desgaste y la del 9 será la menos utilizada.

Referencias

- [1] S. NEWCOMB, “Note on the Frequency of Use of the Different Digits in Natural Numbers”, *Am. J. Math.* **4**, 39-40(1881).
- [2] F. BENFORD, “The Law of the Anomalous Numbers”, *Proc. Am. Philos. Soc.* **78**, 551-572 (1938).
- [3] S. M. STIGLER, “Stigler’s Law of Eponymy”, *Trans. N. Y. Acad. Sci.* **39**, 147-158 (1989).
- [4] J. M. R. PARRONDO, “La misteriosa ley del primer dígito”, *Investigación y Ciencia* 315 (diciembre), 84-85 (2002).
- [5] A. BURGOS y A. SANTOS, “The Newcomb-Benford Law: Do Physicists Use More Frequently the Key 1 than the Key 9?”, <https://arxiv.org/abs/2101.12068>
- [6] “Testing Benford’s Law”, <https://testingbenfordslaw.com>
- [7] “The brightest stars”, <http://www.atlasoftheuniverse.com/stars.html>
- [8] “Sunspot number”, <http://sidc.be/silso/datafiles>.
- [9] <https://cortefiel.com/es/es/mujer?srule=price-high-to-low&>
- [10] <https://www.hipercores.es/supermercado/alimentacion/>

Andrea Burgos
Graduada en Física,
Universidad de Extremadura



Andrés Santos
Dpto. de Física, Universidad
de Extremadura



<https://emslibs2021spain.com/>



Turbulencia y multifractalidad ochenta años después de la teoría de Kolmogorov 1941

Carlos Granero-Belinchón

La turbulencia es un fenómeno omnipresente en la naturaleza, que interviene en procesos tan diversos como reacciones químicas, flujos atmosféricos o dinámicas galácticas. Sin embargo, numerosas incógnitas continúan envolviéndola y convirtiéndola en un desafío para la ciencia.

Hoy, la naturaleza multiescala de la turbulencia es aceptada por la comunidad científica. De hecho, la visión que actualmente prevalece de un flujo turbulento es la de un conjunto de torbellinos de distintos tamaños que interaccionan entre sí. Sin embargo, no fue hasta 1941 que el físico y matemático Andrey N. Kolmogorov presentó la primera teoría capaz de describir las propiedades estadísticas multiescala de la turbulencia. Dicha teoría, conocida como de Kolmogorov 1941, caracteriza la distribución de energía de la turbulencia a través de las escalas. Además permite recuperar la cascada de energía, ya predicha por Richardson, que atraviesa las escalas de la turbulencia yendo de las grandes escalas hacia las pequeñas. La teoría de Kolmogorov de 1941 revolucionó la comprensión física de la turbulencia.

Introducción a la física de un fluido turbulento

La turbulencia es uno de los fenómenos de la física clásica que aún permanece sin respuesta. Un fenómeno que ha interesado al ser humano desde hace más de 500 años, quizás por su complejidad, o por su impacto en las dinámicas oceánicas y atmosféricas que determinan el clima, por su influencia en los procesos termodinámicos que han permitido el desarrollo tecnológico de la sociedad industrial, o quizás simplemente por la belleza inherente a un flujo turbulento (Figura 1).

Alrededor del año 1500, Leonardo da Vinci ya se interesaba, al menos desde un punto de vista estético, por el problema de la turbulencia. En la Figura 2 podemos observar un boceto de Da Vinci en el que representa la dinámica turbulenta de un fluido como una superposición de torbellinos de distintos tamaños. Junto a dicho boceto, Da Vinci escribió: "Observad el movimiento de la superficie del agua, que se parece al del cabello, que contiene dos movimientos, uno de los cuales está causado por el peso del cabello, y el otro por la dirección de los rizos; así el agua tiene movimientos de remolino, uno de los cuales es debido a la corriente principal y el otro al movimiento aleatorio e inverso". Y también: "Los pequeños remolinos son casi innumerables, y los cuerpos

de gran tamaño son movidos solo por los remolinos grandes y no por los pequeños, mientras que los objetos pequeños son movidos tanto por los pequeños remolinos como por los grandes". Da Vinci indicaba ya hace 500 años la naturaleza multiescala de la turbulencia.

Habrá que esperar doscientos cincuenta años para que, gracias a los trabajos pioneros de Leonhard Euler (1707-1783) y más adelante de Claude-Louis Navier (1785-1836)



Figura 1. Cruzando el lago Poyang. Pintura del siglo XVIII proveniente de la región de Cantón, en China. (Derechos: Hong Kong Maritime Museum).

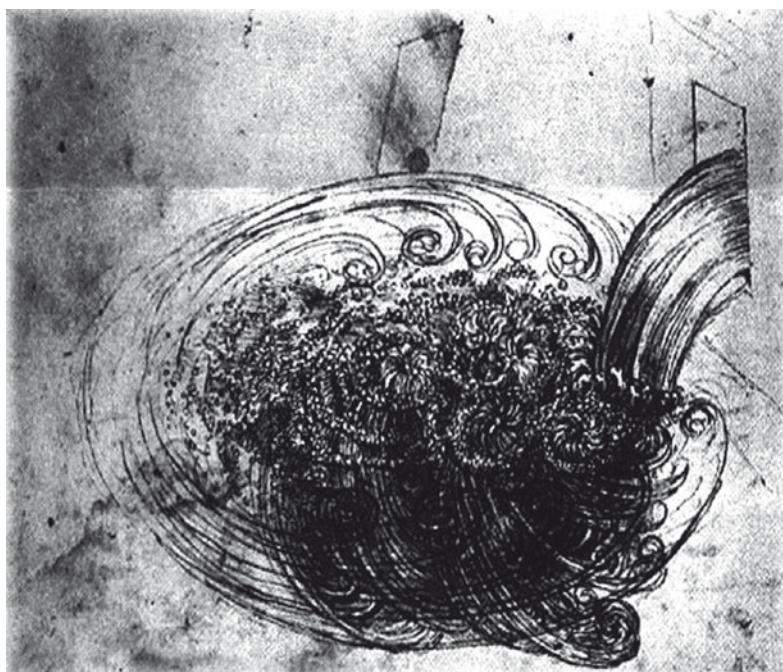


Figura 2. Dibujo de un fluido entrando en una piscina realizado por Leonardo da Vinci (xv-xvi).

y George Gabriel Stokes (1819-1903), tuvieron una descripción matemática de la dinámica de un flujo turbulento. Gracias a ellos, hoy sabemos que la dinámica de un fluido de viscosidad ν y densidad ρ esta gobernada por las ecuaciones de conservación del momento o ecuaciones de Navier-Stokes (N-S). En el caso de un fluido homogéneo ($\rho \equiv \text{cte}$), la conservación de la masa implica $\nabla \cdot v = 0$ y las ecuaciones de Navier-Stokes se escriben:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 v, \quad (1)$$

donde p es la presión y v el campo de velocidades.

Las ecuaciones de Navier-Stokes muestran la competición entre las diferentes fuerzas que actúan en el fluido:

Figura 3. Descripción de Richardson de la turbulencia [1].

- $\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v$ son los términos inerciales. El primero indica la variación temporal de la velocidad, mientras que el segundo, que es no lineal, describe la advección.

• $-\frac{\nabla p}{\rho}$ es la fuerza interna.

• $\nu \nabla^2 v$ es el término de difusión debido a la viscosidad del fluido.

La competición entre el término no lineal advecutivo y el término lineal difusivo define el número de Reynolds R_e , que mediante análisis dimensional, puede expresarse como [1]:

$$R_e \approx -\frac{\sigma L}{\nu}, \quad (2)$$

donde σ es la velocidad característica del fluido a la escala característica L del flujo. Cuanto mayor es el número de Reynolds, mayor es la importancia del término advecutivo en N-S y más turbulenta es la dinámica del fluido. En régimen turbulento, la fuerte no linearidad de N-S hace muy complicado trabajar analíticamente con estas ecuaciones. Desde la física, dos aproximaciones al problema han permitido comprender mejor la turbulencia, la aproximación fenomenológica y la estadística.

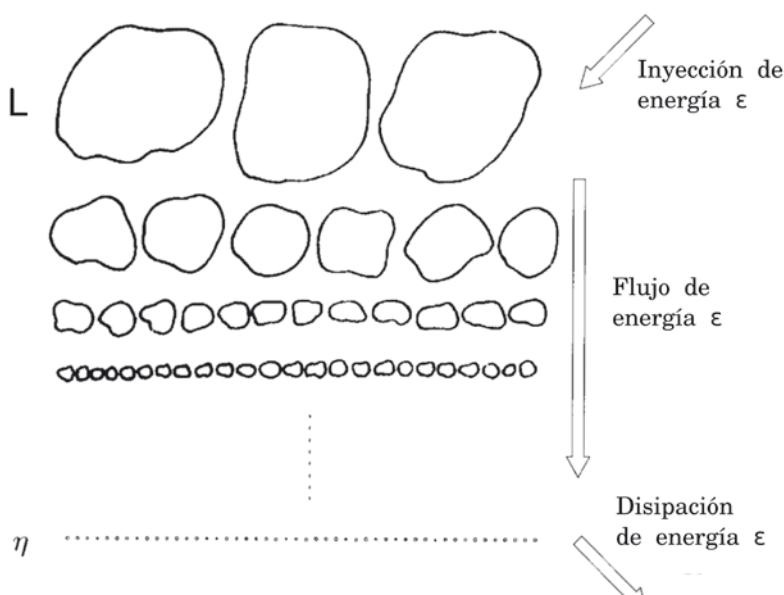
En 1921, Lewis Fry Richardson (1881-1953) presentó una visión de la turbulencia que todavía prevalece, según la cual la turbulencia se describe como una jerarquía de torbellinos de diferentes tamaños, con una cascada de energía de los grandes torbellinos hacia los pequeños [2] (Figura 3). Esta descripción implica que la energía es inyectada en el sistema a través de las grandes escalas, mientras que es en las pequeñas escalas donde la energía es disipada. Por lo tanto, la descripción de Richardson de la turbulencia implica que esta es un fenómeno multiescala (Figura 4).

Sin embargo, la primera teoría estadística capaz de caracterizar y describir la turbulencia como un fenómeno multiescala llegaría a mediados del siglo xx con los trabajos revolucionarios de Andrey Nikolayevich Kolmogorov (1903-1987). Inspirado por la visión de la turbulencia de Richardson, A. N. Kolmogorov construyó la teoría de la turbulencia conocida como "Kolmogorov 1941", o de forma abreviada como K41.

La teoría de Kolmogorov

Kolmogorov comenzó por diferenciar tres dominios diferentes de escalas en la turbulencia:

- La región integral: contiene las grandes escalas, iguales o mayores que la escala integral L , a través de las cuales la energía es inyectada al sistema.
- La región inercial: contiene las escalas menores que L pero mayores que la escala de disipación η_K . En el dominio inercial la ener-



gía fluye de las grandes hacia las pequeñas escalas.

- La región disipativa: contiene las escalas menores que η_K en las cuales la energía es disipada.

La región inercial se caracteriza por una dinámica dominada por el término advectivo sobre el difusivo en las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que en el dominio disipativo el término difusivo domina.

Para poder desarrollar su teoría, Kolmogorov hizo dos hipótesis [3], que pueden ser resumidas como: si el número de Reynolds va al infinito, las pequeñas escalas (escalas menores que la escala integral L) de la turbulencia son estadísticamente isótropas e independientes de las grandes escalas [1].

Usando ambas hipótesis de semejanza y análisis fenomenológico, Kolmogorov caracterizó estadísticamente el comportamiento de los incrementos de velocidad en la región inercial de un fluido turbulento [1]:

$$\delta_l v(x) = v_x(x + l) - v_x(x) \approx \epsilon^{1/3} l^{1/3}. \quad (3)$$

La ecuación 3 conduce a comportamientos específicos de leyes de escala de los momentos estadísticos de los incrementos de velocidad [3]:

$$S_p(l) \equiv \langle (\delta_l v)^p \rangle = C_p (l \langle \epsilon \rangle)^{p/3}, \quad (4)$$

donde $S_p(l)$ son las funciones de estructura, p es el orden de la función de estructura y C_p son constantes de universalidad que solo dependen de la función de estructura.

A partir del comportamiento en leyes de escala de la función de estructura de orden dos, $S_2(l) = C_2 \langle \epsilon^{2/3} \rangle l^{2/3}$, se obtiene la distribuciónpectral de energía de un flujo turbulento (Figura 4):

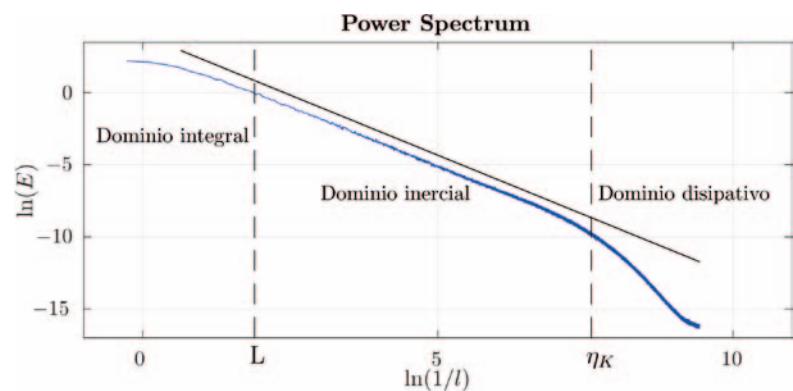
$$E\left(\frac{1}{l}\right) = \propto \epsilon^{2/3} \left(\frac{1}{l}\right)^{-5/3}. \quad (5)$$

Las relaciones arriba escritas (ecuaciones 3, 4 y 5) son válidas para cualquier escala l en la región inercial, en la cual no hay ni inyección directa de energía ni disipación directa de energía, sino un flujo de energía Π de la escala integral L a la escala disipativa η_K . En consecuencia con la ecuación 3, el flujo de energía Π debe ser independiente de la escala e igual a la tasa media de disipación de energía:

$$\Pi \approx \frac{\langle (\delta_l v(x))^3 \rangle}{l} \approx \langle \epsilon \rangle. \quad (6)$$

La ley de cuatro quintos

Kolmogorov derivó directamente de las ecuaciones de Navier-Stokes la, *a priori* definición fenomenológica, de la tasa media de disipación de energía hecha en la ecuación 6. De este modo, Kolmogorov obtuvo una relación exacta para la



función de estructura de tercer orden $S_3(l)$, que debe ser respetada por cualquier modelo de turbulencia [3]: *En el límite de número de Reynolds infinito, la función de estructura de tercer orden de la turbulencia homogénea e isótropa, evaluada en incrementos l pequeños comparados con la escala integral, es dada en términos de la tasa media de disipación de energía por*

$$S_3(l) = -\frac{4}{5} \langle \epsilon \rangle l. \quad (7)$$

La ley de cuatro quintos muestra la existencia de una cascada de energía en la turbulencia que va de las grandes escalas hacia las pequeñas.

La corrección de Kolmogorov-Oboukhov de 1962

La teoría de Kolmogorov de 1941 asume que *como $\langle \epsilon \rangle$ es casi constante en las regiones que son pequeñas en comparación con la escala integral L , cuando $l \ll L$ se puede suponer que $\langle \epsilon_l \rangle = \langle \epsilon \rangle$* . Esta hipótesis fue rápidamente contestada por Lev Davidovich Landau (1908-1968), ya que no tiene en cuenta que con el incremento de la proporción L/l la variación σ_ϵ^2 de la disipación de energía ϵ definida en la teoría K41 aumentaría sin límite [4, 5, 1].

Más tarde llegaría el apoyo experimental a las críticas de la teoría K41, con observaciones que indicaban la inhomogeneidad de la tasa de disipación [6]. En los setenta, experimentos que analizaban la deformación de las funciones de densidad de probabilidad (pdfs) de los incrementos de velocidad a través de las escalas [7] (Figura 5) y más adelante las leyes de escala de las funciones de estructura de orden mayor que 3 [8] corroboraron la inexactitud de la teoría K41.

Ya algunos años antes, Kolmogorov y Oboukhov habían corregido la teoría K41 definiendo una disipación de energía local ϵ_l en lugar de una global ϵ [5, 6]. Concretamente, definieron ϵ_l siguiendo una distribución con estadísticas log-normales y demostraron que en este caso:

$$\delta_l v(x) = v_x(x + l) - v_x(x) \approx (\epsilon_l l)^{1/3}, \quad (8)$$

$$S_p(l) = \langle (\delta_l v)^p \rangle = C_p (l \langle \epsilon_l \rangle)^{p/3}. \quad (9)$$

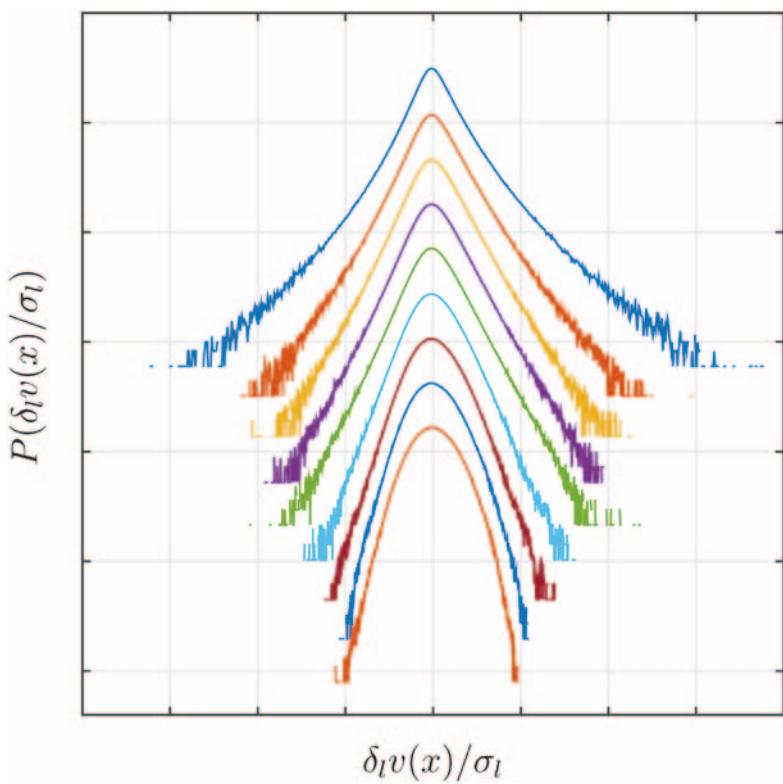


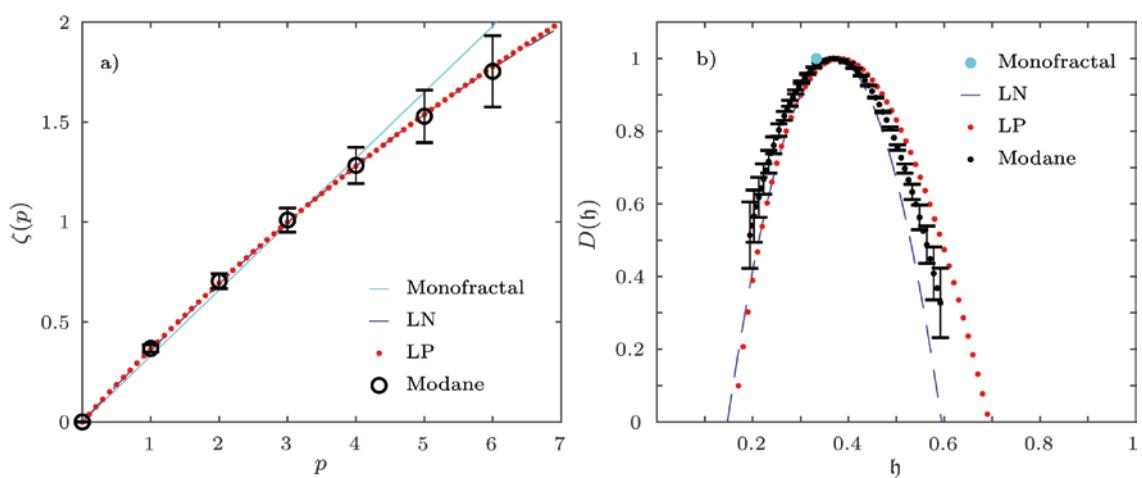
Figura 5. Deformación de la pdf de los incrementos de velocidad a través de las escalas, de Gaussiana a gran escala a fuertemente no Gaussiana a pequeña escala. Para resaltar las diferencias entre las pdfs, el eje y está en escala logarítmica

La consideración de tasas de disipación no constantes conduce a leyes de escala no lineales de los incrementos, y por lo tanto leyes de escala no lineales de las funciones de estructura. Esta no linealidad conlleva una deformación de la pdf de los incrementos de velocidad en función de la escala. La pdf, cercana a una Gaussiana a escalas mayores o iguales a la escala integral L , desarrolla colas más largas y una asimetría cuando la escala decrece [7]. A este fenómeno se le llama intermitencia.

El enfoque multifractal de la teoría de Kolmogorov

Uriel Frisch y Giorgio Parisi, tomando como referencia los trabajos sobre fractalidad y multifractaldad de Benoît B. Mandelbrot (1924-2010), generalizaron la teoría de la turbulencia de Kol-

Figura 6. a) Exponentes de escala $\zeta(p)$ en función de p y **b)** espectro de singularidades $D(\hbar)$ en función del exponente de Hölder \hbar , ambos para tres modelos diferentes de la turbulencia en la región inercial, junto con una medida experimental de velocidad turbulenta (Modane, símbolos negros). Los modelos son: movimiento Browniano fraccionario monofractal (cian, línea continua), modelo multifractal log-normal (azul, línea discontinua) y modelo multifractal log-Poisson (rojo, línea punteada).



mogorov usando un enfoque multifractal [1]. Para ello, simplemente reformularon el comportamiento en leyes de escala de los incrementos y las funciones de estructura:

$$\delta_l v(x) \approx l^{\hbar}, \quad (10)$$

$$S_p(l) \approx l^{\zeta(p)}, \quad (11)$$

donde \hbar es el exponente de Hölder e indica el orden de las singularidades que caracterizan la velocidad turbulenta, y $\zeta(p)$ define los exponentes de escala de la velocidad de un flujo turbulento. $D(\hbar)$ es el espectro de singularidades e indica la probabilidad de encontrar el exponente de Hölder \hbar [1]. Cualquier modelo se caracterizará por lo tanto por el conjunto de sus exponentes de escala $\zeta(p)$ (Figura 6 a), y su espectro de singularidades (Figura 6 b), los cuales están relacionados por la transformada de Legendre [1] y por lo tanto aportan dos visiones de un mismo fenómeno. Por último, la ley de cuatro quintos de Kolmogorov impone $\zeta(3) = 1$.

Un comportamiento lineal de los exponentes de escala en función de p caracteriza un proceso monofractal. En este caso, a la pendiente de la recta $c = \hbar$ se le llama exponente de Hurst, y se escribe \mathcal{H} , es decir, el orden de las singularidades del proceso es único e igual a \mathcal{H} . Por otro lado, un comportamiento no lineal de los exponentes de escala, i. e. la existencia de singularidades de distintos ordenes (múltiples valores posibles de \hbar), revela la existencia de multifractaldad (intermitencia en términos de física de fluidos) (Figura 6). Intuitivamente podemos relacionar la unicidad del orden de las singularidades $\hbar = \mathcal{H} = cte$ con la existencia de una tasa de disipación media $\langle \epsilon \rangle$ y la existencia de singularidades de distinto orden $D(\hbar)$ con la existencia de una tasa de disipación local ϵ_\hbar .

La teoría de Kolmogorov de 1941 enuncia $\hbar \equiv \mathcal{H} = 1/3$, lo que sitúa al comportamiento multiescala de la turbulencia en un régimen mono-

fractal. Esta consideración implica que: 1) $D(h) = \delta(h - 1/3)$ es una función univaluada (Figura 6 b). 2) Los exponentes de escala son lineales en función de p , $\zeta(p) = p\mathcal{H} = \frac{p}{3}$ (Figura 6 a). 3) Las propiedades estadísticas de los incrementos permanecen inalteradas a través de las escalas (autosemejanza).

La figura 6 a) muestra que, cuando p aumenta, los exponentes de escala de una medida experimental de velocidad turbulenta se desvían del comportamiento lineal predicho por el modelo monofractal. Por lo tanto, el modelo K41 de la turbulencia no es satisfactorio a gran p . Es necesario introducir correcciones ligadas a la intermitencia que dan un estatus multifractal a la turbulencia. Existen diferentes modelos multifractales, cada uno de los cuales describe la intermitencia de manera ligeramente distinta. Entre los modelos más famosos encontramos el modelo log-normal y el modelo log-Poisson.

Conclusión

En 1941 Kolmogorov sentó las bases de una teoría estadística de la turbulencia capaz de describir la naturaleza multiescala de la misma. Esta teoría tiene en cuenta la existencia de tres dominios de escalas regidos por fenómenos físicos diferenciados, es capaz de caracterizar la distribución de energía a través de las escalas de la turbulencia, así como de predecir la existencia de una cascada de energía que se dirige de las grandes escalas hacia las pequeñas. Veinte años más tarde, él y Oboukhov mejoraron la teoría de 1941 para tener en cuenta la naturaleza intermitente de la disipación de energía. Todos estas propiedades de la turbulencia descritas por la teoría K41 y más tarde por la teoría KO62 han sido comprobadas experimentalmente.

Hicieron falta 44 años para que Frisch y Parisi generalizaran la descripción de la turbulencia hecha por Kolmogorov, y desarrollaran el formalismo multifractal, que permite describir tanto la teoría de Kolmogorov 1941 como la teoría de Kolmogorov-Oboukhov de 1962. Este formalismo es también capaz de caracterizar teorías físicas modernas como el modelo β o el modelo She-Leveque de la turbulencia [1]. Más allá, el formalismo multifractal es un marco genérico basado en la caracterización del orden de las singularidades del proceso estudiado y, por lo tanto, es aplicable al estudio de todo tipo de señales experimentales. Una objeción posible al formalismo es que se aleja de la física del fenómeno estudiado. Sin embargo, provee un marco ideal para la caracterización estadística de medidas experimentales de procesos y sistemas multiescala, como es el caso de la turbulencia.

Este artículo presenta una descripción de la turbulencia basada en los fenómenos de inva-

rianza de escala y autosemejanza partiendo de la pionera teoría de Kolmogorov. No obstante, vale la pena mencionar otros enfoques de la turbulencia, en concreto, la descripción basada en la teoría de sistemas dinámicos que busca relacionar turbulencia y caos, y que permite integrar autosemejanza y multifractalidad [9, 10].

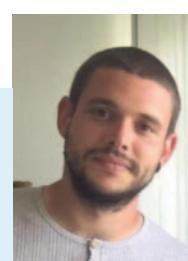
Agradecimientos

Por las multiples e interesantes discusiones en torno al tema de la turbulencia, a Laurent Chevillard, Stéphane Roux, Nicolas Garnier y Rafael Granero-Belinchón.

Referencias

- [1] U. FRISCH, *Turbulence: The Legacy of A. N. Kolmogorov* (Cambridge University Press, 1995).
- [2] L. F. RICHARDSON, "Some Measurements of Atmospheric Turbulence", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a Mathematical or Physical Character* 221:1-28, 1921.
- [3] A. N. KOLMOGOROV. The Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous Fluid for Very Large Reynolds Numbers", *Proceedings: Mathematical and Physical Sciences* 434(1890):9-13, 1991.
- [4] L. D. LANDAU y E. M. LIFSHITZ, *Mecánica de fluidos. Volumen 6* (Editorial Reverté, 2009).
- [5] A. N. KOLMOGOROV, A Refinement of Previous Hypotheses Concerning the Local Structure of Turbulence in a Viscous Incompressible Fluid at High Reynolds Number, *Journal of Fluid Mechanics* 13:82–85, 5 1962.
- [6] A. M. OBOUKHOV, "Some Specific Features of Atmospheric Turbulence", *Journal of Fluid Mechanics* 13:77-81, 5 1962.
- [7] H. TENNEKES y J. C. WYNGAARD, The Intermittent Small-Scale Structure of Turbulence: Data-Processing Hazards, *J. Fluid Mech* 55:93–103, 1972.
- [8] F. ANSELMET, Y. GAGNE, E. J. HOPFINGER y R. A. ANTONIA, High-Order Velocity Structure Functions in Turbulent Shear Flow, *Journal of Fluid Mechanics* 140:63–89, 1984.
- [9] D. RUELLE y F. TAKENS, On The Nature of Turbulence, *Communications in Mathematical Physics* 20:167–192, 1971.
- [10] T. BOHR, M. JENSEN, G. PALADIN y A. VULPIANI, *Dynamical Systems Approach to Turbulence*. Cambridge Nonlinear Science Series (Cambridge, Cambridge University Press, 1998).

Carlos Granero-Belinchón
IMT Atlantique, Lab-STICC UMR
CNRS, Technopôle Brest Iroise,
29239 Brest, Francia



¿Estás vistiendo un metamaterial?

Explorando la física de los tejidos de punto

Denís Arribas Blanco*

Con alrededor de un siglo de historia, la física de los tejidos de punto ha desarrollado un amplio corpus de conocimiento y prometedoras aplicaciones que demuestran la trascendencia de la investigación en la física de los objetos cotidianos.

Las propiedades de los tejidos de punto llevan décadas despertando el interés de físicos e investigadores. Esta creciente atención se debe en gran medida a la capacidad de los tejidos de punto de estirarse hasta varias veces su longitud original a pesar de que el hilo del que están hechos es apenas extensible. En este artículo se presentan las principales aportaciones de las investigaciones que desde comienzos del siglo XX han tratado de dar explicación a esta característica, que ha llevado a los tejidos de punto a ser considerados metamateriales mecánicos. Asimismo, se mencionan sus principales aplicaciones en áreas tan diversas como la medicina o la aeronáutica.

Introducción

Es hora de que los físicos se pongan a calcetar.

Pedro Reis,
Profesor de Ingeniería Mecánica

En marzo de 2019 cientos de investigadores se reunieron en Boston en uno de los encuentros de físicos más importantes del mundo, organizado por la American Physical Society (APS). La sesión titulada “Fabrics, Knits, and Knots” fue íntegramente dedicada a la física de los tejidos y textiles, y los tejidos de punto fueron uno de los principales temas de interés¹. Pero, ¿qué tienen estos tejidos que los hace tan especiales?

Los tejidos de punto pueden estirarse hasta varias veces su longitud, pese a que el hilo del que estén hechos sea apenas extensible. Esta aparente paradoja ha llevado a los investigadores a considerar los tejidos de punto como metamateriales. Las propiedades macroscópicas de un metamaterial están determinadas por su estructura interna y no por la composición química de sus constituyentes básicos [1]. Esta estructura se puede modificar artificialmente para diseñar materiales con una amplia gama de propiedades emergentes que sus componentes no poseen individualmente. Por lo

tanto, los tejidos de punto son considerados metamateriales mecánicos, ya que la distribución y geometría de los puntos de calceta y los bucles de hilo son los responsables de la elasticidad del tejido en su conjunto.

Aunque el interés por este tipo de tejidos pueda parecer reciente, los primeros trabajos científicos sobre el tema se remontan al menos a la década de 1920. Este artículo se propone explorar la física de los tejidos de punto con el objetivo de determinar las características de su estructura interna que dan lugar a su elasticidad emergente. Asimismo, se abordarán las principales aplicaciones de la investigación en este campo.

La física de los tejidos de punto

Descripción de un tejido de punto liso

Una de las principales características de un tejido de punto es que su estructura está constituida por bucles entrelazados [2]. Así, las prendas de punto más simples están hechas, en su mayoría, de un único hilo que se cruza sobre sí mismo varias veces hasta formar una estructura periódica en la que el hilo se dobla formando bucles [3, 4].

Casi todas las investigaciones realizadas hasta la fecha se han centrado en un tipo particular de patrón de tejido conocido como punto liso o punto jersey, que se muestra en la Figura 1. Esta es la estructura de punto con la topología más simple, ya que cada puntada corresponde a una única celda en la matriz de bucles entrelazados. Por lo tanto, el patrón de punto liso es muy conveniente para el estudio y elaboración de modelos físico-matemáticos que describan el tejido [3, 5].

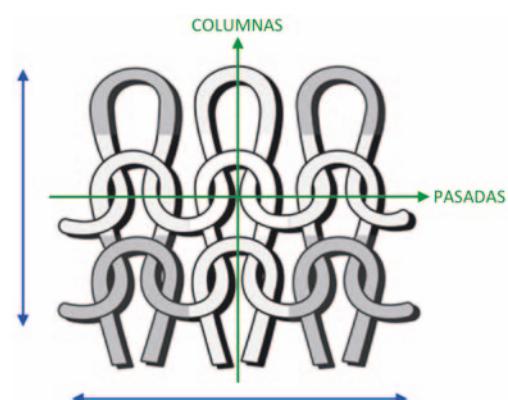


Figura 1.
Diagrama de un tejido de punto liso que muestra las direcciones de las pasadas y las columnas (adaptado de [6]).

* Medalla de Oro en la XXIX Olimpiada Española de Física (2018).

1 American Physical Society, “Fabrics, Knits, and Knots”, en APS March Meeting 2019, Boston, MA, EE. UU., pp. 1704-1707 (2019). [Online]. Disponible desde: <https://bit.ly/3klZX0f>.

Un tejido de punto liso tiene dos direcciones principales. Las filas de bucles se conocen como tramas o pasadas (“courses”, en inglés) y corren paralelas al ancho de la tela. Por el contrario, las columnas (“wales”, en inglés) de bucles corren paralelas a la longitud de la tela [7].

Configuración de equilibrio de un tejido de punto

Las primeras investigaciones se centraron principalmente en aspectos prácticos útiles para la industria textil. Su principal objetivo era ayudar a estandarizar el proceso de fabricación a través de la predicción cuantitativa de las propiedades del tejido final. Para ello, varios autores desarrollaron modelos geométricos que describían la forma de los bucles formados por el hilo en la configuración de equilibrio del tejido. En esta configuración, también conocida como estado relajado, la tela está libre de tensiones externas. Comprender la geometría de un solo bucle se consideraba suficiente para deducir las propiedades de todo el tejido en el estado relajado. Esto permitió a los investigadores determinar las relaciones entre las propiedades del hilo, las características del proceso de tejido y las propiedades dimensionales y de peso del tejido resultante [6]. Ejemplos de estas propiedades incluyen el ancho, el largo, la densidad de puntadas y el peso por unidad de área de la tela.

Chamberlain [8] elaboró en 1926 el primer modelo de la geometría de un bucle de punto liso, que fue ampliado por Peirce [9] en 1947. Aunque este modelo sirvió para despertar el interés en los tejidos de punto dentro de la comunidad científica, estudios posteriores pronto demostraron que resultaba insatisfactorio [4, 5, 10, 11] y se propusieron nuevos modelos [5, 10, 11]. A pesar de las limitaciones de estos primeros estudios, como fue la elección de una geometría arbitraria para los bucles, a menudo se demostró que sus predicciones concordaban con los resultados experimentales en un grado relativamente bueno. Dos conclusiones importantes se pueden extraer del análisis de estos modelos:

1. La longitud de hilo por puntada l , es decir, la cantidad de hilo utilizada para tejer un solo bucle, es un parámetro clave para deducir las propiedades dimensionales de un tejido de punto.

2. La geometría de los bucles en la configuración de equilibrio del tejido es aquella que minimiza la energía potencial elástica de la tela en su conjunto.

Con respecto a la primera conclusión, estudios tanto experimentales [4] como teóricos [5, 11] encontraron que las propiedades dimensionales y de peso de un tejido de punto dependen únicamente de l . Por ejemplo, la densidad de puntadas N (número de puntadas por unidad de área de la tela) es proporcional a l^{-2} , como se muestra en la Figura 2. Además, l resulta ser independiente de las propiedades de las fibras que componen el hilo, de la estructura del propio hilo, de las características del proceso de tejido y de las tensiones externas a

las que se vea sometido el tejido [4, 5]. Esta es la razón por la que en la Figura 2 se sitúan sobre la misma curva los datos correspondientes a tipos muy diferentes de tejidos de punto.

Por las razones anteriormente descritas y debido a que se puede medir durante el proceso de tejido mediante dispositivos específicamente diseñados para ello, l constituye una medida muy útil de la calidad del tejido [5].

En cuanto a la segunda conclusión, Munden [5] señaló que el estado natural de un hilo que no está sometido a fuerzas externas es estar derecho. Por lo tanto, un hilo que se dobla formando un bucle tenderá a enderezarse. Sin embargo, cuando el hilo forma parte de un tejido de punto, las fuerzas de reacción que actúan en los puntos de contacto entre bucles vecinos impiden que el hilo vuelva a su estado original. Para que un bucle concreto se enderezase, los bucles vecinos tendrían que incrementar su propio grado de curvatura. En consecuencia, la forma de equilibrio que toman los bucles cuando el tejido se relaja es la que minimiza la flexión total de los bucles dentro de todo el tejido [5]. Esto corresponde a minimizar la energía potencial elástica del tejido.

La capacidad del tejido para volver a su estado relajado después de que cesen las tensiones ejercidas sobre él depende de la elasticidad del hilo y de la magnitud de las fuerzas de fricción entre bucles [5]. El hilo utilizado habitualmente para tejer no es muy elástico, mientras que las regiones de contacto entre bucles son puntos de alta fricción. Esta es la causa del comportamiento histerético que presentan algunos tejidos de punto. Esto es, el tejido tiende a mantener su estado deformado incluso después de que las fuerzas que lo provocaron desaparezcan [12].

Las consideraciones anteriores relativas a la minimización de la energía elástica fueron tomadas en cuenta por investigaciones posteriores para idear modelos más elaborados sobre el estado relajado de un tejido de punto. En lugar de centrarse única-

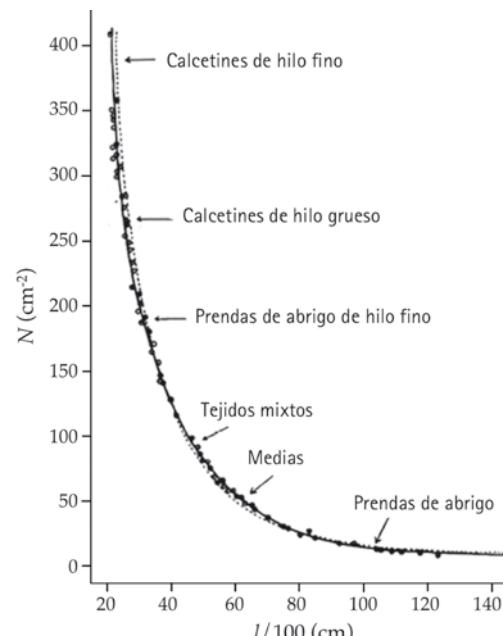


Figura 2. Densidad de puntadas en función de la longitud de hilo por puntada para varios tejidos de punto liso en su estado relajado (adaptado de [4]).

mente en la geometría de los bucles del tejido, estas investigaciones desarrollaron modelos mecánicos que consideraron las fuerzas y los momentos de fuerza que actúan sobre los bucles. De esta manera, Shanahan y Postle [13] demostraron que existe una configuración de energía elástica mínima que es en gran medida independiente de las propiedades del hilo y de lo ceñido que sea el tejido. Sin embargo, encontraron que el mínimo de energía es muy poco profundo, por lo que resulta muy probable encontrar un tejido no tensado cuya estructura sea ligeramente diferente de la que corresponde al estado de mínima energía. Esto explica las importantes discrepancias entre los diferentes estudios experimentales que midieron las propiedades dimensionales de los tejidos de punto en estado relajado. Choi y Lo [14] llegaron a las mismas conclusiones empleando un modelo diferente, basado en un análisis geométrico de los bucles junto a la minimización de su energía total.

Propiedades de carga-extensión de los tejidos de punto

Desarrollar una teoría de los tejidos de punto completa requería describir la respuesta mecánica del tejido a las fuerzas externas, conocidas como cargas. Esto conduciría en última instancia a determinar el mecanismo responsable de la extensibilidad de un tejido de punto [3]. Por lo tanto, se llevaron a cabo algunas investigaciones cuyo objetivo principal fue examinar y predecir las propiedades de carga-extensión de los tejidos de punto [2, 3, 12, 15, 16]. Intentaron encontrar la magnitud de la carga que debe aplicarse a la tela para producir una determinada extensión a lo largo de un eje en concreto.

Ya en 1953 se proporcionaron curvas de carga-extensión obtenidas experimentalmente para tejidos de punto liso estirados en la dirección de las pasadas y de las columnas hasta el punto de rotura del tejido [4]. Popper [2] propuso uno de los primeros modelos teóricos con el objetivo de predecir las propiedades de carga-extensión de un tejido de punto, de manera muy similar a las investigaciones anteriores sobre la configuración de equilibrio. Así, consideró la geometría de un bucle de punto liso que se estira paralelamente a las pasadas y columnas, suponiendo que todos los bucles de la tela se deforman exactamente de la misma manera. Es por ello que una de las limitaciones de este y otros estudios [15, 16] es que solo son válidos si la deformación del tejido es homogénea.

Un modelo muy reciente de las características de carga-extensión de un tejido de punto liso que es estirado uniaxialmente fue desarrollado por Poincloux *et al.* en 2018 [3]. Este modelo no hace ninguna suposición sobre la geometría del bucle, sino que se basa en consideraciones fundamentales sobre la topología de la malla que sirvieron para imponer ciertas restricciones al comportamiento del tejido de las que se dedujeron varias de sus propiedades. Los investigadores destacaron tres aspectos esenciales:

A. Restricciones topológicas

Desde un punto de vista topológico, un tejido de punto es un objeto geométrico que se deforma continuamente cuando es estirado por fuerzas externas. Los autores señalaron que esta deformación no puede cambiar el número total y la posición relativa de las puntadas dentro de la malla. El número total de puntadas debe conservarse si el tejido no se rompe. Además, aunque se permite que el hilo se deslice de una puntada a otra, las puntadas en sí mismas no pueden intercambiar posiciones. Al expresar estas limitaciones topológicas matemáticamente e incorporarlas a su modelo, los investigadores pudieron describir la cinemática de un tejido de punto liso en dos dimensiones.

B. Minimización de la energía elástica

La energía potencial elástica total del tejido es la suma de tres términos. Estos corresponden al estiramiento o tracción, torsión y flexión del hilo. Sin embargo, el grado de torsión del hilo no cambia durante un estiramiento bidimensional de la malla. Además, para cargas bajas, el hilo en sí apenas se estira conforme se estira el tejido, como ya habían señalado investigaciones anteriores [4, 15, 16]. Por lo tanto, la energía de torsión puede despreciarse dado que su valor es constante, así como la energía de tracción, pues su magnitud es extremadamente pequeña.

C. Conservación de la longitud del hilo

La última restricción incorporada al modelo fue que la longitud total del hilo en el tejido debía conservarse en todo momento. Esta condición se deduce del hecho de que el hilo apenas se estira al estirar la malla.

Estos principios permitieron a los investigadores obtener las ecuaciones que describen la mecánica del tejido en condiciones de carga. Consideraron la flexión de los bucles formados por el hilo como el único mecanismo de deformación del tejido y, consecuentemente, su análisis se basó en la minimización de la energía de flexión. Para probar su modelo realizaron un experimento con una malla tejida con hilo de nailon. El modelo fue capaz de predecir con precisión la curva de carga-extensión para estiramientos de hasta el 100 % de la longitud original del tejido, como se muestra en la Figura 3 (a). De manera similar, se calculó el campo de desplazamientos esperado que describe las posiciones de las puntadas en el tejido deformado, y se mostró que coincidía con el campo de desplazamientos observado experimentalmente (Figura 3 (b)).

Se encontró que el modelo tenía un alto poder predictivo tanto para deformaciones homogéneas como no homogéneas. Sin embargo, los investigadores destacaron algunas limitaciones. En primer lugar, solo es válido si el diámetro del hilo es muy pequeño en comparación con el tamaño de la puntada, por lo que no puede describir correctamente los tejidos de punto ceñidos. En segundo lugar, no puede predecir el comportamiento no lineal de la curva de carga-extensión al alcanzarse extensiones elevadas. Dado

que el propio hilo comienza a estirarse con cargas muy grandes, debería tenerse en cuenta la energía de tracción. Finalmente, el modelo trata el tejido como un objeto bidimensional, por lo que no puede describir efectos que son necesariamente tridimensionales, como el combado de la malla sobre sus bordes que se puede apreciar en la Figura 3 (a).

A pesar de las limitaciones expuestas, la pregunta de por qué los tejidos de punto son tan extensibles puede finalmente ser respondida. Las principales razones físicas de esta elevada extensibilidad son dos:

1. El hilo puede deslizarse de una puntada a las adyacentes, pudiendo moverse con gran libertad dentro de la tela.
2. El grado de flexión de los bucles formados por el hilo aumenta a medida que se estira la tela, mientras que la longitud del hilo en sí apenas se ve afectada.

Aplicaciones

Las primeras aplicaciones de los tejidos de punto ajena a su uso como vestimentas surgieron hace ya varias décadas. Por ejemplo, Popper [2] señaló en 1961 que las telas de punto estaban siendo empleadas en refuerzos para mangueras de jardín. Además, algunos trajes espaciales contaban ya entonces con capas con una estructura muy similar a la de un tejido de punto. Hoy en día, es posible diseñar materiales inteligentes basados en hilos que se pueden programar para alterar sus propiedades mecánicas de acuerdo con diversas necesidades específicas. Esta sección describirá tres áreas fundamentales de aplicación de los tejidos de punto.

A. Industria e ingeniería

Los tejidos de punto tienen por sí mismos propiedades muy útiles en el campo de la industria. Además de su alta elasticidad y capacidad para cambiar de forma, son baratos, ligeros y sencillos de fabricar. Se puede lograr una mayor eficiencia elaborando los tejidos a partir de fibras de alto rendimiento hechas con materiales como vidrio, carbono, aramida o cerámica [7, 15]. Sin embargo, muchas de las aplicaciones industriales de los tejidos de punto surgen de su capacidad para formar compuestos con otros materiales que mejoran sus propiedades. Algunos ejemplos destacados incluyen resinas termoplásticas y termoestables [15] e incrustaciones de otros hilos o fibras [16].

Los compuestos de tejidos poseen grandes propiedades de absorción de energía y una alta resistencia a los impactos [7]. Esto ha llevado a su uso como refuerzos para muy diferentes tipos de estructuras que van desde cascos para ciclismo hasta componentes de aeronaves (Figura 4). Asimismo, se emplean en el sector del transporte para fabricar refuerzos mecánicos permeables y como sustituto de componentes metálicos en automóviles, trenes y

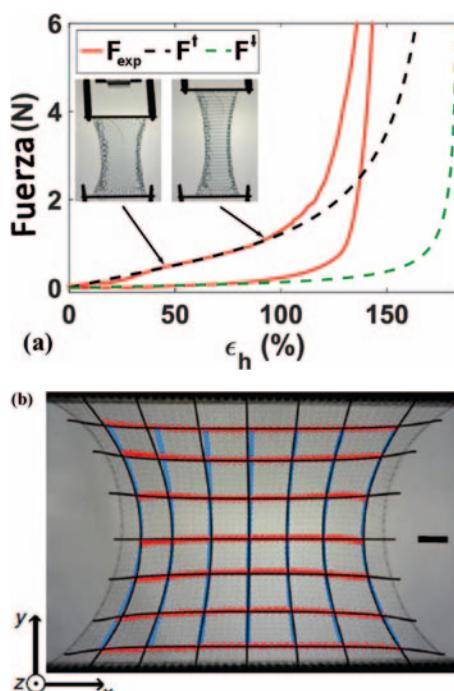


Figura 3. (a) Carga en función del cambio porcentual en la longitud de un tejido de punto liso estirado en la dirección de las columnas. Líneas continuas: curvas experimentales de carga-extensión para las fases de carga y descarga. Líneas punteadas: curvas de mejor ajuste a los datos. (b) Medidas del campo de desplazamientos de las puntadas a lo largo de las pasadas (líneas rojas) y las columnas (líneas azules) para una extensión del tejido del 11 %. Líneas negras: predicciones teóricas (adaptado de [3]).

autobuses para brindar protección mecánica². En la industria civil, se incluyen como parte de muros de hormigón y en la industria aeroespacial se utilizan para diseñar diversos tipos de carenados [7].

B. Medicina

Recientemente han surgido diversas aplicaciones biomédicas de los tejidos de punto debido a su capacidad para imitar ciertas características de las estructuras biológicas. Los compuestos de tejidos biocompatibles pueden utilizarse para reemplazar tejidos biológicos³ y para fabricar prótesis médicas [7]. Como ejemplo, Haines *et al.* [17] destacaron que antes de que los compuestos de tejidos fuesen considerados para la fabricación de fibras musculares artificiales, la mayoría de materiales se mostraban ineficaces a la hora de imitar las propiedades de tracción de los músculos.

C. Animación

La investigación sobre la física de los tejidos de punto también ha encontrado algunas aplicaciones en el campo de la animación. Dado que las ecuaciones que rigen el comportamiento de estos tejidos aún no son bien conocidas, los tejidos representados en los juegos de ordenador suelen simularse mediante modelos simples basados en muelles. Una mejor comprensión del comportamiento de este tipo de tejidos permitiría la introducción de ecuaciones más precisas en las simulaciones para hacerlas más realistas³. Ya se han realizado algunos avances en esta dirección. Por ejemplo, un grupo de investigadores de la Universidad de Cornell desarrolló una herramienta

2. S. Poincloux y F. Lechenault, *La physique du tricot* (París, Francia, 2018). (Vídeo online: <https://youtu.be/R5nG-F9jP2U>).

3. American Physical Society, “Mathematical Rules Underlie the Ancient Art of Knitting”, *ScienceDaily* (<https://bit.ly/3aKkOqT>).

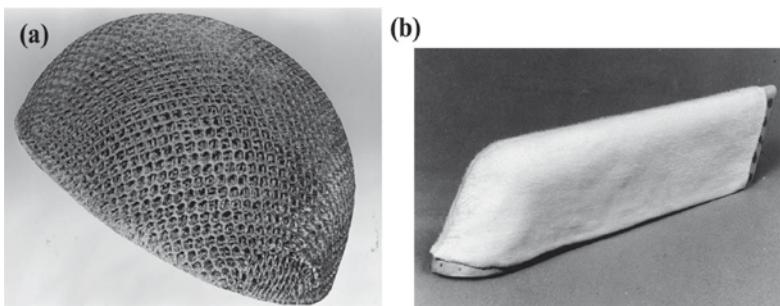


Figura 4. Armazones tejidos para **(a)** un casco de ciclismo y **(b)** el carenado de la punta del timón de una aeronave (reproducido de [7]).

que puede simular telas de punto con un nivel de detalle que alcanza la escala del propio hilo [18].

Retos de futuro

A pesar del extenso corpus de conocimiento desarrollado en torno a los tejidos de punto durante casi un siglo, todavía existen muchos desafíos que futuras investigaciones deberán abordar. Nuevas líneas de investigación tienen como objetivo describir el comportamiento tridimensional de los tejidos de punto, ya que muchos de los modelos existentes de la estructura de punto liso son bidimensionales. Esto es algo que Elisabetta Matsumoto y sus estudiantes están investigando en el Instituto de Tecnología de Georgia. Su equipo está tratando además de desarrollar enfoques más matemáticos basados en la teoría de nudos para poder describir cualquier patrón de punto, dado que casi todas las investigaciones hasta la fecha se han centrado en el punto liso⁴.

Conclusión

Las investigaciones han demostrado que los tejidos de punto tienen propiedades fascinantes que los han llevado a ser considerados como meta-materiales. Su alta extensibilidad, adaptabilidad y capacidad para formar compuestos con una amplia gama de materiales son algunas de las características que explican sus aplicaciones en la industria, la medicina y la animación. Aunque este artículo se ha centrado principalmente en los atributos mecánicos de los tejidos de punto, hay muchos otros que podrían explorarse, como su porosidad, permeabilidad y propiedades térmicas y de transferencia de calor. Es ciertamente fascinante pensar en cómo actividades cotidianas como tejer involucran numerosos aspectos interesantes de la física y cómo la física puede, a su vez, ayudar a desentrañar los misterios que esconden estas tecnologías ancestrales pero no plenamente comprendidas.

Referencias

- [1] Y. LIU y X. ZHANG, "Metamaterials", *Encyclopedia Britannica* (Chicago, 2016).
- [2] P. POPPER, "The Theoretical Behavior of a Knitted Fabric Subjected to Biaxial Stresses", *Dir. Mater. Pro-*

4 Ver nota a pie núm. 3 en la página anterior.

- cess., Aeronaut. Syst. Div., EE. UU., Rep. WADD TR 60-897 (1961).
- [3] S. POINCLOUX, M. ADDA-BEDIA y F. LECHENAULT, "Geometry and Elasticity of a Knitted Fabric", *Phys. Rev. X* 8, 021075 (2018).
- [4] J. C. H. HURD y P. J. DOYLE, "Fundamental Aspects of the Design of Knitted Fabrics", *J. Text. Inst. Proc.* 44, P561-P568 (1953).
- [5] D. L. MUNDEN, "The Geometry and Dimensional Properties of Plain-Knitted Fabrics", *J. Text. Inst. Trans.* 50, T448-T471 (1959).
- [6] K. SHAKER, M. UMAIR, W. ASHRAF y Y. NAWAB, "Fabric manufacturing," en *Textile Engineering*, (Y. Nawab, Ed., Berlín, Alemania, De Gruyter, cap. 4, pp. 47-82, 2016).
- [7] K. H. LEONG, S. RAMAKRISHNA, Z. M. HUANG y G. A. BIBO, "The Potential of Knitting for Engineering Composites-A Review", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* 31, 197-220 (2000).
- [8] J. CHAMBERLAIN, *Hosiery Yarns and Fabrics* 2 (City of Leicester College of Technology, Leicester, 1926).
- [9] F. T. PEIRCE, "Geometrical Principles Applicable to the Design of Functional Fabrics", *Text. Res. J.* 17, 123-147 (1947).
- [10] G. A. V. LEAF y A. GLASKIN, "The Geometry of a Plain Knitted Loop", *J. Text. Inst. Trans.* 46, T587-T605 (1955).
- [11] G. A. V. LEAF, "Models of the Plain-Knitted Loop", *J. Text. Inst. Trans.* 51, T49-T58 (1960).
- [12] G. DUSSERRE, "Modelling the Hysteretic Wale-wise Stretching Behaviour of Technical Plain Knits", *Eur. J. Mech. A/Solids* 51, 160-171 (2015).
- [13] W. J. SHANAHAN y R. POSTLE, "A Theoretical Analysis of the Plain-Knitted Structure", *Text. Res. J.* 40, 656-665 (1970).
- [14] K. F. CHOI y T. Y. LO, "An Energy Model of Plain Knitted Fabric", *Text. Res. J.* 73, 739-748 (2003).
- [15] H. HONG, M. D. DE ARAUJO, R. FANGUEIRO y O. CIOBANU, "Theoretical Analysis of Load-Extension Properties of Plain Weft Knits Made from High Performance Yarns for Composite Reinforcement", *Text. Res. J.* 72, 991-996 (2002).
- [16] G. DUSSERRE, L. BALEA y G. BERNHART, "Elastic Properties Prediction of a Knitted Composite with Inlaid Yarns Subjected to Stretching: A Coupled Semi-analytical Model", *Composites Part A: Appl. Sci. Manuf.* 64, 185-193 (2014).
- [17] C. S. HAINES, N. LI, G. M. SPINKS, A. E. ALIEV, J. DI y R. H. BAUGHMAN, "New Twist on Artificial Muscles", *Proc. Nat. Acad. Sci.* 113, 11.709-11.716 (2016).
- [18] J. M. KALDOR, D. L. JAMES y S. MARSCHNER, "Simulating Knitted Cloth at the Yarn Level", *ACM Trans. Graph.* 27 (2008).

Denís Arribas Blanco
Estudiante del Grado con Máster
(MSci) de Física con Física Teórica
en el Department of Physics,
Imperial College London



Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

Detección de exoplanetas por el método de los tránsitos: Una simulación en arduino

David Pamos Ortega
IES Levante, Algeciras

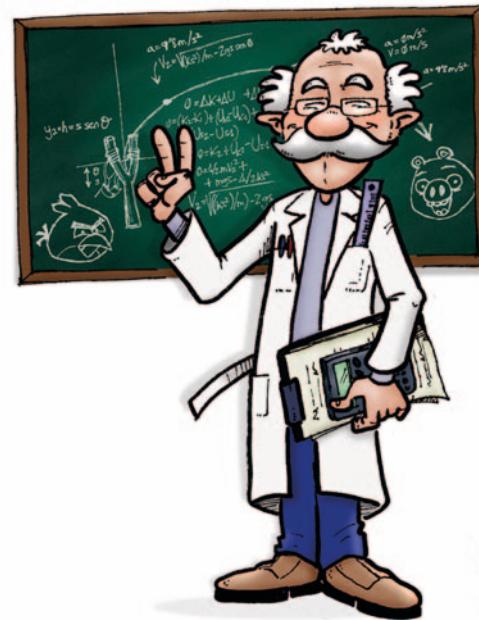


En 2019 fueron galardonados con el premio Nobel de Física los investigadores James Peebles, Michel Mayor y Didier Queloz por su contribución a la comprensión del universo. En particular, los dos últimos porque fueron los primeros en descubrir en 1995 un exoplaneta alrededor de una estrella de tipo solar, 51 Pegasi b, a unos 51 años luz de la Tierra. Un planeta extrasolar o exoplaneta es un planeta que orbita una estrella diferente al Sol y que, por lo tanto, no pertenece al Sistema Solar. Entre los métodos más utilizados para su detección está el método del tránsito, con el que los astrónomos miden el cambio periódico en el brillo aparente de la estrella cuando un planeta perteneciente a su sistema pasa por delante de ella.

Con el propósito de divulgar al público este tema tan interesante, y a la vez de actualidad, en nuestro centro se construyó una simulación controlada por Arduino para ilustrar este método con el que las sondas espaciales Kepler (NASA, 2009), CoRoT (ESA, 2006), y actualmente TESS (NASA, 2018), han conseguido detectar más de 4 000 exoplanetas.

Introducción

Encontrar un lugar fuera de la Tierra donde la vida sea posible, e incluso una realidad, es uno de los grandes objetivos de la ciencia actual. La tecnología no nos permite todavía viajar fuera del Sistema Solar hacia las estrellas a la conquista de mundos desconocidos, pero sí mirar increíblemente lejos. La estrella más cercana a la Tierra se halla aproximadamente a unos 4 años luz. Se trata de Próxima Centauri. Encontrar un planeta extrasolar que orbite en torno a su estrella se nos antoja una misión casi imposible, ya que se halla muy lejos y no brilla con luz propia. Sin embargo, en 1995, los astrónomos suizos Michel Mayor y Didier Queloz utilizaron la técnica de las velocidades radiales para descubrir la existencia de planetas extrasolares. Si el planeta se halla lo suficientemente cerca de su estrella y es lo suficientemente grande, puede provocar en ella un movimiento de bamboleo semejante al que un lanzador de pesas experimenta mientras gira antes de lanzarla. La componente dirigida a lo largo de la visual de ese movimiento de vaivén en la estrella, provocado por la influencia gravitatoria del planeta que se encuentra relativamente cerca, se llama



-13-

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

velocidad radial. Y es la responsable de que se produzca un efecto Doppler en la luz que la estrella nos envía. Así que, analizando el espectro de luz de la estrella, podemos deducir el valor de esa velocidad radial, y, a partir de ella, la masa mínima que debe tener el exoplaneta. Así es como Mayor y Queloz detectaron 51 Pegasi b, el primer exoplaneta en ser descubierto alrededor de una estrella de tipo solar, a una distancia de unos 51 años luz de la Tierra [1]. Unos cuantos años más tarde fue lanzada al espacio la misión CoRoT, de la ESA, con la que era posible medir el brillo aparente de las estrellas con una precisión de micromagnitudes. El fotómetro de a bordo era capaz de detectar los cambios periódicos en el brillo de una estrella cuando un planeta perteneciente a su sistema pasaba por delante. Se trata del método del tránsito, análogo al que nosotros podemos ver con los planetas internos de nuestro Sistema Solar, esto es, Mercurio y Venus, cuando pasan por delante del Sol. Junto con la misión Kepler lanzada por la NASA en 2009, fue posible detectar y caracterizar gracias a este método miles de exoplanetas, si no confirmados, validados por métodos estadísticos. En la Figura 1 se representa una típica curva de luz que muestra el brillo aparente normalizado en función del tiempo de observación, con datos reales procedentes de la misión Spitzer, de la NASA (2003), correspondientes a la estrella GJ 436, cuyo planeta GJ 436 b fue descubierto por Butler en 2004 utilizando el método de la velocidad radial [2].

Hay un descenso en el flujo que se corresponde con el patrón de un tránsito planetario frente a su estrella. Cuando el planeta está en la posición 1, justo antes de comenzar el tránsito, el valor del flujo normalizado es aproximadamente uno. Entre las posiciones 2 y 3, mientras el planeta pasa por delante de la estrella, el valor del flujo es de aproximadamente 0.993. A partir de la posición 4, el flujo vuelve a ser su valor normal.

La profundidad del tránsito se define como la disminución de flujo luminoso relativo al flujo luminoso total de la estrella. En nuestro caso, si restamos el flujo normal menos el flujo reducido con los valores que hemos obtenido de la gráfica, obtenemos que la profundidad del tránsito vale $TD = 1 - 0.993 = 0.007$.

Como ésta es, a su vez, igual a la razón entre las áreas del planeta y de su estrella, según la fórmula aproximada:

$$TD = \frac{\pi R_p^2}{\pi R_*^2} \quad [1]$$

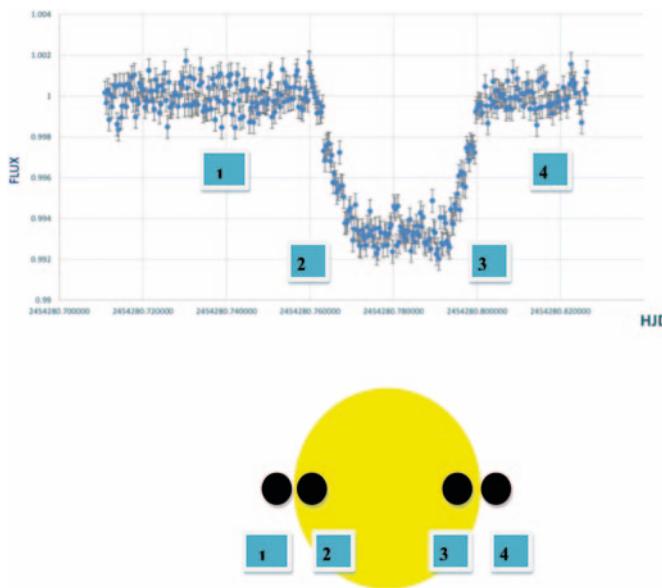


Figura 1. En el panel superior, curva de luz con datos reales del flujo en función de los días julianos, obtenidos por la misión Spitzer, de la NASA, correspondientes a la estrella GJ 436, y su planeta GJ 436 b. En la parte de abajo se indican las posiciones clave por las que el exoplaneta pasa por delante de su estrella.

De aquí resulta para el radio del planeta:

$$R_p = R_* \sqrt{TD} \quad [2]$$

El período orbital, P , puede deducirse utilizando dos tránsitos sucesivos. Utilizando la tercera ley de Kepler:

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{1}{M_*} \quad [3]$$

y conocida la masa de la estrella, M_* , podemos calcular el semieje mayor de la elipse, a , que representa la órbita del exoplaneta.

Con el método de la velocidad radial podemos hallar la masa mínima del planeta. Es necesario conocer la inclinación con respecto a la visual para tener una medida de la masa sin incertidumbres. Por otra parte, con el del tránsito podemos hallar su radio. Combinando los dos métodos podemos obtener entonces la densidad media, y por tanto tener alguna idea sobre el tipo de planeta descubierto, por ejemplo si es rocoso o gaseoso.

La Figura 2 muestra un diagrama con la distribución de exoplanetas, confirmados a fecha de enero de 2021, en función de su tamaño y densidad, con una escala de colores que muestra la masa de la estrella en torno a la cual órbita [3]. Se aprecia cómo la mayoría de exoplanetas detectados tienen un tamaño similar o superior al de Júpiter, llamado Júpites calientes, puesto que se hallan relativamente cerca de su estrella. Otros exoplanetas descubiertos tienen un radio que oscila entre 0.1 y 1 veces el radio de Júpiter, lo que los asemeja a Super Tierras, puesto que, aun siendo mayores que los planetas rocosos del Sistema Solar, tienen una densidad parecida a ellos. La escala de colores muestra la masa de la estrella en torno a la cual orbita, siendo mayoritariamente estrellas entre 1.0 y 2.0 masas solares. Esto no deja de ser un sesgo observacional, teniendo en cuenta la limitada precisión de los instrumentos utilizados para su detección.

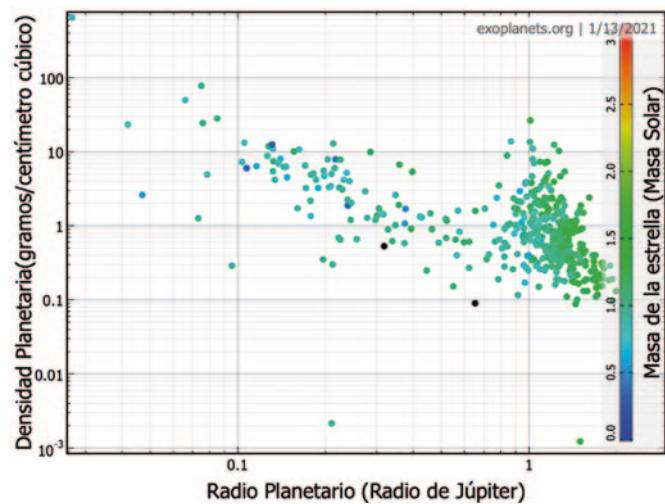


Figura 2. Distribución de todos los exoplanetas descubiertos a fecha de enero de 2021, en el diagrama densidad-radio, que puede construirse online en [3].

Objetivos del proyecto

Un grupo de alumnos de tercero de la ESO y yo nos propusimos, durante el curso 2019-2020, crear una simulación utilizando el lenguaje Arduino para divulgar el método del tránsito al público, en un proyecto que fuese presentado a concurso en la que sería la XIV edición de Diverciencia, una feria científica que tradicionalmente se celebra en Algeciras. Participan centros de primaria y secundaria, así como numerosas instituciones, ya no solo nacionales, sino también internacionales. Debido a la situación de pandemia, no pudo celebrarse de forma presencial en el mes de mayo, y tuvo que posponerse al mes de octubre de 2020 y realizarse de forma virtual. Se creó una página web para que toda la comunidad educativa de la comarca y cualquier interesado pudiese ver los proyectos presentados por cada centro, de manera que se pudiesen votar los favoritos. En este enlace se puede visitar el nuestro [4]. En él aparece un vídeo publicado en YouTube con la presentación realizada por los propios alumnos, así como alguna documentación relacionada con el proyecto. El nuestro fue el tercero más votado de entre una lista de 40 proyectos participantes, y consiguió el segundo premio en la modalidad de ciencias puras, lo que supuso un gran éxito de aceptación por parte del público y del jurado.

Los objetivos, algunos pedagógicos, dirigidos a los alumnos, y otros más bien de carácter divulgativo para el gran público, fueron los siguientes:

- Dar a conocer un campo de investigación en la Astronomía y Astrofísica moderna muy en auge, como es la detección y caracterización física de los exoplanetas, para incidir, sobre todo, en la posibilidad de encontrar mundos como el nuestro.
- Aportar estrategias para divulgar al gran público qué son los exoplanetas y algunos de los principales métodos utilizados para su detección.
- Construir una simulación utilizando materiales accesibles y baratos para ilustrar uno de esos métodos de detección: el método del tránsito.
- Introducir a los alumnos implicados en el lenguaje de programación Arduino para programar la simulación.

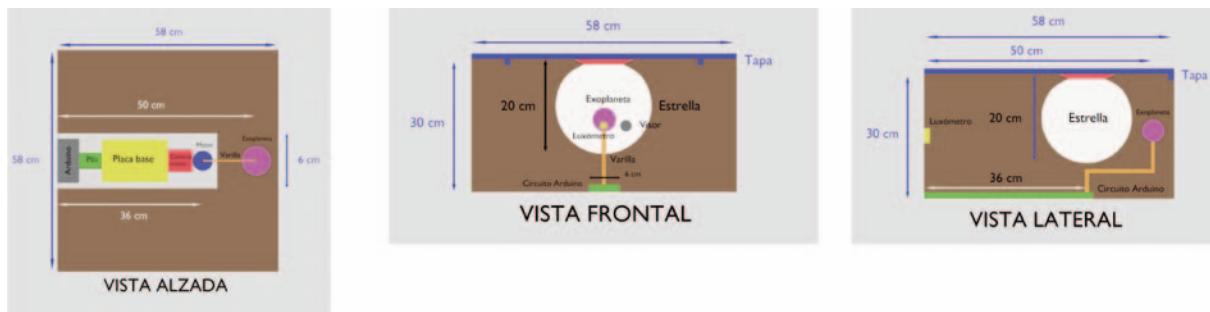


Figura 3.
Diseño de la simulación.

Construcción de la simulación

Los materiales necesarios para construir la simulación son:

Para la construcción de la caja:

- Tableros MDF.
- 2 bisagras.

Para la simulación Arduino:

- Lámpara esférica de 20 cm de diámetro.
- Alambre.
- Bolas de porexpan.
- Arduino UNO.
- Cables de conexión.
- Motor reductor.
- Módulo para el control del motor reductor.
- Batería 9 V.
- Sensor de luz BH1750.
- Placa base.

En nuestra simulación, situamos una lámpara esférica (la estrella) dentro de una caja de madera de unos $60 \times 60 \times 30$ cm, alrededor de la cual gira una bola (el exoplaneta) animada por un motor reductor controlado por Arduino. Un sensor de luz BH1750, igualmente controlado por Arduino, mide continuamente la cantidad de luz emitida por la lámpara, de manera que, cuando la bola pase por delante de ella, se producirá una caída de luz como la que se produce en el método del tránsito. Como Arduino no permite realizar dos tareas simultáneamente, en la programación del código es necesario utilizar librerías de tareas asíncronas, las cuales permiten que el código vaya haciendo una tarea (mover el motor reductor) y luego la otra (leer la cantidad de luz con el luxómetro) con una diferencia de tiempo de unos pocos microsegundos, de manera que parezca que el sistema lo hace de forma sincrónica. Los datos se enviarán por puerto serie a un ordenador, con los que se obtendrá la curva de luz.

Utilizando bolas de porexpan de distintos tamaños podemos simular distintos tipos de exoplanetas y ver cómo la profundidad del tránsito cambia de uno a otro.

En la Figura 4 se muestra una de estas curvas de luz simuladas utilizando la función "Serial Plotter" de Arduino. Los alumnos pueden deducir el periodo orbital de la bola moviéndose en torno a la lámpara y midiendo el tiempo transcurrido, en segundos, entre dos caídas del brillo consecutivos, y, al mismo tiempo, la profundidad del tránsito midiendo la caída del brillo en uno de esos tránsitos, en luxes.

Conclusiones

Aunque podría mejorarse la simulación calibrando la distancia a la que debemos situar la bola de porexpan de la lámpara, y escogiendo tamaños adecuados para ellas, con el fin de

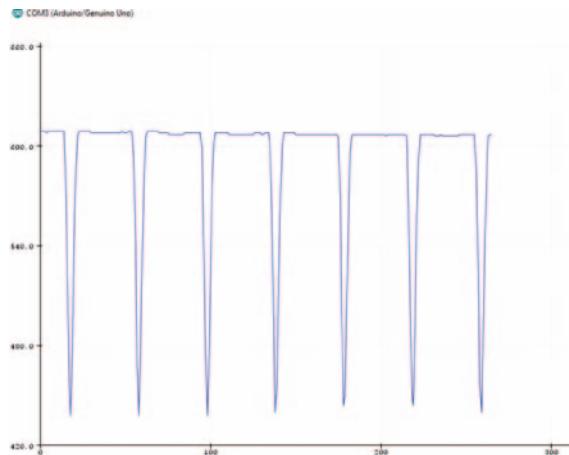


Figura 4. Curva de luz simulada con Arduino.

conseguir que la profundidad del tránsito sea igual a la razón entre las superficies de la bola y de la lámpara, como en la fórmula [1], los resultados cualitativos ya son lo suficientemente buenos como para que los alumnos y el público entiendan el método del tránsito con el que se han detectado la gran mayoría de exoplanetas descubiertos hasta ahora.

Agradecimientos

Quiero dar las gracias, sobre todo, a mi alumna Natalie y a mis alumnos Gonzalo, Alejandro, Mario y Javier, quienes pusieron mucho interés y ganas de trabajar en este proyecto, y que, a pesar de las difíciles circunstancias debidas a la situación de pandemia y confinamiento durante los difíciles meses desde marzo hasta junio del pasado curso, lo hemos podido sacar adelante. Gracias también a los compañeros de la Asociación Amigos de la Ciencia y a la Fundación del Campus Tecnológico de Algeciras, quienes han reconocido el valor de este trabajo con el segundo premio en la modalidad de ciencias puras en la XIV Jornada de Ciencia en la Calle. Y, por último, a todos los que vieron y/o votaron por nuestro proyecto visitando nuestro stand virtual, porque, en definitiva, se trataba de hacer una labor pedagógica y también divulgadora que llegase al mayor número de personas posible.

Referencias:

- [1] M. MAYOR y D. QUELOZ, "A Jupiter-mass companion to a solar-type star", *Nature* **378**, 355-359 (1995).
- [2] R. P. BUTLER *et al.*, "A Neptune-Mass Planet Orbiting the Nearby M Dwarf GJ 436", *The Astrophysical Journal* **617**, 580-588 (2004).
- [3] www.exoplanets.org
- [4] https://divercienciavirtual.com/?da_image=centros-ies-levante

Midiendo el vapor de agua de la atmósfera con un termómetro infrarrojo

Alejandro J. P. Aparicio

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura



Javier Vaquero-Martínez

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura



María Cruz Gallego

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura



Manuel Antón

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura



José Manuel Vaquero

Dpto. de Física, Universidad de Extremadura



El vapor de agua juega un papel fundamental en la atmósfera terrestre. Por lo tanto, conocer con precisión su cantidad adquiere una gran importancia, empleándose para ello complejos dispositivos. En el presente trabajo describimos un sencillo método que permite medir el contenido de vapor de agua atmosférico empleando un simple y económico termómetro infrarrojo. Así, la medida del vapor de agua puede ser efectuada por estudiantes de instituto o universidad, y ser llevada a cabo en forma de experimento cuando se aborden contenidos de ciencias atmosféricas en asignaturas encuadradas en el ámbito de las ciencias naturales y la geofísica.

Introducción

Las ciencias atmosféricas proporcionan una excelente oportunidad para realizar experiencias con equipos y elementos sencillos que sirvan para motivar a nuestros alumnos [1]. Las

experiencias en ciencias atmosféricas tienen el gran aliciente de abarcar prácticamente todas las ramas de la física, desde la óptica [2] hasta calibración de instrumentos [3]. En las últimas décadas, la irrupción de los satélites meteorológicos, teléfonos móviles, los sistemas de posicionamiento y otros instrumentos ha propiciado que se puedan realizar nuevos e interesantes experimentos por parte de los estudiantes de ciencias de la atmósfera [4].

El vapor de agua es un constituyente esencial de la atmósfera terrestre dada su influencia en multitud de fenómenos físicos que en ella tienen lugar. Por ejemplo, es una pieza clave en el funcionamiento del ciclo del agua y en el mantenimiento del rango de temperaturas apto para la vida en nuestro planeta. Esto se debe a que es el gas atmosférico que mayor cantidad de radiación infrarroja absorbe y emite, siendo el principal gas de efecto invernadero natural (el dióxido de carbono es el principal responsable del efecto invernadero antropogénico). De no ser por el vapor de agua, la Tierra sería un lugar mucho más frío. Sin embargo, debido al calentamiento global producido por el ser humano, la atmósfera aumenta su capacidad de retener agua en estado gaseoso, provocando así el aumento del contenido de vapor de agua, lo que, a su vez, potencia su efecto invernadero amplificando el calentamiento global. A este proceso se le denomina retroalimentación positiva climática [5]. Por tanto, la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener la atmósfera está principalmente controlada por la temperatura, mientras que su alta variabilidad tanto espacial como temporal está regulada por la dinámica atmosférica.

Hay varias maneras de denominar a la variable que especifica la cantidad de vapor de agua en la atmósfera: vapor de agua integrado, vapor de agua de la columna total, vapor de agua precipitable, agua precipitable integrada, o agua precipitable, entre otros. En todo caso, lo que representa esta variable es la altura de la columna de agua líquida que se obtendría si todo el vapor de agua existente en una columna de aire en la atmósfera se llevase a nivel de suelo en condiciones estándar de temperatura y presión. Por ello, su unidad de medida tiene dimensiones de longitud, típicamente milímetros o centímetros. Teniendo en cuenta la densidad del agua líquida, estas medidas son equivalentes a kilogramo por metro cuadrado y a gramos por centímetro cuadrado, respectivamente.

Existen diferentes tipos de aparatos utilizados para determinar el vapor de agua atmosférico. Por un lado, se emplean radiómetros que miden la radiación de microondas que emite el vapor de agua. Por otro lado, los fotómetros solares son dispositivos que se apuntan hacia el Sol y miden la radiación solar directa que de él llega en dos bandas de longitudes de onda cercanas: una en la que el vapor de agua absorbe y otra en la que no. También se usan globos sonda que son liberados a nivel de tierra y conforme ascienden por la atmósfera miden humedad, temperatura, presión, y otras variables. Por último, los satélites disponen de instrumentos que permiten implementar procedimientos para estimar el vapor de agua en la atmósfera. Algunos de estos procedimientos se basan en medidas de radiación solar reflejada por la Tierra, en medidas de radiación emitida por el propio vapor de agua y otros se fundamentan en el retraso inducido por el vapor de agua en señales del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) [6].

En particular, las medidas con GPS han sido validadas, considerándose muy fiables e independientes de la situación

atmosférica [7]. Para entender el método de obtención del vapor de agua a través de GPS hay que tener en cuenta que el receptor GPS (nuestro móvil, por ejemplo) recibe la señal de los satélites que forman la constelación GPS. Esta señal viaja a la velocidad de la luz, y se mide el tiempo que tarda en llegar del satélite al receptor en superficie. Sabiendo este tiempo, podemos obtener la distancia, y una vez conocida la distancia a varios satélites solamente existe un punto en el que el receptor puede estar. Sin embargo, la señal es perturbada por varios factores, entre ellos la parte baja de la atmósfera o troposfera. El retraso que induce la troposfera se obtiene con ciertos algoritmos, demasiado complejos para el propósito de esta nota [8]. Sin embargo, el retraso troposférico puede dividirse en dos: una parte debida a todos los componentes de la atmósfera, y otra parte debida exclusivamente al vapor de agua. Esto se debe a que la molécula de agua es la única polar de todas las que forman la atmósfera, y por tanto se comporta de manera diferente que las moléculas no polares. El retraso en la señal GPS producido por el vapor de agua es directamente proporcional a la variable vapor de agua precipitable.

El objetivo de esta nota es mostrar que también a través de un sencillo experimento se puede medir la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera mediante radiometría. Para ello solo necesitamos un pequeño termómetro infrarrojo de bajo coste. Mims III *et al.* [9] fueron los primeros en proponer este tipo de material para tal fin, además de describir un protocolo de realización de medidas. Tomamos dicho protocolo como punto de partida para realizar nuestro experimento.

A continuación, describimos brevemente la campaña de medidas que llevamos a cabo y mostramos una comparación con datos obtenidos a partir de una antena GPS cercana.

Toma de medidas

En primer lugar, se adquirió en un centro comercial un termómetro sensible a radiación infrarroja (precio de unos 20 €). El dispositivo en cuestión es el detector térmico por infrarrojos Powerfix IAN 90572 (parte izquierda de la Figura 1). Posteriormente, elegimos la terraza de uno de los edificios de nuestro centro de trabajo (Departamento de Física de la Universidad de Extremadura) como el lugar desde el que llevar a cabo la campaña de medidas (parte derecha de la Figura 1). El siguiente paso fue subir diariamente a realizar medidas con el termómetro. Para ello, hay que situarse en una zona con cielo accesible, preferiblemente bajo sombra, y sujetar el termómetro apuntando al céntit del lugar asegurándose de que al termómetro no le llega radiación solar directamente del Sol. Además, hay que evitar que haya nubes en el céntit y en sus cercanías. También, las medidas deben realizarse cuando el disco solar no se encuentre en las inmediaciones del céntit. En estas condiciones particulares se efectúa la medida de temperatura. Es recomendable seguir estas pautas porque se pretende detectar la radiación infrarroja que emite el vapor de agua, no la que emite el Sol, ni la que emiten las nubes, ni la que pueda emitir algún posible obstáculo. Para conocer con exactitud la distancia mínima respecto del céntit a la que deben estar las nubes, el Sol o posibles obstáculos, en el manual de instrucciones del termómetro se puede consultar el ángulo del vértice del cono en el que el detector infrarrojo recibe radiación (o en su defecto algún otro indicador que permita calcular este



Figura 1. Termómetro infrarrojo usado para nuestra campaña de medidas (izquierda). Lugar donde se realizaron las medidas (derecha).

ángulo). Junto a cada lectura de temperatura que se realice se deben anotar la fecha y la hora.

Los resultados de nuestras medidas pueden verse en la Figura 2. Contamos con medidas de temperatura desde el 15/12/2014 hasta el 11/03/2020. En esta Figura 2, además, se muestra la evolución temporal de medidas de vapor de agua precipitable obtenidas mediante el receptor GPS más cercano a nuestra localización para los mismos días y horas de las medidas de temperatura. Estas medidas de vapor de agua de GPS pueden obtenerse en la web <http://geodesy.unr.edu/>. En la figura puede apreciarse que las medidas de temperatura siguen una evolución temporal similar a la de las medidas de vapor de agua precipitable mediante GPS.

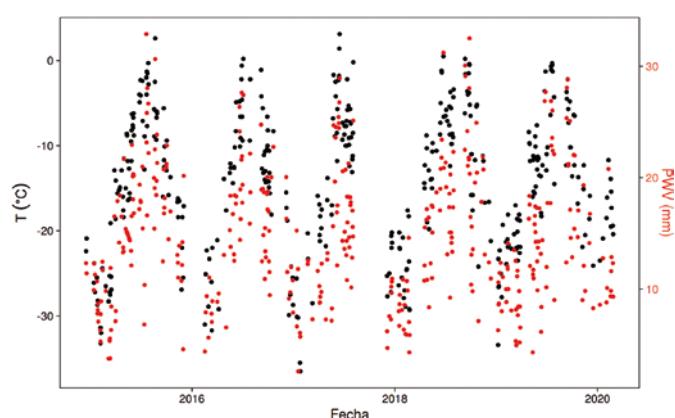


Figura 2. Evolución temporal de las lecturas del termómetro infrarrojo (eje de ordenadas principal, en negro) y de valores de vapor de agua precipitable obtenidos mediante GPS (eje de ordenadas secundario, en rojo).

Calibración del termómetro para su uso como medidor de vapor de agua precipitable

Después de contar con una serie de medidas estamos en disposición de calibrar nuestro termómetro. Para ello, realizamos un análisis de regresión en el que en el eje de abscisas situamos las medidas de temperatura del termómetro y en el eje de ordenadas las medidas de vapor de agua precipitable de GPS. La función que mejor se ajusta a los puntos es una curva exponencial. En nuestro experimento utilizamos dos funciones exponenciales: una más simple con dos coeficientes y una más compleja con tres, que tiene en cuenta la ordena-

da en el origen (Figura 3). La Tabla 1 muestra los resultados de las regresiones mediante estos dos ajustes. Al utilizar tres coeficientes mejora el ajuste, pero de forma muy ligera. Por lo tanto, para experimentos sencillos puede utilizarse el ajuste exponencial con dos coeficientes, puesto que de esta forma la ecuación puede linealizarse e implementarse en programas de cálculo más sencillos. Para ambos ajustes se obtienen coeficientes de determinación de 0.8, diferencias RMS de 2.8 mm y diferencias RMS porcentuales del 19 %. Estos valores son similares a los obtenidos por Mims III *et al.* [9].

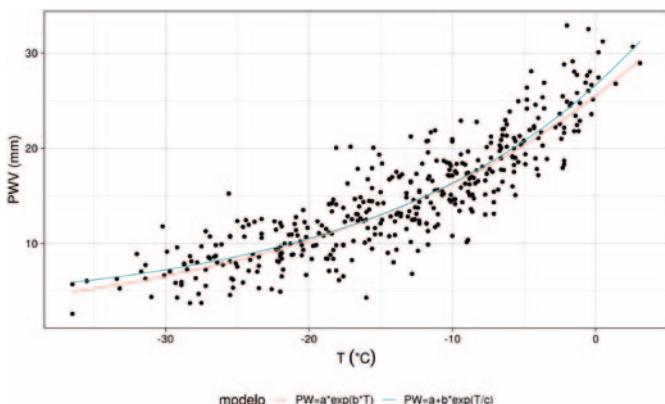


Figura 3. Diagrama de dispersión de medidas de vapor de agua precipitable obtenidas por GPS frente a medidas de temperatura obtenidas por el termómetro infrarrojo. También se muestran las curvas de dos ajustes exponenciales.

Tabla 1. Resultados de las regresiones ajustando los puntos a una exponencial con dos y con tres coeficientes. La segunda fila muestra los valores de coeficiente de determinación, la tercera fila el valor cuadrático medio de las diferencias de los valores de vapor de agua precipitable del termómetro infrarrojo frente a los de vapor de agua precipitable del GPS, y la cuarta fila las anteriores diferencias divididas entre el valor medio de vapor de agua precipitable del GPS.

	$PWV = a \cdot \exp(b \cdot T)$	$PWV = a + b \cdot \exp(T/c)$
R^2	0.781	0.783
Diferencia RMS (mm)	2.84	2.80
Diferencia RMS relativa (%)	19.12	18.91

Una vez tenemos nuestra ecuación de ajuste con sus coeficientes calculados, lo único que tenemos que hacer para obtener una medida de vapor de agua precipitable es sustituir en la ecuación la incógnita T por un valor de temperatura dado por nuestro termómetro. Hay que tener en cuenta que los valores de los coeficientes de ajuste deben calcularse para cada termómetro, puesto que cada dispositivo puede presentar respuestas espectrales distintas, incluso siendo del mismo modelo.

Conclusiones

El aquí presentado es un experimento sencillo, económico y novedoso que podría ser interesante para alumnos de instituto o universidad de la rama de ciencias físicas o ciencias naturales, y con el cual aprender y poner en práctica conceptos meteorológicos.

Referencias

- [1] Z. SORBJAN, *Hands-on Meteorology: Stories, Theories and Simple Experiments* (Project Atmosphere, American Meteorological Society, United States, 1996, 1.^a ed.).
- [2] T. BEN AROUSH, S. BOULAHJAR y S. G. LIPSON, "Observing the Green Flash in the Laboratory", *Eur. J. Phys.* 39, 015301 (2018).
- [3] M. CAPORALONI y C. VITULLO, "A Versatile Implementation of the Psychrometer Technique as a Learning Opportunity in Atmospheric Physics Courses", *Eur. J. Phys.* 26, 97-106 (2005).
- [4] R. REYNOLDS, "Using Weather Satellites in Physics Education", *Eur. J. Phys.* 24, S83-S97 (2003).
- [5] R. A. COLMAN, "Climate Radiative Feedbacks and Adjustments At the Earth's Surface", *J. Geophys. Res. Atmos.* 120, 3173-3182 (2015).
- [6] M. BEVIS, S. BUSINGER, T. A. HERRING, C. ROCKEN, R. A. ANTHES y R. H. WARE, "GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using The Global Positioning System", *J. Geophys. Res.* 97, 15787-15801 (1992).
- [7] J. VAQUERO-MARTÍNEZ, M. ANTÓN, J. P. ORTIZ DE GALISTEO, R. ROMÁN, V. E. CACHORRO y D. MATEOS, "Comparison of Integrated Water Vapor From GNSS And Radiosounding at Four Gruan Stations", *Sci. Total Environ.* 648, 1639-1648 (2019).
- [8] J. P. ORTIZ DE GALISTEO, *Análisis del contenido total en columna de vapor de agua atmosférico sobre la Península Ibérica medido con distintas técnicas: radiosondeos, fotómetros solares y sistema GPS* (tesis doctoral, Universidad de Valladolid, Dpto. de Física Teórica, Atómica y Óptica, Valladolid, 2011).
- [9] F. M. MIMS III, L. H. CHAMBERS y D. R. BROOKS, "Measuring Total Column Water Vapor by Pointing an Infrared Thermometer at the Sky", *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 92, 1311-1320 (2011).

Rozamiento estático: ¿Fuerza o condición?

Miguel Ángel Rodríguez Valverde

Dpto. de Física Aplicada, Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada



María Tirado Miranda

Dpto. de Física Aplicada, Facultad de Ciencias,
Universidad de Granada



El rozamiento estático rara vez se trata en primeros cursos universitarios como una ligadura cinemática entre superficies en contacto, en movimiento solidario, pero pretendiendo el desplazamiento relativo debido a la inercia de los cuerpos o la acción de fuerzas externas. La naturaleza newtoniana de una fuerza de módulo desconocido (sin ley de fuerzas) pero que se opone al movimiento relativo tentativo resulta difícil de asimilar por los estudiantes de Física, acostumbrados a fuerzas de contacto que participan del

movimiento manifiesto. El concepto de movimiento relativo incipiente (transición instantánea de reposo a movimiento), activado cuando la ligadura cinemática llega a su límite, dificulta definitivamente el manejo del rozamiento estático, a diferencia del rozamiento dinámico. En este trabajo analizamos y discutimos las peculiaridades y dificultades asociadas a la esquiva fuerza de rozamiento estático.

Introducción

En la enseñanza de la Estática y Dinámica en los primeros cursos universitarios de Física, la asimilación y manejo de la fuerza de rozamiento estático resultan controvertidos, lastrando en muchas ocasiones su aprendizaje pleno [1, 2]. Conceptos o situaciones como el *contacto* entre superficies que actúan como *ligadura* (de apoyo, de acoplamiento cinemático) y el movimiento *relativo incipiente* (paso discontinuo de reposo a movimiento)[3] dificultan el tratamiento de la fricción/adhesión entre objetos solidarios (*¿ciencia fricción?*), identificado como *contacto adhesivo*. La quietud de los cuerpos apoyados es la generalidad y resulta por tanto contraintuitiva su quiescencia (quietud condicionada), explicada en términos de interacción mutua entre cuerpo y soporte.

La fuerza de rozamiento estática es habitualmente presentada como una fuerza de retención (Figura 1). La igualdad bien conocida entre el coeficiente de rozamiento estático y la tangente del ángulo de inclinación que aparece en el problema paradigmático del movimiento incipiente de un bloque sobre un plano inclinado “rugoso” hace intuir la naturaleza geométrica de la fuerza de rozamiento estático [4]. En realidad, la fuerza de rozamiento estático es una fuerza de ligadura *de cizalla* o cortante. En una plataforma en rotación, el movimiento de un cuerpo móvil pero *ligado* inicialmente a la plataforma se explica por la aparición de una fuerza de *reacción* surgida del contacto (ligadura) con la plataforma móvil y que siempre se puede descomponer en dos fuerzas: una perpendicular a la superficie de apoyo y otra tangencial que justifica el giro del cuerpo. La primera es la conocida como fuerza *normal* (ligadura geométrica) y la segunda es la fuerza de rozamiento estático (ligadura cinemática). Las fuerzas desarrolladas en cuerdas (tensiones) son otro ejemplo de ligadura cinemática que impone la condición de movimiento solidario, aunque en términos de celeridad y no necesariamente de vector velocidad.

Desde el punto de vista microscópico, el *intento* de movimiento macroscópico entre cuerpos resulta en un movimiento real a mucha menor escala, donde las fuerzas intermoleculares de cohesión, que tratan de evitar la penetrabilidad o fractura de la materia, o de adhesión se revelan como una fuerza neta macroscópica que se resiste a la deformación por compresión (apoyo), tracción (cuerda) o cizalla (rozamiento estático), según el caso. Es importante desacoplar la idea de rozamiento con la de rugosidad. Obviamente, la rugosidad amplifica el rozamiento, pero no es la causa última del mismo. Debido a la cohesión, es decir la interacción atractiva que mantiene ligados los átomos y moléculas de un mismo material o sustancia, el rozamiento estático entre dos cuerpos perfectamente lisos del mismo material es mayor que entre materiales diferentes (“No hay mejor cuña que la de la misma madera”). Por otro lado, dos superficies perfectamente lisas de materiales diferentes sufrirán rozamiento estático según su adhesión fisicoquímica.

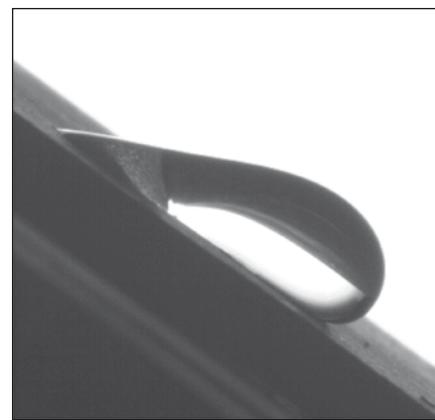


Figura 1. Manifestación de la fuerza de rozamiento estático como fuerza de retención en una gota de agua sobre una superficie inclinada. En realidad, la adhesión sólido-líquido resulta más compleja de entender que la sólido-sólido pero su fenomenología es equivalente.

Si bien las leyes de fuerza tienen validez dentro de ciertos intervalos, ninguna fuerza física posee un valor límite a partir del que cambia la naturaleza de la fuerza. La existencia de un valor umbral máximo de fuerza de rozamiento estático vinculado exclusivamente al movimiento relativo inminente introduce un comportamiento discontinuo del movimiento (“stick-slip”), donde el tiempo característico de transición del movimiento incipiente (desplazamiento microscópico) al movimiento observable (rozamiento cinético) se supone despreciable. El problema de la regla homogénea apoyada en dos dedos índices que buscan el centro de la misma ilustra el intercambio de movimientos guiado por la saturación o relajación de la fuerza de rozamiento estático en cada dedo. Al intentar mover ambos dedos hacia el centro de la regla, observamos que mientras uno se mueve, el otro permanece estático hasta que éste comienza a moverse y el primero se para. Esto se repite hasta que se encuentran los dedos en el centro de masas.

Las fuerzas de ligadura (tensión en cuerdas [5], reacciones de apoyo contra superficies, líneas o puntos estáticos y el propio rozamiento estático) no resultan cómodas entre los discentes de Física por sus peculiares características:

- construyen el movimiento manifiesto, incipiente o tentativo (natural o virtual, relativo o absoluto), y
- no se conocen *a priori* en módulo y, otras muchas veces, en dirección tampoco. Son incógnitas del problema. No existen leyes de fuerzas de ligaduras y su capacidad de hacer trabajo es dudosa. Entonces, ¿son fuerzas físicas homologables?

Estas propiedades artificiosas introducidas en la Dinámica de la Mecánica Newtoniana se resuelven en la Mecánica Analítica, donde las ligaduras tienen un simple tratamiento algebraico como condiciones geométricas/cinemáticas que modifican las ecuaciones del movimiento (holónomas) o la búsqueda del extremo del lagrangiano (no holónomas). En Mecánica Analítica, las ligaduras *ideales* son aquellas en las que, tras desplazamientos virtuales (experimentos “pensados” compatibles con las ligaduras), las correspondientes fuerzas de ligadura no realizan trabajo (virtual). La fuerza de rozamiento dinámico, por el contrario, se considera como una fuerza activa y, por tanto, que sí realiza trabajo, aunque su módulo dependa de una ligadura. En realidad, el rozamiento dinámico se considera una ligadura no ideal.

Contacto

La situación de contacto ideal (matemático) en Física es espinosa. ¿Cómo se caracteriza el apoyo de una esfera en un canto? El vector normal del contacto mutuo entre una superficie y un punto no respeta la propiedad de reciprocidad (¿existe una única dirección perpendicular a un punto?). La normal será la de la superficie, entendida como la única zona de contacto. Pero ¿y si se apoyaran dos segmentos rectilíneos en sus extremos? En ese caso, la dirección de la fuerza de ligadura en la articulación o pivote es desconocida. En la Figura 2a) se ilustran las diferentes fuerzas normales de apoyo entre cuerpos con diferentes tentativas de movimiento y geometría. Nótese cómo la acción de la ligadura “movible” en la Figura 1a) impuesta por la esfera no se puede razonar por algún intento de movimiento vertical ascendente *natural* del bloque inferior, pero sí uno *virtual*. Igualmente hay que recordar que las ligaduras pueden ser móviles, en cuyo caso la fuerza normal de apoyo participará (en contra) del movimiento absoluto del objeto, aunque no necesariamente alineada con el mismo.

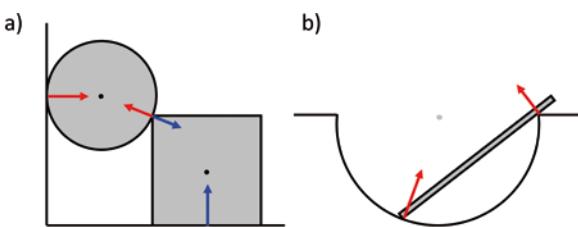


Figura 2. a) Esquema de fuerzas normales de apoyo en el sistema estático esfera-cubo. b) Fuerzas normales de apoyo de una barra que descansa en una cavidad esférica o cilíndrica.

Las fuerzas de apoyo entre cuerpos (emparejadas según la 3.^a Ley de Newton), como las de rozamiento estático recíproco, se aplican en la misma zona de contacto mutuo, pero no necesariamente en el mismo punto. Estas fuerzas siguen la misma directriz pero, junto con el resto de fuerzas actuantes, deben asegurar la imposibilidad de vuelco (momento neto nulo) de los cuerpos, siempre que se trate de un problema de Estática o de traslación pura (fuerzas concentradas en el centro de masas).

Si no hubiera movimiento manifiesto o tentativo en contra de la dirección de la ligadura, la fuerza de apoyo en la dirección de dicho movimiento sería nula incluso existiendo contacto (Figuras 3a) y 3b)). Por ello, a estas fuerzas también se les llama, confusamente, fuerzas *pasivas* en vez de motrices, porque aparecen como consecuencia del (intento de) movimiento. Sin embargo, también se les llama así para diferenciarlas de las que realizan trabajo (fuerzas activas o *vivas*). Veamos otro ejemplo representativo. Sea un tubo alineado verticalmente con paredes internas idealmente lisas y un objeto cilíndrico idealmente liso pero ajustado al diámetro del tubo (Figura 3c). En este caso, no existe restricción geométrica para el movimiento de caída. Por tanto, no existen fuerzas normales y de paso, tampoco rozamiento (estático o dinámico): caída libre. Microscópicamente, la ausencia de rugosidad en la zona de contacto mutuo y la impenetrabilidad de la materia imposibilitan el contacto físico, y, con este, fricción alguna. Si el cuerpo experimentara una velocidad inicial horizontal o una fuerza externa horizontal, se manifestaría la ligadura impuesta por el tubo a través de una fuerza normal opuesta a la velocidad inicial o fuerza externa.

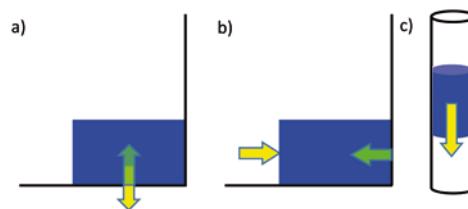


Figura 3. a) Esquema de fuerzas que actúan sobre el bloque estático que descansa en una esquina, cuyo único movimiento natural es el de caída (en verde se indica la fuerza de apoyo y en amarillo, la fuerza externa-peso). b) Además de las fuerzas anteriores, si se empuja el bloque hacia la pared (nueva fuerza externa en amarillo), se manifestaría la fuerza normal de apoyo horizontal (verde, antes no. c) Caída libre de un objeto confinado en un tubo vertical en el que no actúan fuerzas normales de apoyo.

El sentido de la fuerza de rozamiento estático

Otra cuestión peligrosa es el sentido de la fuerza de rozamiento estático, desconocida por tratarse de una fuerza de ligadura, aunque como tal ha de oponerse al intento de movimiento relativo. El movimiento relativo tentativo no siempre es intuitivo. Examíñese el caso de un bloque solidario a una plataforma oscilante en la dirección horizontal, donde la fuerza de rozamiento estático que sufre el bloque justifica su movimiento oscilatorio y es en los puntos de retorno donde se pone a prueba el movimiento relativo incipiente, compitiendo la inercia del bloque con la condición de movimiento solidario. Supongamos que pretendemos mover los dos bloques de la Figura 4, solidariamente, para lo que impulsamos el bloque inferior o ambos bloques con idéntico impulso “suave” (misma cantidad de movimiento). En ambos casos el movimiento temprano del sistema será oscilatorio, pero con la participación de fuerzas internas de rozamiento estático en diferentes momentos. En el caso de la Figura 4a), el intento natural de movimiento relativo entre bloques, guiado por la 1.^a Ley de Newton, justifica la existencia de la pareja de fuerzas internas de rozamiento estático desde el principio, que permutarán sus sentidos conforme transcurra el movimiento. En el caso de la Figura 4b), el movimiento de inicio será verdaderamente solidario (idénticas velocidades iniciales), sin ligadura horizontal y por tanto sin fuerzas internas cortantes, aunque enseñada la diferente inercia de cada bloque justificará un intento de movimiento relativo, y con él las fuerzas internas de rozamiento estático. El sentido de la fuerza de rozamiento estático quedará determinado por la tendencia natural a oscilar de cada masa (frecuencia natural, ω_i) puesto que $F_{re} = \mu(\omega_1^2 - \omega_2^2)x$, donde μ es la masa reducida del sistema y x la elongación. Justamente, la diferencia de energías mecánicas por unidad de masa $E_1/m_1 - E_2/m_2$ es igual a $\frac{1}{2}(\omega_1^2 - \omega_2^2)x^2$.

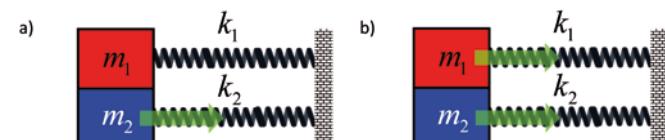


Figura 4. Estado inicial del sistema formado por dos bloques, uno sobre otro, con los vectores velocidad inicial indicados en verde: a) el bloque inferior parte con velocidad no nula pero el rozamiento mutuo arrastra al bloque superior, b) ambos bloques parten con igual velocidad de manera solidaria, pero pronto seguirán diferente estado de movimiento por su inercia y energía potencial elástica.

Otro problema característico sobre el cambiante sentido de la fuerza de rozamiento estático surge en objetos solidarios a cuerpos giratorios (velocidad constante) tales como cavidades o aros verticales donde, según la velocidad de giro de éstos, los objetos muestran diferente tendencia a ascender o caer. En general, un objeto libre dentro de una cavidad giratoria que parte del punto más bajo tiende a subir por efecto de la inercia (siguiendo la tangente a la cavidad) y a bajar por efecto de la gravedad (tangente también). Un objeto en equilibrio dinámico con la cavidad (objeto solidario), conforme aumentamos la velocidad de giro, existe una velocidad crítica a la que las tendencias a subir y bajar se igualan, anulándose la fuerza de rozamiento estático (mismo caso que sin rozamiento). Por encima de esa velocidad, la tendencia a subir domina y el rozamiento estático se invierte. El objeto saldrá del equilibrio dinámico cuando la fuerza de rozamiento estático alcance su valor máximo.

Equilibrio

El papel de la fuerza de rozamiento estático en los problemas de equilibrio aplicando el principio de los trabajos virtuales resulta cuando menos confuso. La confusión radica en el concepto de *movimiento incipiente*, a partir del que la fuerza de rozamiento pasa de estática (máxima) a dinámica, como una suerte de función discontinua de la posición. Como no existe el desplazamiento virtual incipiente, la fuerza de rozamiento estático ha de entenderse como una fuerza externa de retención desconocida, garante del equilibrio y capaz de hacer trabajo virtual, pero no una fuerza de ligadura. Sin embargo, en problemas dinámicos (rodadura sin deslizamiento), la fuerza de rozamiento estático sí es una fuerza de ligadura (ligadura cinemática) y no realiza trabajo virtual.

La fuerza de rozamiento estático puede aparecer incluso si no existe fuerza motriz externa. Esto es lo que ocurre durante el trazado de una curva a velocidad constante (equilibrio dinámico). La 1.^a Ley de Newton establece que, en un movimiento circular, el objeto está inconsistentemente saliéndose de la trayectoria, y, de lograrlo, mantendría la velocidad (vector) que llevaría en ese instante. Debido a este intento de movimiento relativo al sistema de referencia que gira ligado al móvil, la fuerza de rozamiento estático actúa en la dirección perpendicular a la curva, a lo largo de la superficie de contacto y hacia la concavidad de la curva, participando del giro en forma de fuerza centrípeta. De ahí que el agarre de los neumáticos a una carretera facilite el trazado de la curva, mientras no se supere la fuerza de rozamiento estático máxima.

Trabajo

No es cierto que la fuerza de rozamiento estático nunca realice trabajo. Es cierto que no participa (positivamente) en el desplazamiento relativo de los cuerpos, pero sí podría participar en cada desplazamiento absoluto, aunque estas aportaciones se compensen finalmente en el trabajo total a través de los trabajos internos. Las fuerzas de ligaduras, como fuerzas internas, pueden realizar trabajo (interno) aunque actúen perpendiculares al movimiento relativo manifiesto o bien el movimiento relativo sea sólo tentativo. Pueden existir casos donde, por acción y reacción, los trabajos internos de las fuerzas de ligadura se cancelen, como ocurre con las tensiones localizadas en una cuerda tensa que une dos cuerpos

en movimiento. En este caso la energía mecánica del sistema se conserva. Sin embargo, hay otros casos donde los trabajos de las fuerzas internas de ligadura no se cancelan y la energía varíe (p. ej. choque inelástico o plástico) [6].

Todo movimiento de un sólido rígido se puede tratar como una traslación pura del centro de masas (CM) y una rotación interna en torno al mismo. Las fuerzas "activas" siempre se pueden localizar en el CM a efectos de traslación, y sólo se tendrán en cuenta sus momentos respecto del CM, y con ello su verdadero punto de aplicación, si ocurriera rotación interna. En el caso de la rodadura (acoplamiento rotación interna-traslación), la fuerza de rozamiento estático participa de la traslación del CM con un trabajo igual, pero de signo opuesto al trabajo del momento de dicha fuerza respecto del CM. En neto, el trabajo total de la fuerza de rozamiento durante la rodadura es nulo. La fuerza de rozamiento estático es la responsable del giro en la rodadura libre (sin fuerzas motrices externas), con un trabajo parcial positivo a través de su par.

Rodadura

La fuerza de rozamiento en la rodadura tiene un sentido que no es nada intuitivo. La condición cinemática de rodadura (sin deslizamiento) es igual de controvertida que la capa límite de fluidos cerca de superficies sólidas. En la rodadura, los puntos de contacto del móvil y el suelo permanecen instantáneamente solidarios, aunque el suelo se mueva y, sobre él, el móvil rodante. En este escenario, la plausible existencia de una fuerza de rozamiento estático queda supeditada a que exista *tendencia al desplazamiento relativo* por rotación pura (patinar) o por movimiento rototraslatorio (sucesión de rodadura y deslizamiento). La aparición de la fuerza de rozamiento estático se debe al intento (local) de movimiento del punto material respecto del punto de apoyo. El perfil de fuerzas motrices distribuidas, generalmente causado por la acción de una fuerza externa, determina el sentido de la fuerza de rozamiento estático, que NO siempre se opone a la propia rodadura.

¿Sería posible rodar sobre una superficie perfectamente pulida y químicamente no adhesiva? El principio físico microscópico que subyace en la rodadura es parecido al funcionamiento de los engranajes, donde las microrrugosidades/microdominios entre superficies permiten el acoplamiento. La rodadura se puede entender como el movimiento de un engranaje sobre una superficie horizontal dentada (Figura 5), o también como la tracción de vehículos «orugas». Por ello, la rodadura requiere de fricción o agarre entre superficies, aunque macroscópicamente en ocasiones la fuerza de rozamiento estático resulta nula (Figura 6) e incapaz de impulsar un eventual suelo deslizante. He ahí la aparente contradicción: la fricción es necesaria para la rodadura (ligadura cinemática) pero no justifica la existencia de una fuerza de rozamiento estático.

En la rodadura, la condición de contacto puntual (sólido completamente rígido) entre móvil y suelo es demasiado restrictiva y debe introducirse el concepto de rozamiento por rodadura donde la zona de contacto pasa de un punto a un área por deformación de la base del cuerpo, y ello da lugar a que aparezcan reacciones en los apoyos, que producirán un par opuesto a la rodadura.



Figura 5. Modelo “cremallera” del movimiento de rodadura.

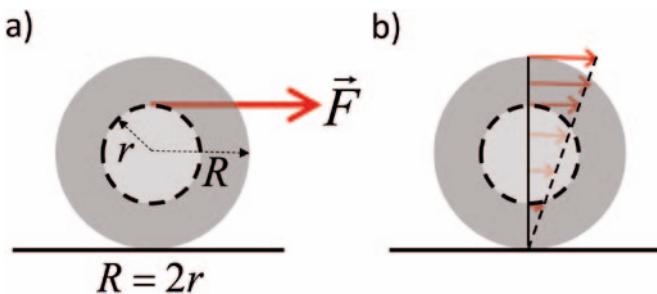


Figura 6. Situación de rodadura de un carrete de radios r y R del que se tira con una fuerza externa F (vector rojo) y donde la fuerza de rozamiento estático es nula. a) Fuerza externa horizontal aplicada en la parte superior. b) Distribución de velocidades del caso a).

Conclusiones

Los docentes de Física debemos de ser conscientes de la complejidad del aprendizaje de la fuerza de rozamiento estático. Debe presentarse como una manifestación de la adhesión entre cuerpos en contacto (constreñidos mutuamente como consecuencia de su propio movimiento), pero siempre que exista movimiento relativo tentativo a nivel local (entre zonas/puntos en contacto). Este movimiento relativo tentativo se debe razonar cuidadosamente a partir de las fuerzas externas locales o la inercia. La fuerza de rozamiento estático se opone a este intento de movimiento. A partir de ahí, es una incógnita más del problema. En cursos más avanzados, al igual que las fuerzas normales de apoyo se tratan como ligaduras geométricas, conviene tratar la fuerza de rozamiento estático como una ligadura cinemática que justifique el movimiento solidario entre cuerpos, mientras dure.

Referencias

- [1] U. BESSON, L. BORghi, A. DE AMBROSIO y P MASCHERETTI, “How to Teach Friction: Experiments and Models”, *Am. J. Phys.* **75**, 1106-1113 (2007).
- [2] M. F. ARCODÍA y S. M. ISLAS, “Las fuerzas de roce en libros de texto y en revistas científicas”, *Revista de Enseñanza de la Física* **19**(2), 7-24 (2006).
- [3] A. MANZUR, “Cuando la fuerza de fricción estática se convierte en fuerza de fricción cinética y viceversa”, *Rev. Mex. Fis. E* **54**, 51-54 (2008).
- [4] G. T. PICKETT, “A Pedagogical Model of Static Friction”, <http://arxiv.org/abs/1507.04015>, 2015.
- [5] K. D. HAHN y J. M. RUSSELL, “The Indeterminate Case of Classical Static Friction When Coupled with Tension”, *Phys. Teach.* **56**, 83 (2018).
- [6] J. GÜÉMEZ, “Sobre trabajo y fuerza de rozamiento”, *REF* **31**(2), 29-33 (2017).

Visualización de la ley de Snell a partir del principio de Fermat con el módulo turtle de Python



Fernando Blasco
Alumno del Máster de Formación del Profesorado,
Universidad Politécnica de Madrid



Juan Manuel Pastor
Grupo de Sistemas Complejos
Universidad Politécnica de Madrid



Javier Galeano
Grupo de Sistemas Complejos
Universidad Politécnica de Madrid

Ilustrar la deducción de la ley de Snell a partir del principio de Fermat nos permite mostrar una alternativa más visual e intuitiva, que complementa la deducción trigonométrica a partir del principio de Huygens. Para ello, se presenta un pequeño programa de Python que muestra, mediante una carrera de tortugas, que el camino más rápido es el predicho por la ley de Snell.

—Está bien —dijo Momo—, voy contigo. ¿Pero no podría llevarte, para ir un poco más deprisa? “No”, ponía en el caparazón de Casiopea. —¿Por qué tienes que arrastrarte tú misma?—preguntó Momo—. A esto vino la enigmática respuesta: “El camino esta en mí”. Con esto, la tortuga se puso en marcha y Momo la siguió, poco a poco y pasito a pasito.

Momo, Michael Ende

Motivación

En el currículum de Física de 2.º de Bachillerato se debe introducir la ley de Snell, ya que es fundamental para el desarrollo del bloque de la óptica geométrica [1]. Normalmente, esta ley se introduce de manera fenomenológica, pero si se deduce, suele hacerse utilizando el principio de Huygens [2]. En este trabajo presentamos una manera diferente de llegar a la ley de Snell, utilizando el principio de Fermat, basado en la minimización del tiempo. Para una mejor comprensión de la idea, nos apoyamos en un programa que hemos diseñado para poder visualizar este principio y llegar experimentalmente a la ley de Snell.

El potencial didáctico del principio de Fermat reside en el contraste entre lo sencillo de su planteamiento y lo profundo de sus implicaciones en la óptica ondulatoria en la que se basa. Abre la puerta a numerosas preguntas y ampliaciones en el campo de la óptica, de la mecánica, de la geometría, de la filosofía e incluso en la computación, a través del programa de Python que presentamos en este trabajo.

El programa que hemos diseñado permite visualizar la relación de dicho principio con la ley de Snell y presentar ambos de manera más lúdica, proponiendo a los estudiantes que inicialmente adivinen y más tarde calculen que tortuga ganará la carrera bajo cada proporción entre índices de refracción (cuya relación con la velocidad de la luz en cada medio, además, quedará clara durante la carrera). Este programa lo puede utilizar el profesor en el ordenador de clase si lo puede proyectar en pantalla o en los ordenadores de los alumnos si se disponen de ellos en el aula. Además, se pueden proponer, como actividades avanzadas a los alumnos (si tienen nociones básicas de programación), algunas modificaciones sencillas del código para profundizar más en el principio de Fermat, por ejemplo, comprobar que los caminos cercanos al tomado por la luz varían poco en tiempo, como sugerimos en este trabajo.

Introducción

El principio de Fermat, en su versión original, se basa en que la luz se propaga de un punto a otro recorriendo el camino más rápido. Es, por tanto, un principio basado en la minimización del tiempo, no como ocurre en el cuarto menguante de la película española dirigida por Luis Piedrahita y Luis Sopeña, *La habitación de Fermat*, donde lo minimizado es el espacio [3].

Este principio no pierde vigencia cuando la luz cambia de medio, lo que provoca el fenómeno de la refracción: un rayo cambia su dirección al atravesar regiones en las que se propaga a distinta velocidad, porque de esta manera viaja más rápido de un punto a otro.

Para ilustrar este hecho, hemos desarrollado un programa de Python en el que se proponen varios caminos posibles que podrá recorrer la luz para llegar del punto A al B. Cada camino es recorrido por tortugas de distintos colores, que salen a la vez y “compiten” por ser las primeras en llegar a la meta.

Las tortugas pueden no parecer idóneas para representar a la luz, que se mueve lo más rápido posible [4], pero las fábulas y los documentales de La 2 nos indican que tienen experiencia echando carreras. También ha influido en la elección el hecho de que Python incluya un módulo que permite dibujar guiando a una tortuga, característica original de un lenguaje de programación didáctico desarrollado hace cinco décadas: Logo.

Obtención de la ley de Snell

La ley de Snell, propuesta en 1621, nos indica cómo cambia de dirección la luz al pasar de un medio a otro, relacionando los ángulos de incidencia y refracción (respecto a la normal a la superficie de contacto) con los índices de refracción de cada medio:

$$n_1 \sin(\alpha_1) = n_2 \sin(\alpha_2); \quad (1)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción y α_1 y α_2 los ángulos respecto a la normal, en los medios 1 y 2, respectivamente.

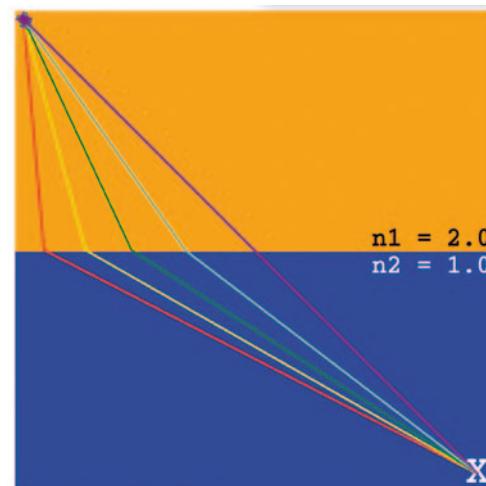


Figura 1. Captura de pantalla del programa, donde se visualiza el camino seguido por cada una de las tortugas, que se encuentran en la esquina superior izquierda preparadas para comenzar la carrera.

Sin embargo, esto era solo una ley fenomenológica, que daba cuenta de lo que ocurría sin relacionarlo con un principio físico subyacente. Fermat propuso su principio de mínimo tiempo en 1662, mientras que Huygens introdujo su principio (basado en que cada punto de un frente de ondas es a su vez emisor de ondas esféricas) en 1678. Fue modificado por Fresnel, quien le dio su forma actual, en 1818 [5-7].

A través del principio de Huygens

El principio de Huygens explica la propagación de un frente de ondas considerando que cada punto del mismo es un emisor de ondas secundarias, que interfieren entre sí originando el siguiente frente de onda.

Es común aplicarlo a frentes de onda planos para la deducir la ley de Snell, y suele ser la demostración de la ley mostrada a los estudiantes de Bachillerato e incluida en la mayoría de libros de texto (si no la deducción completa, sí un esquema como el de la Figura 2). Dicha deducción, que no vamos a desarrollar aquí para centrarnos en la basada en el principio de Fermat, se puede encontrar en numerosos textos, como [8].

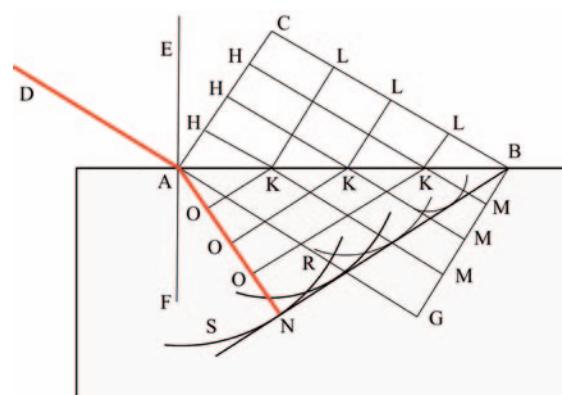


Figura 2. Esquema de la deducción de la ley de Snell de Huygens, incluido en su *Tratado sobre la luz* [9].

A través del principio de Fermat

La afirmación de que la luz viaja de un punto a otro siguiendo el camino que minimiza el tiempo es el principio original-

mente planteado por Fermat, válido en la mayoría de casos, pero no en todos. El ejemplo más evidente de violación del mismo es la reflexión: claramente, en la Figura 3, la luz tardaría menos en ir del punto A al B en línea recta en lugar de reflejarse en la superficie del espejo.

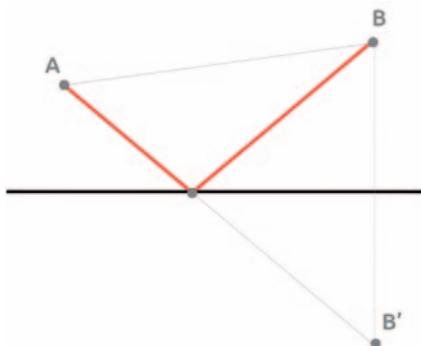


Figura 3. El segmento AB es más corto que la suma de los dos marcados en rojo. Sin embargo, el camino marcado en rojo sí que es la forma más rápida de ir de A a B pasando por un punto de la interfase (la superficie del espejo). Se puede demostrar fácilmente percibiendo que el camino en rojo tiene la misma longitud que el segmento AB', siendo B' el punto simétrico de B respecto a la interfase [10].

En la versión vigente del principio, Fermat figura un cambio sutil: el tiempo en recorrer el camino no debe ser mínimo, sino estacionario frente a variaciones de la trayectoria. Es decir, la luz sigue el camino que verifica que, bajo pequeñas alteraciones, el tiempo en recorrerlo apenas cambia (no varía en primer orden) [11].

Este principio, por su formulación aparentemente teleológica, puede incitar debates filosóficos o incluso místicos. Los últimos son estériles debido a que, al contrario que Casiopea (la tortuga del maestro Hora en *Momo*), la luz no sabe cuál es el camino más corto de antemano. Simplemente es reemitida en todas direcciones, pero su camino de propagación es aquel en el que hay interferencia constructiva. Esta se da cuando la diferencia de fase es mínima, lo cual sólo ocurre en caminos estacionarios (en los que pequeñas diferencias de camino no causan diferencias de fase). En el resto de caminos posibles, al no ser estacionarios, convergen ondas con distintas fases que interieren destructivamente [12].

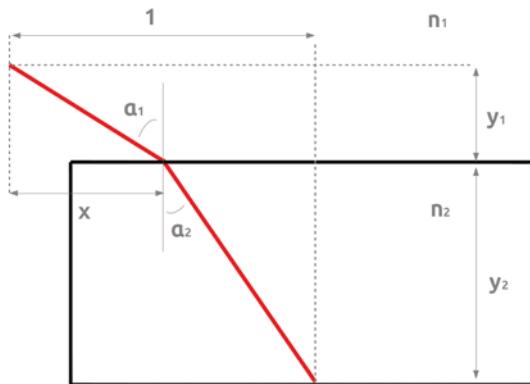


Figura 4. Refracción de un rayo al pasar de un medio con índice n_1 a otro con n_2 .

Vamos a deducir la ley de Snell usando el concepto de minimizar el tiempo, por tanto, expresamos el tiempo como el

espacio recorrido en cada tramo dividido por la velocidad en el mismo:

$$t = \frac{\sqrt{x^2 + y_1^2}}{c/n_1} + \frac{\sqrt{(1-x)^2 + y_2^2}}{c/n_2} \quad (2)$$

Derivamos según el tramo recorrido en el primer medio, x , que es el único parámetro libre, e igualamos a cero:

$$\frac{dt}{dx} = + \frac{n_1 x}{c \sqrt{x^2 + y_1^2}} - \frac{n_2 (1-x)}{c \sqrt{(1-x)^2 + y_2^2}} = 0 \quad (3)$$

Por tanto,

$$\frac{n_1 x}{\sqrt{x^2 + y_1^2}} - \frac{n_2 (1-x)}{c \sqrt{(1-x)^2 + y_2^2}} \quad (4)$$

Usando la definición de seno y coseno, para los ángulos con respecto a la normal (Figura. 4) obtenemos la ley de Snell (Eq. 1).

Como podemos ver, se obtiene la ley de Snell de una manera sencilla y utilizando conceptos que los alumnos de 2.^º de Bachillerato deberían conocer.

El programa

Para que los alumnos puedan trabajar con la ley o simplemente divertirse utilizándola, hemos diseñado un programa en Python que está disponible en <https://github.com/ferblasco7/tortugas/blob/master/SnellCarreraTortugas.py>.

Está inspirado en la analogía de Feynman para explicar el cambio de dirección de la luz en la refracción: habla de un socorrista que va más rápido corriendo por la arena que nadando por el mar, y se pregunta cuál es el camino que le permite llegar antes al punto donde se está ahogando una persona [10]. Nuestras tortugas comparan la efectividad de distintos caminos posibles aunque, al contrario que el socorrista, van más rápido por el agua que por la arena.

Módulo turtle en Python

En la actualidad, la programación que realizan nuestros alumnos de ESO y Bachillerato se suele realizar en Scratch, el lenguaje de programación diseñado en el MIT. Antes de esto, nuestros adolescentes comenzaban su camino en la programación usando el lenguaje Logo. El lenguaje fue diseñado en 1967 con fines didácticos por Danny Bobrow, Wally Feurzeig, Seymour Papert y Cynthia Solomon. Logo es un lenguaje de programación de alto nivel de muy fácil aprendizaje, por lo que solía usarse como el lenguaje de programación para enseñar a los niños y jóvenes.

Papert desarrolló un enfoque en el que presentaba a los niños retos intelectuales que puedan ser resueltos mediante el desarrollo de programas en Logo. Y básicamente se trataba de que las tortugas gráficas cumplieran todas las órdenes programadas. La "tortuga" de Logo es un cursor al que se le pueden dar órdenes de movimiento y que puede ir dejando un rastro sobre la pantalla. Moviendo adecuadamente la tortuga se puede conseguir dibujar todo tipo de figuras.

Siguiendo las ideas de Papert, en este trabajo se utilizan las tortugas de Logo para resolver un problema de óptica, pero en

nuestro caso hemos usado el lenguaje de programación Python. En la actualidad, Python es un lenguaje mucho más moderno y extendido. En muchos casos se convierte en el lenguaje de programación que usarán algunos de los estudiantes en la universidad. En Python existe un módulo llamado “turtle” que permite realizar las gráficas de las tortugas de Logo [13]. Una vez instalado Python en cualquiera de sus entornos (p. e., Anaconda), basta con instalar el módulo *PythonTurtle* (bajo licencia MIT License) [14], para después importarlo en el código.

Uso del programa

Al iniciar el programa, se nos pide fijar el índice de refracción del primer medio.

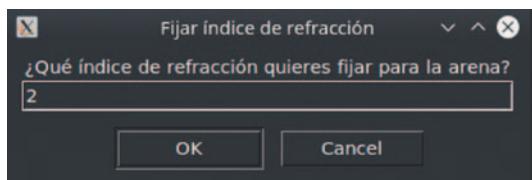


Figura 5. Diálogo para elegir la relación n_1 / n_2 (se fija $n_2 = 1$ por simplicidad).

Posteriormente, se dibuja el sencillo entorno gráfico y se pregunta al usuario si quiere comenzar la carrera.

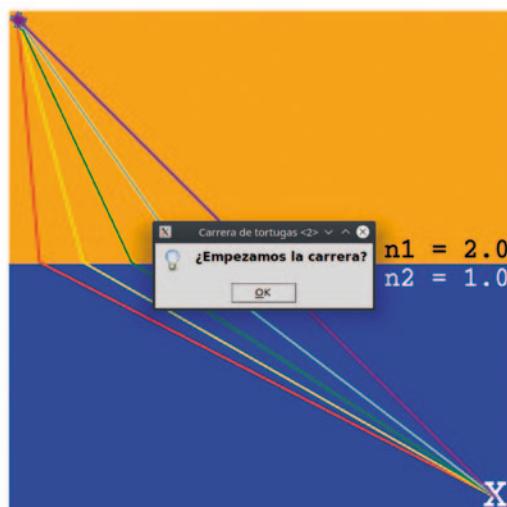


Figura 6. Todo listo para empezar.

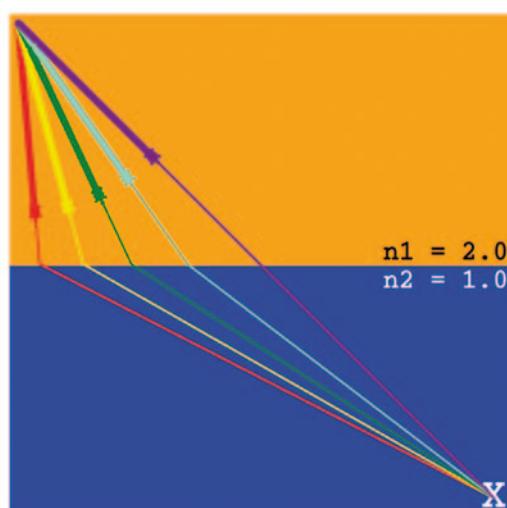


Figura 7. Carrera en curso.

Se va plasmando el orden de llegada en la parte superior derecha, donde aparecen ordenadas según su clasificación en la carrera.

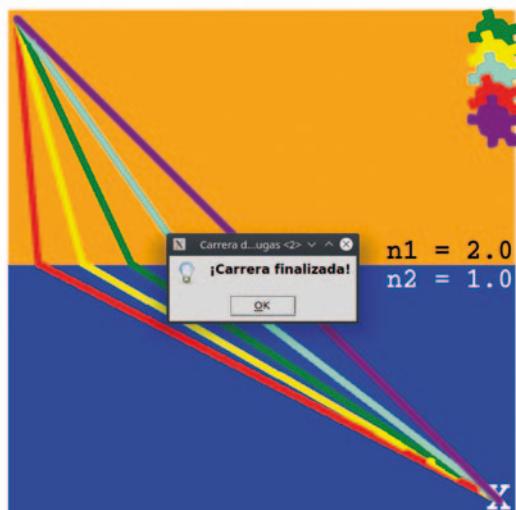


Figura 8. El programa finaliza cuando todas las tortugas han llegado a meta.

Al presentarse el código estructurado y explicado por partes, se facilita al profesor (o a los alumnos con pequeñas indicaciones del profesor) introducir algunas modificaciones, sin mucha dificultad. Por ejemplo, fácilmente pueden cambiar el dibujo de la tortuga por otro que les pueda resultar más divertido; también se puede sofisticar el programa haciendo que al girar la tortuga aparezcan los ángulos de incidencia y refracción, o se podría añadir un pequeño rótulo en el que se indique el camino óptico ($L = l \cdot n$) recorrido por cada una de las tortugas.

Conclusiones

En este artículo presentamos un programa diseñado en Python, utilizando la librería *turtle*, para ilustrar la ley de Snell mediante el principio de Fermat. El código está estructurado por partes para que los alumnos entiendan su funcionamiento y puedan modificarlo según sus necesidades de uso. Pensamos que aproximarse a la ley de Snell de una manera diferente puede hacer la tarea más sencilla y divertida.

Apéndice: Descripción del código

La descripción del código se encuentra también disponible en formato Jupyter Notebook: <https://github.com/ferblasco7/tortugas/blob/master/Carrera%20de%20tortugas.ipynb>

Importamos el modulo *turtle* para poder usar las tortugas, *numpy* para cálculos trigonométricos y *tkinter* para emplear diálogos (y que el usuario pueda fijar el índice de refracción, decidir cuándo empieza la carrera, etc.).

```
import turtle
from numpy import sin, tan, arctan, radians, degrees
import tkinter #crear diálogos
```

Preguntamos, mediante un diálogo, el índice de refracción de la arena (el del agua se toma como 1 por simplicidad), y fijamos las coordenadas de la meta y la salida, junto con los ángulos de partida y colores de cada tortuga.

```

parent = tkinter.Tk()
parent.overrideredirect(1) # para que no desaparezca
parent.withdraw()
simpledialog=tkinter.simpaledialog
n = simpaledialog.askfloat('Fijar índice de refracción'...
#Coordenadas de meta y salida
meta=[330,-330]
salida=[-340,340]
X=meta[0]-salida[0] #distancia recorrida en X (ambos medios)
Y1,Y2=330,340 #distancia recorrida en Y en cada medio
posicion_y_podium=320 #coordenada y del podium
#ángulos (respecto al eje x ... )
ángulos=[-45,-55,-65,-75,-85] #en orden inverso...
colores=['purple','#FFFFD4','green','#FFFF00','red'] #...

```

Configuramos el título y dimensiones de la ventana:

```

#turtle.setup()
wn=turtle.Screen()
wn.title("Carrera de tortugas")
width, height= 800, 800
wn.screensize(width, height)

```

Pintamos el mar:

```

t=turtle.Turtle() # t dibuja nuestro entorno
t.hideturtle()

t.pencolor("blue")
t.fillcolor('blue')
t.pensize(5)
t.begin_fill()

t.goto(-350, 0)
t.goto(350, 0)
t.goto(350, -350)
t.goto(-350, -350)
t.goto(-350, 0)
t.end_fill()

```

Pintamos la arena:

```

t.pencolor("#FFA500")
t.fillcolor('#FFA500')
t.pensize(5)
t.begin_fill()

t.goto(-350, 0)
t.goto(350, 0)
t.goto(350, 350)
t.goto(-350, 350)
t.goto(-350, 0)
t.end_fill()

```

Dibujamos la meta:

```

t.hideturtle()
t.penup()
t.goto([330,-360])
t.color('white')
style = ('Courier', 40, 'bold')
t.write('X', font=style, align='center')

```

Mostramos los índices de refracción de la tierra y el agua:

```

#índice agua
t.goto([175,-45])
style = ('Courier', 25, 'bold')
t.write('n2 = 1.0',font=style)

#índice tierra
t.goto([175,-5])
t.color('black')
t.write('n1 = '+ str(n),font=style)

```

Creamos las nuevas tortugas y las metemos en una lista para facilitar su control mediante bucles:

```

a,b,c,d,e=turtle.Turtle(), turtle.Turtle(), ...
tortugas=[a,b,c,d,e]
for tortuga in tortugas: tortuga.hideturtle()

```

Llevamos las tortugas a la salida (pasando por meta, para dejar dibujada su trayectoria) y las orientamos en los ángulos fijados en la lista homónima:

```

for tortuga in tortugas:
    tortuga.penup()
    tortuga.shape('turtle')
    tortuga.showturtle()
    tortuga.color(colores.pop())
    tortuga.pensize(3)
    tortuga.turtlesize(1, 1, 2.4)
    tortuga.goto(meta)
    tortuga.pendown()
    angulo=ángulos.pop()
    tortuga.goto(-340-340/tan(radians(angulo)),0)
    tortuga.goto(salida)
    tortuga.setheading(angulo)

```

Diálogo para que el usuario decida cuándo empieza la carrera:

```

messagebox=tkinter.messagebox
info = messagebox.showinfo('Carrera de tortugas'...

```

Fijamos la velocidad de la animación y el tamaño del trazo, y creamos la lista para diferenciar qué tortugas están en tierra y cuáles han llegado ya al agua (necesario para modificar su velocidad):

```

for tortuga in tortugas:
    tortuga.pensize(10)
    tortuga.speed(5)

tortugas_tierra=tortugas[:]
tortugas_agua=[]

```

Bucle que controla la carrera:

```

while tortugas_agua==[] or tortugas_tierra==[]:
    for tortuga in tortugas_tierra:
        tortuga.forward(1)
    for tortuga in tortugas_agua:
        tortuga.forward(n)

#cuando las tortugas llegan al agua, giran:
posiciones_y_tierra=[tortugalenta.ycor() for tortugalenta...
if tortuga_llega_agua==[]:
    tortu_que_gira=tortugas_tierra[tortuga_llega_agua[0]]
    tortu_que_gira.setheading(tortu_que_gira.towards(330))
    #quitamos la tortuga de la lista de las que estan en ...
    tortugas_agua.append(tortugas_tierra.pop(tortuga...
    tortugas_agua.pop(tortuga_agua[0])

#las tortugas ganadoras dejan de avanzar
posiciones_y_agua=[tortugarapida.ycor() for ...
if tortuga_gana==[]:
    tortu_que_gana=tortugas_agua[tortuga_gana[0]]

    tortu_que_gana.penup()
    tortu_que_gana.goto(320,posicion_y_podium)
    tortu_que_gana.turtlesize(3, 3, 7.5)
    tortu_que_gana.stamp()
    posicion_y_podium=posicion_y_podium-30

    tortu_que_gana.stamp
    #quitamos la tortuga de la lista de las que estan en mar
    tortugas_agua.pop(tortuga_gana[0])

```

Avisamos al usuario de que ha terminado la carrera y cerramos *turtle*:

```

messagebox=tkinter.messagebox
info = messagebox.showinfo('Carrera de tortugas'...
turtle.bye()

```

Incluimos un pequeño bucle que permite comprobar qué tortuga se acerca más a la ley de Snell:

```

#hacemos una copia de los ángulos de cada tortuga ...
angulos_normal=[90-abs(angulo) for angulo in angulos]
angulos_normal.reverse() #los ordenamos ...
tortugas_nombres=['roja','amarilla','verde','azul','morada']

for angulo_inc in angulos_normal:
    X1=Y1=tan(radians(angulo_inc)) #distancia recorrida ...
    angulo_ref=round(degrees(arctan((X-X1)/Y2)),1)
    nombre=tortugas_nombres.pop(0)
    print('\n\nLa tortuga {} incide en el agua con un ...'.format(nombre))
    print('Para la tortuga ...')

quit() #turtle no parece cerrarse correctamente...

```

Referencias

- [1] Recogidos en el BOE, Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre.
- [2] Sexto estándar del Bloque IV de Física de 2.^º de Bachillerato: *Utilizar el Principio de Huygens para comprender e interpretar la propagación de las ondas y los fenómenos ondulatorios*.
- [3] *La habitación de Fermat*, dirigida por Luis Piedrahíta y Luis Sopeña. Enlace a la película en IMBD: <https://www.imdb.com/title/tt1016301/>.
- [4] La velocidad de la luz es insuperable en el vacío, pero realmente aquí estamos tratando con medios materiales, con $n > 1$. Realmente sí es posible desplazarse más rápido que la luz en un medio material (sin alcanzar nunca $v = c$), y cuando ocurre se pueden dar fenómenos muy curiosos, como la radiación Cherenkov.
- [5] H. GAERTNER, "Huygens' Principle: A case against Optimality", *Behavioral and Brain Sciences* 26(6), 2003, pp. 779- 781.
- [6] P. SCHOEMAKER, "Huygens Versus Fermat: No Clear Winner", *Behavioral and Brain Sciences* 26(6), 2003, pp. 781- 782.
- [7] J. KIMBALL y H. STORY, Fermat's Principle, Huygens' Principle, Hamilton's Optics and Sailing Strategy", *European Journal of Physics* 19(1), 1998, pp. 15-24.
- [8] S. LING, J. SANNY y W. MOEBS, *University Physics: Volume 3*. (Houston, Texas, OpenStax, Rice University, 2016). (Acceso libre en <https://bit.ly/2OZ0c5K>).
- [9] C. HUYGENS, *Traite de la lumiere* (1690).
- [10] R. FEYNMAN, R. LEIGHTON, y M. SANDS, *The Feynman Lectures On Physics* (San Francisco, Calif., Addison-Wesley, 1964). (Acceso libre en <https://www.feynmanlectures.caltech.edu>).
- [11] El caso del principio de Fermat es análogo al de Hamilton: es conocido como principio de mínima acción, cuando realmente propone la estacionariedad de la acción. M. ANDERSON, M. HADI y U. DETA, "Fermat's Principle and Hamilton's Principle: Does a Least Action Take a Least Time for Happening?", *Journal of Physics: Conference Series*, 1467, 2020, p. 012038.
- [12] A. L. AINA, *La llamada de Fermat* (2017). (Acceso libre en: <https://webs.ucm.es/info/gioq/docencia/MaterialesDocentes/LallegadadeFermat.pdf>).
- [13] Documentación del módulo *turtle* (Disponible en <https://docs.python.org/3.3/library/turtle.html?highlight=turtle>).
- [14] Una manera sencilla de instalar el módulo es tecleando: `python3 -m pip install {user} PythonTurtle PythonTurtle`.



¿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 * espectroscopía * detectores (silicio, HPGe, centelleadores, Cd/Zn/Te...) * cables y accesorios * gestión de adquisiciones

info@atisistemas.com

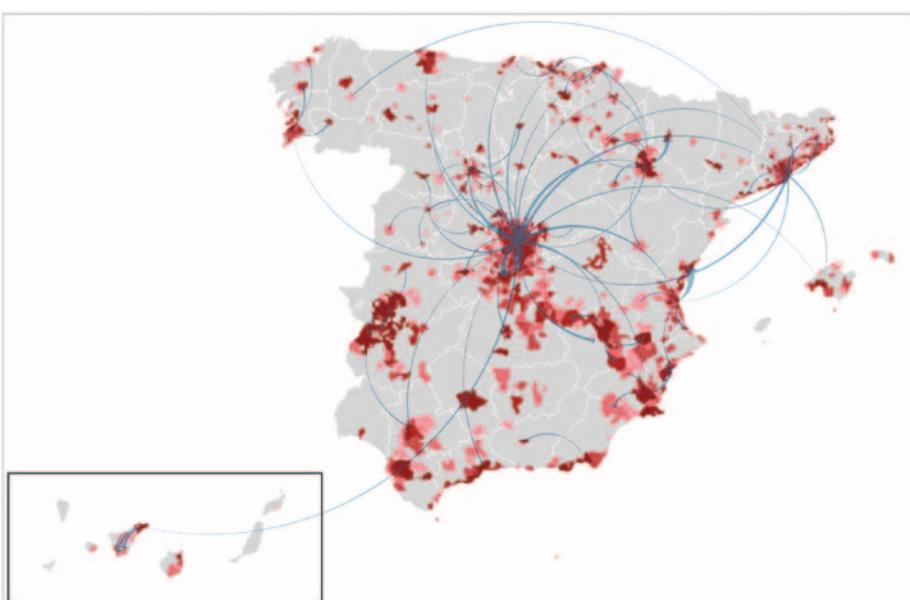
Puntos de interés

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

TRAS LAS HUELLAS DEL SARS-COV-2

En el 31 de diciembre de 2019, se notificó de forma oficial la existencia de un brote epidémico provocado por un nuevo coronavirus, denominado SARS-CoV-2, en la provincia de Hubei, en China continental. Esta epidemia es uno de los mayores retos a los que se enfrenta nuestra sociedad moderna y supone una amenaza sin precedentes para los

Zaragoza), con la participación de investigadores de la Universidad Federal de Viçosa (Brasil) y la Escuela de Medicina de Harvard (EE. UU.), concentraron sus esfuerzos en el diseño de un modelo que permitiera capturar las peculiaridades de la propagación del SARS-CoV-2 y el impacto sanitario de las infecciones graves por COVID-19. Para ello, usaron los modelos markovianos metapoblacionales generados en los últimos años donde, además de características epidemiológicas y clí-



sistemas sanitarios de todo el mundo. La gran capacidad de propagación del virus, caracterizada por un número reproductivo $R_0 \sim 3.0$, combinada con una gran fracción de contagios causados por infectados en fase presintomática o completamente asintomáticos, hace que el control de esta epidemia sea especialmente difícil.

Desde finales de enero dos equipos de investigadores liderados por Alex Arenas (Universitat Rovira i Virgili) y Jesús Gómez-Gardeñes (Universidad de

nicas, se introducen los aspectos más relevantes del comportamiento humano, como la distribución demográfica, patrones de contacto entre grupos de edades y los flujos de movilidad entre municipios. Estos resultados se publicaron el pasado mes de diciembre en la revista *Physical Review X* (DOI: 10.1103/PhysRevX.10.041055).

El 28 de febrero, una vez analizados los resultados que arrojaba el modelo para la evolución en España, lanzaron la alerta ante la inminente propagación de los contagios mediante la publicación de un mapa donde se recogía la propagación del riesgo de contagio en España. Con este mismo modelo, los dos grupos pudieron, ya



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

de lleno en la primera ola, evaluar las medidas de contención basadas en el distanciamiento y el confinamiento social. Según Arenas, “nuestros esfuerzos se dedicaron a evaluar estas medidas en términos de saturación hospitalaria, pronosticando con éxito tanto la incidencia observada en cada región como la sobrecarga del sistema sanitario”.

Por otra parte, según apunta Gómez-Gardeñes, “además del valor como herramienta de evaluación en tiempo real, el avance logrado con este modelo radica en haber encontrado una expresión analítica que relaciona la evolución del número de reproducción efectivo $\mathcal{R}(t)$ con las intervenciones no farmacológicas”. Este parámetro es clave para seguir la evolución de la transmisibilidad y los efectos de las medidas de contención, ya que cuantifica el número de infecciones secundarias generadas por un individuo infectado durante el transcurso de la epidemia y en función de las medidas que se van aplicando.

Estos avances han ayudado a evaluar las medidas de contención realizadas durante la primera ola epidémica en diferentes países y regiones. Sus resultados permitirán a los responsables en salud pública determinar la reducción precisa de la movilidad y el grado de confinamiento necesarios para doblar la curva de incidencia de futuras epidemias ante las que no se cuente con otras medidas que la intervención sobre el comportamiento humano.

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

FORMACIÓN DE CADENAS ATÓMICAS DE ORO MEDIANTE ELECTRONES CALIENTES E HIDRÓGENO

El oro es el metal más inerte de la naturaleza. Sin embargo, la interacción entre el oro y el hidrógeno atómico se ha predicho teóricamente que debería de ser muy fuerte. **Hasta la fecha existen pocos experimentos que han podido estudiar esta interacción debido a que son necesarias técnicas sensibles al esquivo hidrógeno y tengan resolución de átomos individuales.**

En un trabajo publicado recientemente en la revista *ACS Nano* (DOI: 10.1021/acsnano.0c05507) por los investigadores Pablo Merino, del Institu-

electrones calientes de forma localizada con la punta del microscopio.

La superficie (111) del oro—Au(111)—reconstruye en lo que se conoce como una estructura “herringbone”, o de espina de arenque. Esta estructura consiste en una disposición periódica inducida por tensión donde los dominios están separados por paredes de solitón que imprimen el aspecto característico de “espina de pescado” de la superficie. En esta estructura 23 átomos se comprimen lateralmente en la capa atómica superior para encajar en una longitud correspondiente a 22 átomos del volumen. Al inducirse esta reconstrucción, la superficie de Au(111) relaja su tensión intrínseca en un 22 %.

Los investigadores han descubierto usando STM que cuando esta superficie se recubre con hidrógeno molecular y se le inyectan electrones calientes de hasta 10 eV, **los átomos extra comprimidos de la capa superior son expulsados de la superficie, reaccionan con las moléculas de H₂ disociándolas y forman cadenas atómicas en la superficie**. Las cadenas están constituidas por hidruros de un solo átomo de oro de anchura, alineadas con las direcciones de alta simetría de la superficie. Debido a la gran resolución del STM para inyectar electrones calientes es posible generar las cadenas de forma muy precisa en ciertas terrazas de la superficie.

Estos hallazgos experimentales han sido confrontados con cálculos *ab initio* basados en la teoría del funcional de la densidad (DFT) y simulaciones de imágenes STM. La teoría confirma que la energía suministrada por los electrones inyectados en la superficie es suficiente para extraer un primer átomo de oro de la superficie y disociar la primera molécula de H₂, dando como resultado la nucleación de un monómero de hidruro de oro estable en la superficie. **Este procedimiento inicia el crecimiento de una cadena atómica mediante el levantamiento, con un coste energético menor, del átomo extra vecino y así sucesivamente, en un mecanismo de cremallera.** Por tanto, los cálculos energéticos permiten desentrañar el mecanismo de formación y explicar la aparición de las estructuras unidimensionales. La simulación STM de la cadena más estable encontrada teóricamente re-

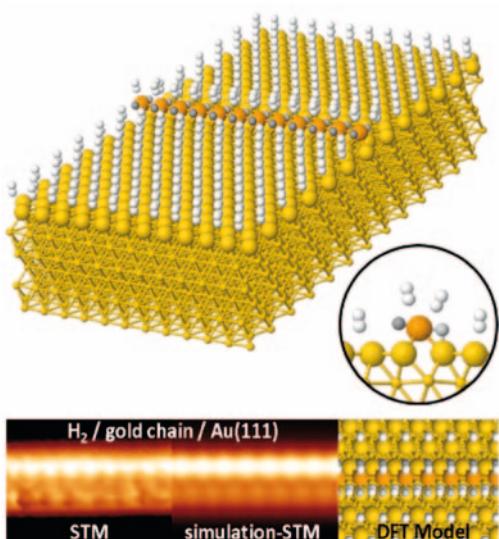
produce excelentemente la imagen observada en el experimento.

“Este hallazgo es sorprendente por la simplicidad de los actores principales del sistema, el oro y el hidrógeno. A pesar de que son elementos muy sencillos, su interacción da lugar a un novedoso tipo de estructuras unidimensionales y a una clase de reacción en cremallera que no se había observado antes en la formación de hidruros metálicos”, concluye el Dr. Merino, autor principal de este trabajo.

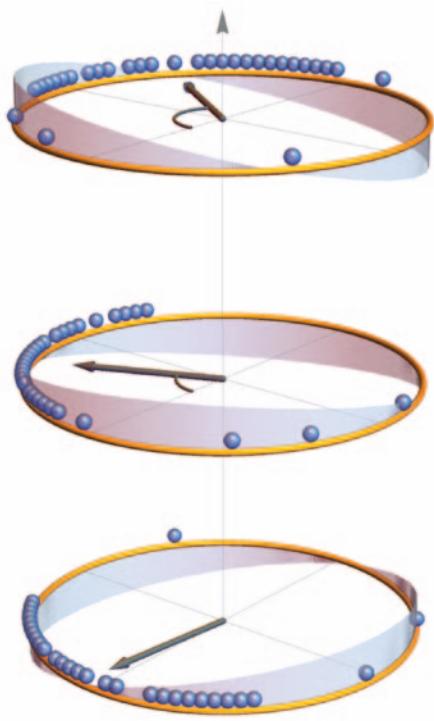
CREANDO CRISTALES DE TIEMPO A PARTIR DE EVENTOS RAROS

Hace ya más de 80 años, Lev Landau (Premio Nobel de Física en 1962) estableció la conexión entre la ruptura espontánea de simetrías y las transiciones de fase. Desde entonces, su idea ha sido ampliamente utilizada para la descripción de multitud de fenómenos físicos. Sin embargo, hasta hace unos años, este planteamiento no había sido aplicado a la **simetría bajo traslaciones temporales**, considerada históricamente como especial e irrompible a nivel fundamental. Esto cambió en 2012, cuando Frank Wilczek (Premio Nobel de Física en 2004) y Alfred Shapere propusieron el concepto de “cristal del tiempo”, un sistema que **rompe espontáneamente esta simetría en su estado fundamental**. Este nombre se debe a que dichos sistemas **presentan un comportamiento periódico espontáneo en el tiempo**, de forma análoga a los cristales “normales” que presentan un patrón repetitivo en el espacio. Estos nuevos **cristales temporales han despertado un gran interés tanto a nivel teórico como experimental**, dadas sus posibles aplicaciones en campos como la computación cuántica o la metroología.

En un reciente trabajo publicado en la revista *Physical Review Letters* (DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.160601), los investigadores Rubén Hurtado Gutiérrez, Carlos Pérez Espigares y Pablo Hurtado, de la Universidad de Granada, junto con Federico Carollo, de la Universidad de Tübingen, han descubierto una **nueva forma de crear cristales del tiempo** clásicos estudiando



to de Ciencia de Materiales de Madrid y del Instituto de Física Fundamental del CSIC, A. Roslawska, A. Grewal, C. C. Leon, K. Kuhnke, K. Kern, del Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, y C. González, actualmente en la Universidad Complutense de Madrid, se ha investigado la reacción de hidrógeno con la superficie (111) de oro mediante microscopio de efecto túnel (STM, por sus siglas en inglés) a bajas temperaturas en ultra-alto vacío complementado con simulaciones teóricas. Sorprendentemente, se observa que **la superficie del metal se reestructura formando cadenas de átomos de oro enlazados fuertemente con átomos de hidrógeno (también conocidos como hidruros de oro)** cuando se le inyectan



las **fluctuaciones raras** de sistemas de muchas partículas. En concreto, los autores encuentran que ciertos sistemas unidimensionales se comportan como un **cristal temporal cuando la corriente de partículas fluctúa muy por debajo de su valor típico** o promedio. Este fenómeno, aunque resulta muy interesante desde el punto de vista teórico, parece a primera vista de poco interés práctico al ser estas fluctuaciones tremendamente improbables. Sin embargo, un análisis detallado de la dinámica del sistema muestra que **este comportamiento improbable puede hacerse "típico"** aplicando cierto campo de empaquetamiento externo. Esto permite proponer un **nuevo modelo** que presenta una **transición de fase a una fase de tipo cristal de tiempo** similar a la del modelo original, pero que puede aprovecharse a nivel práctico de manera controlada y precisa. Dicho modelo se ha verificado mediante **simulaciones numéricas en Proteus**, el superordenador del Instituto Carlos I de Física Teórica y Computacional, demostrando que presenta todas las características de un cristal de tiempo. Además, en el trabajo se discute la posibilidad de **implementar experimentalmente estos nuevos cristales temporales** en sistemas coloidales mediante el uso de pinzas ópticas. “Estos resultados son importantes porque, a nivel fundamental, abren un camino inexplorado para entender mejor el tiempo y sus sime-

trías, mientras que, a nivel práctico, nos enseñan nuevas formas de crear cristales de tiempo”, afirman los autores.

MEDIDA INDIRECTA DE LA VELOCIDAD DE LA LUZ

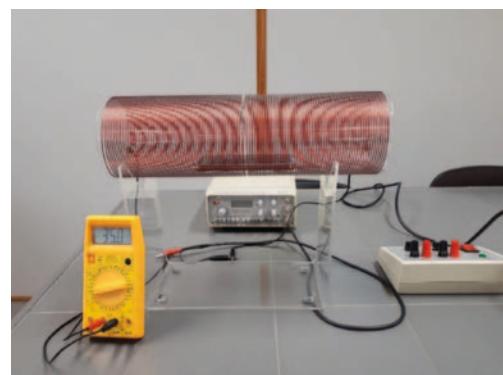
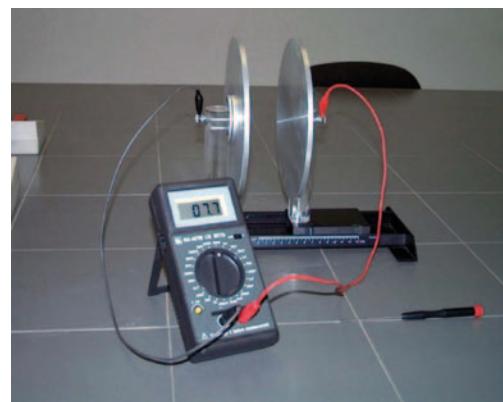
La velocidad de una onda sonora en una cuerda sujetada por sus dos extremos depende de la raíz cuadrada del cociente entre la tensión de la cuerda y su densidad longitudinal de masa. Es decir, **depende de propiedades mecánicas del medio en el que se propaga**. La velocidad de una onda electromagnética debe depender de las propiedades eléctricas y magnéticas del medio en el que se propaga. Si es en el vacío, debe depender de la permitividad eléctrica del vacío (ϵ_0) y de la permeabilidad magnética del vacío (μ_0). A efectos prácticos aire y vacío son equiparables.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Journal of King Saud University-Science* (DOI: 10.1016/j.jksus.2020.06.017), los investigadores Enrique Arribas, Isabel Escobar y Raquel Ramírez, de la Universidad de Castilla-La Mancha, con la colaboración de Augusto Beléndez, de la Universidad de Alicante, y Teresa Franco Martínez, del Instituto Politécnico Nacional de México, han determinado la velocidad de la luz mediante la conocida fórmula $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$ con instrumental típico utilizado en las prácticas de Física General y con la ayuda de un *smartphone*.

Primeramente, se determinó la permitividad eléctrica ϵ_0 a partir de la **medida de la capacidad de un condensador de placas planoparalelas**, variando para ello la separación entre sus placas (d). Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se obtuvo la pendiente de la recta de los datos de C frente a $1/d$, que está relacionada con ϵ_0 . A continuación se calculó la permeabilidad magnética μ_0 , **usando un solenoide por el que se hacía pasar diferentes valores de la corriente eléctrica y se medía el campo magnético en su centro usando el sensor Hall de un smartphone y la aplicación Physics Toolbox**. Mediante otro ajuste por mínimos cuadrados, la pendiente de la línea de ajuste está relacionada con μ_0 . Ahora, los datos que se ajustaron fueron el campo magnético y la corriente eléctrica.

Los valores obtenidos para la permitividad y la permeabilidad (con sus respectivos errores) fueron $\epsilon_0 = (8.87 \pm 0.29) \cdot 10^{-12} F/m$ y $\mu_0 = (1.25 \pm 0.03) \cdot 10^{-6} NA^{-2}$.

El resultado obtenido finalmente para la velocidad de la luz fue $c = (3.00 \pm 0.06) \cdot 10^8 m/s$, con un error relativo del 1.9 %. El valor real que es 299792458 m/s está dentro del intervalo de error. El error absoluto se calculó mediante la técnica RMS teniendo en cuenta los errores de la permitividad y de la permeabilidad.



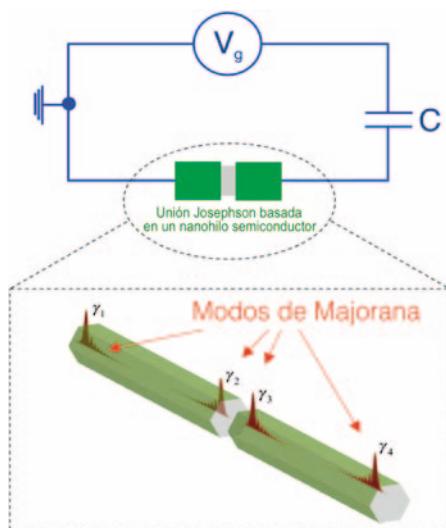
También se tuvo en cuenta el **tamaño finito del solenoide** porque el cociente entre su radio y su longitud es 0.15. La permeabilidad cambió un poco, $\mu_0 = (1.30 \pm 0.03) \cdot 10^{-6} NA^{-2}$ y el valor de la velocidad de la luz bajó ligeramente a $c = (2.94 \pm 0.06) \cdot 10^8 m/s$. Este valor era compatible con el anterior y con el valor exacto.

BITS CUÁNTICOS HÍBRIDOS SEMICONDUCTOR-SUPERCONDUCTOR

Durante los últimos años hemos asistido a un progreso sin precedentes en lo que se ha venido a llamar la “**segunda revolución cuántica**”. Esta revolución

pretende ir más allá de los principios cuánticos subyacentes que gobiernan gran parte de nuestros dispositivos actuales, desde el transistor al láser, y explotar propiedades genuinamente cuánticas (superposición cuántica, entrelazamiento, etc.) en el desarrollo de nuevas tecnologías.

Entre las muchas aplicaciones de estas nuevas tecnologías cuánticas, destaca la **computación cuántica** por las



grandes expectativas que ha generado. En particular, se espera que un ordenador basado en bits cuánticos (*qubits*) pueda realizar tareas irresolubles para los superordenadores más potentes de los que disponemos hoy en día. Esta “supremacía” o “ventaja” cuántica nos permitiría realizar grandes avances en campos muy diversos de la ciencia y la tecnología, que van desde el diseño de fármacos o nuevos materiales hasta la resolución de problemas de logística o finanzas.

Los primeros pasos en esta dirección son muy prometedores. Recientemente, varios gigantes de la tecnología (Google, IBM, Intel, Microsoft, Amazon, etc.) han apostado fuertemente por la computación cuántica. Algunos de sus logros más espectaculares, como la consecución de supremacía cuántica por parte de Google o la posibilidad de usar el ordenador de IBM en la nube, empiezan a aparecer en la prensa generalista. A pesar de este progreso, que ha generado cierto triunfalismo y una cierta sensación de burbuja relacionada con todo lo “Quantum”, debemos ser prudentes. Los logros de Google y, en general, de cualquier plataforma de

computación cuántica se centran en tareas muy concretas y/o en sistemas de pocos *qubits*. Estamos todavía muy lejos de tener las plataformas escalables de miles de *qubits* que necesitamos para corregir errores, debidos a decoherencia cuántica, mediante redundancia en el proceso de computación.

Los ordenadores cuánticos de las plataformas más exitosas (Google, IBM) contienen chips con *qubits* basados en dispositivos superconductores. La frecuencia del *qubit* se manipula mediante pequeños flujos magnéticos que permiten operar las puertas lógicas de manera rápida pero que, en contrapartida, generan ruido y decoherencia.

Una de las propuestas que pretende mejorar estos diseños se basa en *qubits* híbridos en los que la unión Josephson de un *qubit* superconductor se reemplaza por una unión basada en un material semiconductor. Estos *qubits* híbridos semiconductor-superconductor, permiten una manipulación de puertas puramente eléctrica y mejor integración. En un reciente artículo, publicado como perspectiva invitada en *Applied Physics Letters* (DOI: 10.1063/5.0024124), Ramón Aguado (investigador científico del CSIC que trabaja en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid) detalla todos los avances recientes en este nuevo enfoque para el *hardware* cuántico. La versatilidad de estos diseños híbridos permite explorar distintos prototipos, que incluyen los *transmon* basados en semiconductores, los *qubits* basados en estados de Andreev (superposiciones cuánticas partícula-hueco en un superconductor) y los *qubits* topológicos.

Estos últimos se basan en estados de Majorana, el análogo en física de la materia condensada a las exóticas partículas (iguales a sus propias antipartículas) predichas por Ettore Majorana en 1937 en el contexto de física relativista de altas energías. La gran ventaja de un *qubit* topológico es que la información se almacena de manera no-local en los modos de Majorana. Se ha demostrado teóricamente que esta no-localidad dota al *qubit* de Majorana de una gran inmunidad frente al ruido y la decoherencia (protección topológica). **La demostración experimental de un *qubit* topológico (direc-**

ción que explora Microsoft) sería una auténtica revolución en el campo, ya que su resiliencia a fallos permitiría construir ordenadores cuánticos sin necesidad de un escalado masivo.

CONOS DE DIRAC PARA BOSONES

El grafeno bicapa rotado ha atraído una enorme atención debido al reciente descubrimiento por parte del grupo de Pablo Jarillo Herrero, del MIT, de la superconductividad, es decir, el transporte de carga eléctrica sin pérdida de energía. Esta fase aparece a un ángulo de rotación aproximadamente de 1.05°, llamado en la literatura como **ángulo mágico**, por la emergencia de bandas electrónicas prácticamente planas. Pero este descubrimiento era solo el principio de una serie de nuevas y sorprendentes observaciones, como ferromagnetismo Hall anómalo, estados aislantes correlacionados y otras fases topológicas no-triviales.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.L011001), los investigadores Luis Brey y Tobias Stauber, del Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC), y Tetiana Slipchenko y Luis Martín-Moreno, del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón, se predice **otra fase sin precedentes que emerge para ángulos de giro aún menores que el ángulo mágico**. En este régimen del llamado grafeno mínimamente rotado, las dos capas hexagonales están fuertemente deformadas, de tal modo que la bicapa consiste de parches triangulares donde el apilamiento de las láminas es de tipo Bernal con un orden AB y BA alternándose entre triángulos vecinos.

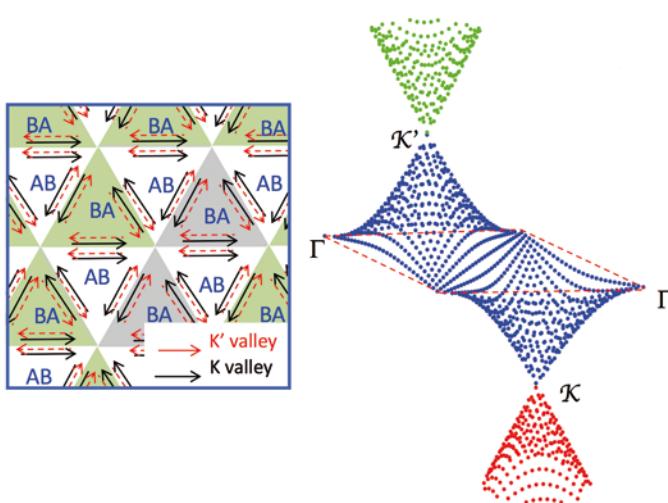
La aplicación de una diferencia de potencial eléctrico entre las capas abre un *gap* electrónico en los parches, aparcando estados electrónicos topológicamente protegidos en los bordes de los parches triangulares, debido a la diferencia en orden topológico entre triángulos con orden AB y orden BA. Estos estados son los únicos canales de conducción eléctrica posibles cuando el potencial químico está localizado en el *gap*.

Luis Brey y colaboradores estudiaron las excitaciones colectivas de estos estados electrónicos utilizando un modelo macroscópico por un lado y un modelo de red por otro. En ambos casos, los autores encontraron que la dispersión de las excitaciones se caracteriza por la existencia de dos conos de Dirac, de tal manera que estos plasmones son inherentemente quirales, mostrando que también hay cuasipartículas bosónicas cuya dinámica se rige por conos de Dirac.

Como señala el Dr. Brey, "los plasmones están compuestos de patrones de corriente que envuelven los parches triangulares, con distinto sentido y quiralidad dependiendo del cono al que pertenezcan". Los autores proponen que la estructura de los campos eléctricos asociados con estos plasmones quedaría reflejada en un experimento de microscopía de barrido de campo cercano, que mide localmente los campos eléctricos creados por los plasmones que han sido inducidos por la punta oscilante de un microscopio de fuerzas atómicas.

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la frecuencia donde existen los conos de Dirac para plasmones puede modularse mediante la manipulación del ángulo de rotación de la bicapa rotada, añade el Dr. Brey, y concluye que también se puede sintonizar la frecuencia modificando la intensidad de la interacción de Coulomb mediante la modificación del entorno dieléctrico donde está depositada la bicapa.

Finalmente, la existencia de estos conos de Dirac abre la posibilidad de perturbar el sistema de tal manera que el sistema abriera un *gap* en torno a estos puntos de Dirac y convertir la bicapa en un cristal fotónico, donde la luz no podría propagarse en el rango de frecuencias del *gap* creado. Aún más interesante y exótico sería poder crear un *gap* de signo opuesto en los dos conos de Dirac, de tal manera que el sistema sería equivalente al aislante topológico de Haldane y soportaría plasmones unidimensionales girando alrededor de la muestra —un estado plasmónico sin precedentes—.



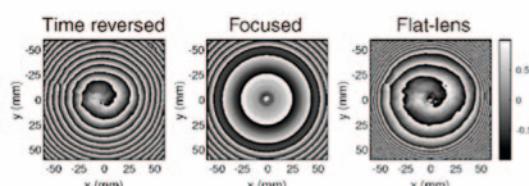
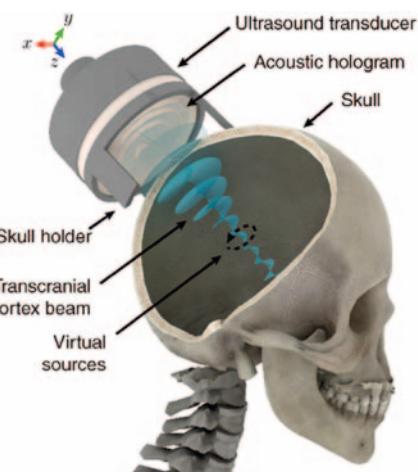
HOLOGRAMAS ACÚSTICOS PARA TERAPIA EN NEUROLOGÍA

Sí bien conocido que los haces de luz pueden ser modulados mediante hologramas ópticos para generar imágenes visibles. Análogamente, mediante hologramas acústicos también se pueden sintetizar *imágenes acústicas*, es decir, concentrar el sonido o las vibraciones en una zona arbitraria del espacio y, simultáneamente, permitir que otras zonas permanezcan en silencio o en reposo. Los hologramas acústicos modifican el frente de ondas mecánicas de manera que son capaces de modular tanto su fase como, en algunos casos, su amplitud. Para ondas acústicas de frecuencias ultrasónicas, como las usadas comúnmente en aplicaciones biomédicas, de alrededor de 1 MHz, se pueden fabricar hologramas acústicos mediante impresión 3D en polímeros elásticos, resultando en lentes acústicas con una escala de rugosidad de algunos milímetros.

Estos hologramas acústicos han encontrado una aplicación reciente en el ámbito biomédico para las nuevas terapias de ultrasonidos focalizados en neurología. Los ultrasonidos focalizados se emplean comúnmente para múltiples terapias neurológicas, y ofrecen múltiples aspectos deseables, puesto que no emplean radiación ionizante, resultando en tratamientos completamente no invasivos, seguros y de cos-

te moderado. Ejemplos de estos tratamientos son la ablación térmica de los núcleos talámicos mediante ultrasonidos focalizados para el tratamiento del temblor esencial, la apertura de la barrera hematoencefálica para la administración de fármacos de manera localizada y no invasiva, o aplicaciones de neuromodulación localizada mediante la acción mecánica de los ultrasonidos sobre los tejidos del sistema nervioso central. Sin embargo, en su camino hasta el foco, los

haces de ultrasonidos se ven afectados por las aberraciones que introducen los tejidos, principalmente los huesos, que provocan una fuerte atenuación y refracción modificando el frente de ondas irregularmente. Estas aberraciones y refracciones resultan en una pérdida de la focalización y la pérdida de control del punto focal. Además, en muchos casos la zona de interés terapéutico no es un solo punto, sino una estructura con una caprichosa forma en tres dimensiones,



como ocurre en terapias sobre núcleos del cerebro profundo, por ejemplo, el hipocampo.

En un artículo recientemente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.14.054070) por los investigadores Sergio Jiménez Gambín, Noé Jiménez y Francisco Camarena, del grupo de Ultrasonidos del Instituto de Instrumentación para Imagen Molecular, centro mixto entre el CSIC y la Universitat Politècnica de València que dirige el Prof. José M.^a Benlloch, se han desarrollado lentes holográficas acústicas para superar estas limitaciones y focalizar campos ultrasónicos libres de aberraciones dentro del cráneo. Los resultados demuestran que, utilizando lentes impresas en 3D de bajo coste, los haces ultrasónicos pueden focalizarse en el interior del cráneo de manera eficientemente y sin aberraciones. Puesto que los hologramas permiten un control muy preciso del frente de ondas mecánicas, se pueden obtener lentes holográficas que compensan las aberraciones introducidas por los huesos y, simultáneamente, focalizan la energía mecánica en varios puntos focales, “lo que permite focalizar a la vez sobre varias estructuras del sistema nervioso central, por ejemplo, el hipocampo izquierdo y el derecho”, concluye el Dr. Noé Jiménez. Estos hologramas acústicos van más allá de los haces de ultrasonidos tradicionales, pues permiten sintetizar imágenes acústicas con una estructura más elaborada, facilitando la generación de haces curvados, o incluso zonas focales con la forma del órgano a tratar.

El mismo grupo de investigación valenciano también ha demostrado que los hologramas permiten sintetizar otros campos acústicos complejos dentro del cráneo, como por ejemplo haces de vórtice. Estos haces presentan una singularidad de fase en el eje, lo que abre las puertas para atrapar y manipular sin contacto pequeños objetos, como agregaciones de fármacos o coágulos dentro del sistema nervioso central de manera no invasiva. Los hologramas acústicos abren nuevas vías para generalizar aplicaciones emergentes de los ultrasonidos terapéuticos, como la apertura de la barrera hematoencefálica o neuromodulación mediante sistemas no invasivos y de muy bajo coste.

CONTROL DE ONDAS ELÁSTICAS MEDIANTE PATRONES DE MUARÉ

La interacción de campos ondulatorios, tanto acústicos como electromagnéticos, con materiales periódicos presenta una gran variedad de propiedades que han dado lugar a un sinfín de aplicaciones. Estas estructuras, análogas a los cristales en la física del estado sólido, explotan la interacción de la periodicidad del movimiento ondulatorio con la suya propia, dando como resultado propiedades de propagación en el material llenas de peculiaridades.

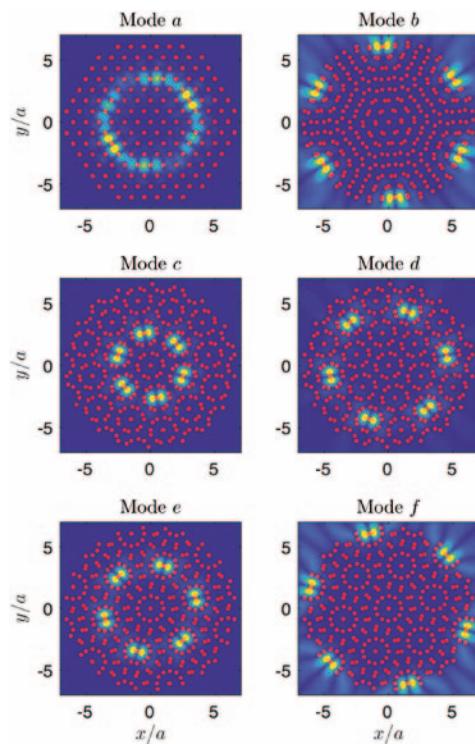
En el lado opuesto a los materiales periódicamente modulados se encuentran los materiales desordenados, en los cuales se encuentran impurezas de forma aleatoria por todo el material. En este caso, cuando una onda se propaga por dicho medio, encuentra dispersores de manera aleatoria, pero para determinados parámetros desorden-longitud de onda pueden darse fenómenos interesantes relacionados con la localización espacial de la energía.

Aunque podría concluirse que todos los materiales pertenecen a un tipo o a otro, es decir, o están modulados periódicamente o de manera aleatoria, lo cierto es que no es así. Existe una situación híbrida que corresponde a los denominados medios aperiódicos, los cuales presentan propiedades típicas de materiales tanto periódicos como desordenados.

Existen muchas maneras de crear materiales aperiódicos, pero recientemente se cuenta con una familia de cristales aperiódicos que ha despertado el interés de investigadores en varias áreas: son los **patrones de Muaré** (en inglés “Moiré patterns”). Estos patrones se generan cuando se superponen dos redes periódicas y se les aplica un giro relativo, como puede verse en la figura para varios ángulos diferentes. Como puede apreciarse, en función del valor del ángulo se forman patrones que parecen periódicos pero que, observados de cerca, no lo son. Los patrones nunca se repiten salvo para una serie de ángulos especiales. Estas estructuras se han popularizado debido a que **otorgan al grafeno propiedades superconduc-**

toras, aunque en otros campos de la física ondulatoria también presentan propiedades interesantes.

En un trabajo reciente publicado en la revista *Physical Review Applied* (DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.L011001), los investigadores Marc Martí Sabaté y Dani Torrent Martí, de la Universitat Jaume I (UJI) de Castelló, han estudiado las propiedades acústicas de placas elásticas en las que se han insertado resonadores siguiendo patrones de Muaré. Como



señala el Dr. Torrent, “como se trata de muestras pequeñas, este trabajo nos ha permitido profundizar más en los mecanismos de localización de ondas en estos materiales”, y añade que “el trabajo demuestra que existe una interacción dominante entre pares de dispersores de las dos redes”. Como puede verse en la figura, el lugar exacto en el que esta interacción tiene lugar depende fuertemente del ángulo de giro entre las dos redes que forman el patrón de Muaré, por lo que es posible “sintonizar” la frecuencia y el lugar a la que aparece el estado localizado.

Esta capacidad de seleccionar la frecuencia de localización del campo acústico mediante un mecanismo tan sencillo tiene gran relevancia, sobre todo de cara a la fabricación de dispositivos basados en estas ondas, como biosensores, microlentes o dispositivos de recuperación de la energía térmica, concluye el Dr. Torrent.

Hemos leído que...

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

Sección coordinada por Elena Pinilla Cienfuegos

En los últimos años una serie de observaciones astronómicas y astrofísicas han revolucionado el conocimiento de la cosmología y de la propia física fundamental. Por un lado, la evidencia observacional de la existencia de la materia y de la energía oscuras ha puesto de manifiesto que la llamada materia ordinaria (la que, por ejemplo, constituye los átomos de los que estamos hechos) representa apenas un 5 % del total de constituyentes del universo actual. Su naturaleza (qué tipo de “substancia” es) permanece aún desconocida. Por otro lado, la detección de ondas gravitatorias ha supuesto también un extraordinario descubrimiento: no sólo confirma, una vez más, la Teoría General de la Gravitación de Einstein, sino que amplía el conjunto de señales procedentes de los confines del universo (anteriormente formado por la luz visible, ondas de radio, rayos X o incluso los neutrinos) formando parte de lo que se denomina astronomía de “multimensajeros”. Se llevan ya detectadas unas cincuenta ondas gravitatorias por la colaboración Ligo-Virgo, e interpretadas como fusión de agujeros negros o de estrellas de neutrones, según su patrón característico de señal en el tiempo que permite, además, determinar las masas de los objetos estelares iniciales.

Recientemente se ha observado la señal de una **onda gravitatoria** de tal intensidad (en términos relativos) que precisaría de una fusión entre dos agujeros negros de masas demasiado elevadas con respecto a lo estimado mediante la evolución estelar que les da origen. Un grupo internacional de investigadores, entre los que se encuentran **José Antonio Font Roda** y **Nicolás Sanchis Gual**, ambos miembros del GE de Astrofísica de la RSEF, han publicado un artículo en

la prestigiosa revista *Physical Review Letters* (*Phys. Rev. Lett.* 126, 081101, 2021) donde proponen, mediante un riguroso estudio estadístico de la señal, que tal onda podría ser debida a la fusión de **dos estrellas formadas por materia oscura**, y no de dos agujeros negros. Las estrellas “oscu-



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



Recreación artística de una fusión de dos estrellas de bosones. Nicolás Sanchis-Gual y Rocío García Soto

ras”, de naturaleza totalmente diferente de los agujeros negros, estarían formadas por bosones ultraligeros semejantes al bosón de Higgs, pero de masa extremadamente pequeña. Si se confirmara esa interpretación con nuevas observaciones de ondas gravitacionales intensas, sin duda sería uno de los grandes descubrimientos de la ciencia y la búsqueda de la materia oscura podría también realizarse en aceleradores como el LHC del CERN en Ginebra. <https://bit.ly/3uJJZC3>

Alemania, hacia 1800, la llamada “policía celestial” para llevar a cabo una búsqueda sistemática en todo el firmamento del presunto pero esquivo planeta. No obstante, fue un astrónomo italiano, Giuseppe Piazzi, quien, por puro azar, observó un cuerpo que se asemejaba a un cometa, pero que podría corresponderse con el ansiado astro. Tras el primer avistamiento, y para desesperación de Piazzi (y la policía celestial) se perdió su rastro hasta que, en 1801, el gran matemático Carl Friedrich Gauss (entonces un joven desconocido) envió al director del Observatorio Astronómico de Gotha sus cálculos matemáticos para localizar el “planeta”. Ahora bien, éste resultó ser el asteroide Ceres, de unos 500 kilómetros de radio, bastante menor que la Luna y, por tanto, no un verdadero planeta (recalificado como planeta enano en el siglo xxi). El mayor del cinturón de asteroides, como sabemos en la actualidad.

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”!

Una búsqueda astronómica algo semejante se ha desarrollado recientemente, esta vez en los confines de nuestro sistema solar. *Farfarout* (o “muy, muy lejano”), que es como ha sido bautizado el objeto observado más lejano del sistema solar, fue avistado por primera vez en enero 2018 por Scott Sheppard en el Telescopio Subaru, ubicado en Maunakea (Hawái), y luego desapareció de la vista de los astrónomos. Aunque sus descubridores sabían perfectamente que el objeto estaba muy lejos, no estaban seguros de la distancia exacta a la que se encontraba. Era necesario realizar más observaciones para averiguarlo, por lo que para determinar su órbita el científico pasaría los dos años siguientes en compañía de los investigadores David Tholen, de la Universidad de Hawái, y Chad Trujillo, de la Universidad del Norte Arizona, utilizando el telescopio Gemini Norte, también en Maunakea, y los Telescopios de Magallanes en Chile.

Por fin, el equipo ha confirmado que *Farfarout* se encuentra a 132 unidades astronómicas (ua) del Sol, lo que equivale a 132 veces la distancia del Sol a la Tierra. A modo de comparación, Plutón, que ya nos parecía lejos, está en promedio a 39 ua del Sol. “Es probable que *Farfarout* fuera arrojado al exterior del Sistema Solar al acercarse demasiado a Neptuno en un pasado distante”, explica Trujillo. “Y también es probable que nuevamente en el futuro *Farfarout* interactúe fuertemente con Neptuno, ya que sus órbitas aún intersectan”, añade. Esperemos que si eso ocurre continúe bien lejos de la Tierra. <https://bit.ly/3sxmgDb>

Tras un viaje de cerca de 480 millones de kilómetros que inició en julio de 2020, el rover **Perseverance** de la NASA hizo historia el pasado el 18 de febrero realizando un

trepidante descenso hacia el cráter Jezero del planeta Marte. Este sofisticado robot tiene como misión buscar rastros de vida en esta zona del planeta rojo, que hace 3.500 millones de años era un gran lago donde pudieron darse las condiciones aptas para la aparición de vida. Explorará el suelo y la atmósfera durante al menos un año marciano, lo que equivale a cerca de 687 días terrestres. Pero es que, además, esta misión esconde algunos secretos... El robot Perseverance lleva varios **mensajes escondidos** en algunos de los elementos clave de su diseño: en el **paracaídas** de su aterrizaje llevaba patrones especiales en rojo y blanco en forma de código binario que representa una frase secreta codificada: “Atrévete a cosas poderosas” (“Dare mighty things”, en inglés). Es el lema del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA en California (EE. UU.), responsable de la misión, y un resumen de una cita del discurso “Strenuous Life” de Teddy Roosevelt. Hay una **placa en homenaje** al personal sanitario en reconocimiento a la lucha contra la pandemia de la Covid-19, y tres **microchips** que llevan el nombre de casi 11 millones de personas. Las **Mastcam-Z**, que son dos cámaras de alta definición para tomar fotografías en color de Marte, llevan un mensaje: “¿Estamos solos? Vinimos aquí para buscar signos de vida y recolectar muestras de Marte para estudiarlas en la Tierra. A los que sigan, les deseamos un viaje seguro y la alegría del descubrimiento”. Estas cámaras llevan grabados también dibujos significativos de la vida en nuestro planeta, como un dinosaurio, un helecho, cianobacterias, un hombre y una mujer, o una molécula de ADN. En espectrómetro **SHERLOC** (Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals) encontramos una moneda marcada con la dirección de



Sherlock Holmes: 221b de Baker Street, Londres. Y por último la **SuperCam**, que es un instrumento láser con el que se medirá la composición del suelo de Marte, lleva una roca de meteorito marciano que servirá para su calibración. <https://bit.ly/3uAFZIs>

Fosfano en Venus: ¿un ejemplo de *pareidolia*? Muchas y profundas diferencias distinguen las llamadas pseudociencias de la verdadera ciencia, tanto en sus planteamientos como en la metodología seguida. Quizá una de las más significativas sea el riguroso examen crítico al que es sometido cualquier trabajo de investigación que se presenta a la comunidad científica, especialmente si es de gran relevancia o impacto. Algo así ha sucedido con la pretensión de haber descubierto **fosfano** (fosfuro de hidrógeno PH₃) en la atmósfera de Venus, como había reivindicado un equipo liderado por la astrónoma de la Universidad de Cardiff (Reino Unido), Jane Greaves, utilizando el James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) y la red Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) y del que nos hablamos hecho eco en esta sección. Los datos fueron publicados en *Nature Astronomy* con una enorme repercusión mediática, a pesar de las dudas que suscitó desde el primer momento, pues sería indicativo de vida en el planeta gemelo (pero mucho más caliente) de la Tierra. En consecuencia, se ha intentado replicar dicho resultado independientemente por diversos equipos de investigación, pero todos con resultado negativo; las señales de fosfano realmente no aparecen en los datos analizados. Todo apunta a que el primer equipo sufrió una *pareidolia*, es decir, un fenómeno psicológico consistente en que un estímulo vago y aleatorio (habitualmente una imagen) es percibido erróneamente como una forma reconocible, mezclando lo percibido con lo fantaseado. Posiblemente detrás de la supuesta *pareidolia* subyace un exceso de prisas y ganas de realizar un descubrimiento espectacular por parte de los investigadores, debido a la presión por publicar (y tener éxito) al que está sometida la mayor parte de la comunidad científica. Es la “cruz” de la ciencia, compensada por los mecanismos de escrutinio y revisión potenciados por la misma competitividad entre grupos distintos. Me pregunto... ¿Alguien está a salvo de ella? <https://bit.ly/2ZNBIpf>

Reseñas de libros de interés



Más allá del Big Bang

Iván Agulló Ródenas

Debate, 2020, 112 págs.

El lector de este ameno libro tendrá entre sus manos un conciso recorrido por la historia del universo. Escrito para acercar la física y la cosmología al gran público, el texto no pierde por ello rigor científico. Buena muestra de que es un libro escrito pensando en los lectores es que esta reseña coincidirá seguramente con su segunda o tercera edición, y con decenas de comentarios en las redes sociales. En poco más de cien páginas, Iván Agulló, actualmente profesor en Louisiana State University, conecta con un gran espectro de lectores que, aunque no todos versados en física, tienen una curiosidad natural por saber qué hay detrás del universo más visible, cómo fue su infancia, cómo hemos llegado hasta aquí y si tuvo un nacimiento. Esta última e intrigante cuestión ocupa un lugar privilegiado en la narrativa del libro y justifica su título.

La amabilidad con que Iván trata a sus lectores surge de sus habilidades comunicativas, mostradas ya cuando, siendo becario predoctoral en la Facultad de Física de Valencia, daba sus primeras clases. Pero también por su gran experiencia en el tema. Iván cuenta con una sólida trayectoria científica. Ha ganado en dos ocasiones (2011 y 2017) el primer premio del prestigioso concurso de ensayos de la Gravity Research Foundation, que cuenta con una historia de más de 70 años (y entre sus antiguos premiados destacan S. Hawking y R. Penrose). Y también, y sin pretender ser exhaustivo, el Premio Investigador Joven de la RSEF en 2011. Iván ha tenido,

do, como muchos brillantes jóvenes de su generación, un periplo internacional muy completo: Universidad de Wisconsin-Milwaukee, Penn State, Cambridge y, finalmente, la Universidad Estatal de Louisiana.

El tema central del libro conecta muy bien con el sentir del comité Nobel de los últimos años. En 2020 se ha galardonado a R. Penrose por sus teoremas de singularidades (en agujeros negros, pero también indirectamente a la "singularidad" asociada al Big Bang) y en 2019 a J. Peebles por la fundamentación de la cosmología física y el origen de las estructuras cósmicas. *Más allá del Big Bang* se interroga sobre el origen del universo y el papel desempeñado por la física cuántica. Una idea persistente de la narrativa del libro es que la teoría estándar del Big Bang cuestiona realmente los límites de validez de la teoría general de la relatividad en el supuesto origen del tiempo. El autor se posiciona del lado de Einstein cuando, en el primer apéndice de su famoso libro *El significado de la Relatividad* (Einstein, 1922), afirmaba:

La teoría actual de la relatividad se basa en una división de la realidad física en un campo métrico (gravitación) por una parte y un campo electromagnético y materia por otra parte. En realidad, el espacio será probablemente de un carácter uniforme y la actual teoría será solo válida como un caso límite. [...] No se puede, por tanto, admitir la validez de las ecuaciones para densidades de campo y de materia muy grandes y no se puede de ahí sacar la conclusión de que el principio de la expansión deba significar una singularidad en el sentido matemático. Todo lo que tenemos que reconocer es que las ecuaciones no son aplicables a esas regiones.

Las primeras frases sugieren una visión unificada de la gravedad con el resto de las interacciones fundamentales. Esto es justamente lo que pretende la llamada teoría de cuerdas. Las últimas frases enlazan con la imagen del universo que nos ofrece la denominada cosmología cuántica de

lazos, como describe Iván brevemente en el capítulo 8 del libro. La singularidad del Big Bang caliente queda reemplazada por una breve fase de gran expansión (inflación) y, previa a ella, un rebote de origen cuántico. Desde esta perspectiva el universo sería eterno y contendría una contracción violenta seguida por un rebote que daría lugar a inflación y al Big Bang caliente.

Estas complejidades son narradas por Iván de manera sencilla y asequible. Este es el objetivo de su libro, sembrar interés, y que los mensajes alcancen a un público amplio. No está escrito con el afán de mostrar sus conocimientos, sino desde una posición de humildad que facilita la lectura. Como buen libro de divulgación no contiene fórmulas. Realmente, solo las ecuaciones de Einstein, y por razones obvias.

El texto aparece salpicado de breves referencias históricas (a Ashtekar, Guth, Hawking, Heisenberg, Lemâitre, Hoyle, Parker, Penrose, Schrödinger, entre otros). Estas precisiones suelen obviarse en muchos libros de divulgación, lo que acaba creando confusión en la ordenación cronológica de los hitos más relevantes, incluso entre lectores especializados. Valga el ejemplo del descubrimiento de L. Parker, a mediados de la década de los sesenta, de la creación *espontánea* de partículas por la expansión del universo. Contiene implícitamente la predicción de la creación de ondas gravitatorias primordiales por la expansión del universo (aún no detectadas) y el germen del posterior éxito de la teoría inflacionaria en la explicación cuántica de la formación de estructuras. El libro también nos recuerda que el propio Schrödinger especuló con ideas parecidas en 1939, si bien en el contexto limitado de la mecánica ondulatoria. Es muy de agradecer disponer de una breve y coherente descripción histórica de las ideas que fundamentan nuestra concepción actual del universo.

En resumen, un libro de divulgación científico que se convierte en indispensable para todos aquellos que sientan curiosidad por el origen de nuestro universo.

José Navarro-Salas
Universidad de Valencia-IFIC



¿A qué altura está el cielo?

Jorge Mira Pérez, María Canosa (col.), Dani Padrón (ilustr.)
Alvarellos Editora, 2020, 132 págs.

La observación de un cielo nocturno despejado y no contaminado, para quien haya tenido la oportunidad de hacerlo, es uno de los espectáculos más fascinantes que nos brinda la naturaleza. En la actualidad, una mayoría de la población humana desarrolla su vida en entornos urbanos, donde diversos factores (exceso de iluminación, ritmo de vida, contaminación atmosférica, *skyline*, etc.) contribuyen a que el firmamento que se extiende sobre nuestras cabezas pase desapercibido ante nuestros ojos. Las más de las veces miramos hacia el horizonte (a través de una ventana o del parabrisas del coche), mientras que tan solo levantamos la vista hacia el céntit en muy contadas ocasiones (normalmente, cuando los medios de comunicación anuncian algún acontecimiento astronómico visualmente relevante).

Los interrogantes que suelen surgir al mirar (o pensar en) el cielo, y que cada uno le dé el significado que deseé a esta palabra, se refieren principalmente a su grandeza (la inmensidad del Universo es una expresión recursiva), a la constitución de los cuerpos celestes (¿habrá allá arriba materiales con propiedades desconocidas en nuestro planeta?) o a la posibilidad de vida extraterrestre (¿estamos solos en el cosmos?). Interesarse por la "altura" a la que se halla el cielo no es, precisamente, una cuestión que se me pasaría por la cabeza, pero he de reconocer el acierto de Jorge Mira al reformular de forma más poética la trascendental pregunta sobre el tamaño del Universo, reorientando la cuestión hacia la "altura del cielo", que se constituye en el *leitmotiv* para desarrollar

en su reciente libro, titulado precisamente *¿A qué altura está el cielo?*

Para pulir la escritura del texto, Jorge ha contado con la colaboración de María Canosa, una de las principales figuras de la literatura infantil y juvenil de Galicia, con el objetivo de conseguir una redacción caracterizada por un estilo ágil, directo, ameno y cercano (adecuado para un público no especialista lo más amplio posible, partiendo incluso desde últimos cursos de Educación Primaria). La obra se complementa con el trabajo de uno de los referentes de la ilustración gallega, Dani Padrón, que ha elaborado unos dibujos clave para comprender los fundamentos que permitieron medir las diferentes distancias astronómicas a lo largo de la historia.

Tras un preámbulo en el que se contextualiza y expone la pregunta que subyace a lo largo de todo el libro, Jorge Mira guía al lector a través de un recorrido histórico que comienza en Grecia varios siglos antes de nuestra era, donde sus pensadores más destacados (Aristarco, Hiparco, etc.) fueron capaces de estimar las dimensiones de la Tierra, la Luna y el Sol (los objetos celestes más visibles y, por tanto, más relevantes para los humanos), así como las distancias entre ellos.

Pero la innata curiosidad del ser humano le llevó a plantearse preguntas sobre otros astros que se podían percibir a simple vista y cuyos movimientos sobre la bóveda celeste eran intrigantes. Esos misteriosos objetos, que erraban brillantes por el cielo, eran los planetas, y llamaron la atención de la flor y nata de los científicos de la Edad Moderna (Copérnico, Galileo, Newton, etc.), con la importantísima consecuencia (impactante, para la sociedad renacentista) de retirarle a la Tierra el título de centro del Universo, el cual pasaba a recaer sobre el Sol, alrededor del cual orbitaban los planetas siguiendo unas leyes deducibles científicamente. A lo anterior, cabe añadir que los progresos de la ciencia durante la época barroca permitieron a los científicos determinar una distancia al Sol bastante parecida a la que conocemos en la actualidad, descubrir nuevos planetas y estimar la distancia a la que se hallaba el más alejado de ellos (Urano) respecto de la Tierra, la cual podría considerarse como la altura a la que se encontraba el cielo para los habitantes de finales del siglo XVIII.

El siguiente capítulo del libro aborda los cuerpos celestes que se hallan más distantes que los planetas: las estrellas, esos pequeños puntos luminosos que tintinean y prácticamente no cambian sus posiciones relativas. A comienzos del siglo XIX, Bessel fue capaz de determinar la distancia entre la estrella 61 Cygni y nuestro planeta. Pero las estrellas no están distribuidas aleatoriamente como objetos aislados en el espacio, sino que se agrupan en galaxias y, gracias a meticulosas medidas efectuadas por Henrietta Leavitt a principios de siglo XX sobre la variación en la luminosidad de las estrellas Cefeidas, se pudo determinar el tamaño de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Este tamaño bien podría tomarse como la altura del cielo en los inicios del siglo XX.

Los desarrollos astronómicos acaecidos a lo largo del siglo XX constituyen el tema del siguiente capítulo. El conocimiento sobre las galaxias se enriqueció durante el primer tercio de este siglo, en especial gracias a las observaciones de Edwin Hubble, quien encontró que las galaxias se alejaban respecto de la Tierra, y que lo hacían tanto más rápidamente cuando más lejos se hallaban. Esto encajaba con la idea, propuesta teóricamente por Georges Lemaître tras desarrollar las ecuaciones de la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein, de que hubo un instante inicial en el que todo el cosmos estuvo concentrado en un mismo punto, y sus constituyentes comenzaron a separarse a partir de un Big Bang, cuyo carácter singular se articuló en el marco de la Teoría de la Relatividad General durante la segunda mitad del siglo XX por Roger Penrose (Premio Nobel de Física en 2020) y Stephen Hawking. De este modo se puede calcular la edad del Universo, que es de unos 13.800 millones de años. Pero de esta cifra no se induce inmediatamente el tamaño del Universo en años luz (la respuesta esperable a la pregunta sobre la altura del cielo), sino que todavía es mayor... debido a una sencilla explicación que se encuentra al final del libro y que no creo conveniente revelar a los lectores de esta reseña, para que les pique la curiosidad y se animen a hacerse con un ejemplar del libro.

Además del contexto histórico en que se realizan los sucesivos descubrimientos, acompañados de cifras para

responder a la pregunta que da título al libro, Jorge Mira explica en sus páginas los procedimientos empleados para obtener esos resultados, de una manera inteligible y con argumentos que puede seguir cualquier lector con unos conocimientos básicos de matemáticas. Esto último es de destacar, pues tan interesante es conocer las

distancias a las que se encuentran los diversos cuerpos celestes, como los métodos empleados para obtenerlas, lo cual queda muy bien explicado en el libro *¿A qué altura está el cielo?*

Así pues, sea bienvenido este nuevo libro (apto para todos los públicos) de Jorge Mira, en el que una vez más da muestras de su buen hacer en el uni-

verso de la divulgación científica (cuyo tamaño también ha ido creciendo con el tiempo), donde Jorge es todo un referente.

Rafael García Molina

Dpto. de Física, Centro de Investigación en Óptica y Nanofísica, Universidad de Murcia



**El país de los sueños perdidos.
Historia de la ciencia en España**
José Manuel Sánchez Ron
Editorial Taurus, 2020, 1.152 págs.

¿Qué ha hecho España por Europa?

En el prólogo de *El país de los sueños perdidos*, José Manuel Sánchez Ron recuerda las ácidas palabras que Nicolas Masson de Morvilliers dedicó a España en su entrada de la *Encyclopédie*, y aunque asegura no querer terciar en la polémica, su monumental obra sobre la historia de la ciencia en nuestro país está impregnada de la melancolía que sugiere su título. En contraste con los que, desde Menéndez Pelayo, reivindican la contribución intelectual de España, Sánchez Ron ofrece un relato cuya dimensión torrencial no oculta las sombras, las decepciones y los fracasos. A diferencia de José Luis Abellán, que hace cuatro décadas ofreció en tres grandes volúmenes una *Historia crítica del pensamiento español* con la esperanza de demostrar lo que el país había aportado en el terreno filosófico, el medio millón de palabras de esta obra elude la complacencia para cartografiar un territorio árido, donde los oasis de fertilidad inesperada son a menudo efímeros.

Desde Isidoro de Sevilla —cuyas *Etimologías* se documentan mediante numerosas y extensas citas, como sucede

en el resto de la obra para hacernos llegar intactas esas voces del pasado— y hasta la muerte de Franco, porque la ciencia en la España democrática se trata en la forma somera que exige la ausencia de perspectiva, Sánchez Ron documenta su historia transitando de los prismáticos a la lupa: los hechos más lejanos se describen con sus rasgos esenciales, componiendo un paisaje de figuras contempladas a distancia desde las lentes del binocular, mientras los acontecimientos más próximos se relatan con extraordinario detalle, acercándolos al lector con el vidrio de aumento del autor. El resultado es un *zoom* vertiginoso que nos traslada desde las grandes panorámicas medievales hasta las figuras contemporáneas en primeros planos que parecen salirse de la pantalla, y terminada la lectura se puede mirar atrás un poco a la manera de los dibujos de Steinberg que representan a Estados Unidos con una gran imagen de Manhattan que se prolonga con espacios apenas ocupados hasta la costa oeste y el Pacífico más allá, diminuto en la lejanía gráfica y geográfica.

Para dar una idea del ritmo cronológico del relato, baste decir que apenas transcurrido un tercio del mismo aparece en escena la Institución Libre de Enseñanza, de manera que los dos tercios restantes se dedican a un siglo de la vida española, el que media entre 1875 y 1975. Esta atención minuciosa a lo más próximo no excluye la reconstrucción atenta de episodios fascinantes, como el papel de Alfonso X en la producción de textos, el saber astronómico en el que el autor llama “el país de las tres culturas” —musulmana, judía y cristiana— o la fundación por el arquitecto Juan de Herrera de la Academia Real Mathematica en el Madrid de Felipe II, que se prolongaría en el siglo xvii a través del Colegio Imperial de la Compañía de Jesús. La ciencia de la Ilustración se documenta sin adhe-

rirse a la tesis de la excepcionalidad española, pero también sin ocultar las limitaciones impuestas por la religión y la censura eclesiástica, y en el estupendo capítulo dedicado a América adquieren un relieve singular las expediciones científicas, muchas de ellas botánicas, aunque sin excluir una que hoy nos parece especialmente relevante, la Real Expedición Filantrópica de la Vacuna, que llevó la de la viruela a los dominios españoles en América y a Filipinas, bajo el liderazgo del médico Francisco Javier Balmis y con la participación esencial de la enfermera Isabel de Zendal.

Autor de sendas biografías del matemático y dramaturgo José Echegaray y del sin duda más relevante científico español, Santiago Ramón y Cajal, Sánchez Ron trata con afecto y erudición el papel de ambas figuras, a las que une otras como el físico Blas Cabrera, el químico Enrique Moles, el matemático Julio Rey Pastor o el ingeniero Leonardo Torres Quevedo, nombres fundamentales del primer tercio del siglo xx español, una etapa donde la historia de la ciencia se enreda inextricablemente con la historia social y la historia política, conformando una historia de la política científica donde la Junta para Ampliación de Estudios y, tras la guerra civil, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas son los inevitables protagonistas institucionales. Es imposible resumir en una breve reseña los logros de esta ambiciosa aventura intelectual, que si no olvida las frecuentes frustraciones de quienes soñaron con hacer avanzar la ciencia en nuestro país, tampoco renuncia a estimular en las jóvenes generaciones la curiosidad, la pasión y el rigor científicos sin los cuales España poco puede hacer por Europa y por sí misma.

Luis Fernández-Galiano
Arquitecto, catedrático de la UPM y
académico de Bellas Artes



Visión a todas las distancias
Pablo Artal
West Indies, 2020, 288 págs.

Todos los mediocres se parecen, pero los excelentes, lo son cada uno a su manera.

Premio Jaime I de Nuevas Tecnologías, premio Nacional de Investigación y uno de los más reconocidos expertos a nivel internacional en la óptica del ojo humano, Pablo Artal es, sin duda, un científico excelente.

Pero también lo es a su manera, que incluye no limitarse a su actividad investigadora y académica. Entre ellas, Pablo lleva años escribiendo artículos quincenales para el diario *La Verdad de Murcia*, que ahora recoge en un volumen, publicado por la editorial West Indies.

El título de este libro es “Visión a todas las distancias”, y no puede ser más justo. Pablo Artal es tan capaz de mirar por un telescopio para ver, como Galileo, que la luna no es un perfecto globo de cristal, como examinar al microscopio el alma humana, encontrando esa extraña mezcla de miserias y grandeza que nos caracteriza. Los textos que lo componen son machadianos hasta la médula. Al igual que a Don Antonio, a Pablo Artal le duele España. Y como el divino bardo lo manifiesta con claridad y agudeza, pero sin estridencias.

Si encontramos amargura en sus párrafos —y no falta— también hay en ellos esperanza a raudales. Si nos transmite la rabia e impotencia que provocan en él los demonios patrios —la envidia, la ignorancia, el atraso endémico de este viejo país ineficiente— también es capaz de hacernos sentir el orgullo de ser españoles, un orgullo que no está en contradicción, como tantos quieren, con ser gallegos, murcianos, andaluces, vascos o catalanes, ni mucho menos con el de ser europeos.

Si el fondo y el tono son machadianos, también lo es el lenguaje que emplea en sus artículos. Quien le conozca poco puede pensar que el catedrático Artal es un hombre seco. Quien le lea, por el contrario, le tomará —como aquellos que le conocemos mejor— por un buen amigo. Sus textos suelen incluir siempre la frase, “queridos lectores”, y a ellos se refiere y con ellos dialoga, como un buen tertuliano —de las tertulias ilustradas de otros tiempos— ofreciendo su opinión, sin ambages ni tapujos, pero también sin predicar desde el púlpito. Visión a todas las distancias, capaz de componer un paisaje muy necesario para comprender un poco más nuestra vieja piel de toro.

Los telescopios de Artal se enfocan, a menudo, en dos grandes temas. El de la Universidad, que conoce bien, tras décadas ocupando la cátedra de óptica en la Universidad de Murcia, y el de la Ciencia, que domina, como líder que es de nuestro gremio. Habla, pues, de lo que entiende —una costumbre de la que bien podrían tomar nota los charlatanes que tanto proliferan últimamente—. La Universidad española es, por una parte, la esperanza de este país —sin educación no hay futuro—, y, por otra, un cementerio, difícil de modernizar, al no poder contar con la ayuda de los inquilinos. Pablo la examina desde todos los ángulos. Analiza aspectos que nos trapan, como el modelo de gobernanza que convierte a los

rectores en rehenes de sus votantes o la infasta endogamia que lastra desde hace décadas el progreso de nuestros departamentos. Se pone en la piel del profesor y en la de los alumnos, ofreciendo una crítica constructiva —pero sin maquillaje— de las oportunidades y dificultades que involucran enseñar y aprender en nuestro país. En cuanto a la Ciencia, que en estos tiempos de pandemia volvemos a escribir con mayúsculas, pero hasta hace poco era tan invisible para los españoles como Cenicienta de paisano, Artal nos presenta un caleidoscopio que retrata su vocación y también su compromiso.

Pero estos dos grandes temas no agotan, ni mucho menos, el repertorio del autor. Muchos de sus artículos ofrecen, simplemente, el punto de vista de un ciudadano culto, reflexivo y que se resiste a encuadrar su pensamiento en clichés ideológicos. Observar la realidad es una de las habilidades esenciales para un científico, y mucho más para un experto en el ojo humano, como es su caso. Y ese ojo, atento, certero y sin las cataratas de los intereses creados que tanto afligen a otros, refleja, con precisión milimétrica, la realidad que nos ha tocado vivir, con las contradicciones que tan bien reflejaba el inmortal Charles Dickens: “Era el mejor de los tiempos, era el peor de los tiempos, era la edad de la sabiduría, era la edad de la estupidez, era la época de la fe, era la época de la incredulidad, era la estación de la luz, era la estación de la oscuridad, era la primavera de la esperanza, era el invierno de la desesperación”. En última instancia, la lectura de *Visión a todas las distancias* nos transmite la noción de que es posible salir del invierno interminable en el que vivimos gracias a la ciencia y a la razón.

Juan Jose Gómez-Cadenas
IKERBASQUE professor of physics
Donostia International Physics
Center (DIPC)

FE DE ERRATAS

El artículo “La Antimateria” de Beatriz Gato en el vol. 34, n.º 3 (2020) de la REF, versión impresa, contiene algunas erratas (en particular, el pie de la Fig. 1 se omitió poniéndose el de la Fig. 2 en su lugar). Todas ellas están subsanadas en la versión online: <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/2606>

La Junta de Gobierno (JdeG) de la RSEF de la versión impresa del vol. 34, n.º 4 (2020) es antigua. La JdG actual, ya corregida en su versión online, <http://revistadefisica.es/index.php/ref/article/view/2702>, es la que aparece al final de este número.

In memoriam

Martinus J. G. Veltman (1931-2021)

Con gran pesar nos enteramos de la muerte, el pasado 4 de enero, del físico teórico de partículas Prof. Martinus Justinus Godefriedus Veltman, premio Nobel de Física en 1999. El comité Nobel le concedió el galardón, conjuntamente con su antiguo discípulo Gerardus 't Hooft, "por elucidar la estructura cuántica de las interacciones electrodébiles". Forma parte del grupo de físicos teóricos que contribuyeron de manera fundamental al establecimiento del Modelo Estándar, la piedra roseta de la Física de Partículas. En lo que sigue haré una breve descripción de su biografía científica con especial referencia a su relación con la Física española, por medio de la cual tuve la oportunidad y el privilegio de tratarle y conocerle a nivel personal. Por ello, sin merma de respeto y sabiendo que a él no le importaría, me referiré al Prof. Veltman como "Tini", nombre con el que nos dirigíamos a él los que le conocíamos.

Su carrera científica se había iniciado en la Universidad de Utrecht, donde presentó su tesis doctoral en 1963 bajo la dirección de Léon Van Hove, director en aquel momento de la división de Física Teórica del Centro Europeo de Física de Partículas (CERN). Por ello pasó parte de su periodo doctoral en el CERN, donde conoció a Sam Berman, quien le sugirió lo que habría de ser una parte de su tesis y que influiría enormemente en su carrera posterior. Después de realizar estancias postdoctorales en el acelerador lineal de Stanford, el propio CERN y el laboratorio norteamericano de Brookhaven, retornó a Utrecht en 1966 para ocupar la cátedra que había dejado vacante su director de tesis. Allí dedicó una parte de su actividad a formar a un conjunto de estudiantes, creando *de facto* un grupo de física teórica de partículas en dicha universidad. Esos años fueron los más importantes de su carrera científica, y en ellos se desarrollaron los trabajos que posteriormente le harían acreedor del premio Nobel. Entre otros estudiantes brillantes, tuvo la fortuna de tener a Gerardus 't Hooft, quien ha acabado convirtiéndose en el que para mí es el físico teórico más importante e imagi-



nativo del último tercio del siglo xx. En 1981, Tini aceptó la cátedra MacArthur en la Universidad de Michigan, en Ann Arbor, EE. UU., puesto que desempeñó hasta su jubilación.

En los años ochenta Tini visitó el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Entre sus motivaciones se encontraba la posibilidad de buscar un lugar para un futuro y lejano retiro en la costa española. El fundador del Departamento, el Prof. Francisco José Ynduráin, al que también me referiré por su apelativo, "Paco", le convenció de que era más interesante instalarse en Madrid y seguir discutiendo y haciendo Física con nosotros. Paco hizo grandes esfuerzos para que esa posibilidad fuese factible y, gracias a la receptividad del Ministerio de Educación y Ciencia de entonces, se le concedió un puesto de profesor extraordinario del llamado programa PROPIO, asociado a nuestra Universidad. Para entonces, Tini estaba muy contento con sus visitas y compatibilizó el puesto con su cátedra en la Universidad de Michigan, viniendo a visitarnos aproximadamente dos meses cada año. En ese periodo participó en nuestras actividades académicas con cursos específicos y también estableció una colaboración científica y una relación de amistad con Paco.

Yo fui personalmente testigo directo del proceso desde la primera visita y tuve ocasión de conversar con él de temas que iban desde lo científico a lo humano. Esas conversaciones podían

ser de todo menos aburridas. Tini tenía un carácter fuerte y sus opiniones sobre la Física y sus colegas no abrigaban medias tintas. Claro está que en ocasiones Paco elevaba el listón, para deleite de Tini. Guardo numerosas anécdotas de sus visitas y de sus comentarios aderezados de humor algo cáustico. Sirvan de ejemplo sus descripciones del paisaje humano que por entonces poblaba las inmediaciones de la Residencia de Estudiantes del CSIC, donde se hospedaba con frecuencia.

En sus notas autobiográficas, escritas al hilo del Nobel, Tini se refiere a este periodo con mucho agrado. En ese sentimiento sin duda influyó el disfrute de los placeres de la buena mesa que España ofrece y que compartí con él en numerosas ocasiones. Era un fuerte contraste con sus descripciones de su dieta en época infantil. Pero sobre todo creo que su personalidad apasionada y emotiva se sentía a sus anchas en ese ambiente distendido e informal. Algun compatriota suyo me ha comentado que esos rasgos son más propios de la zona sur y católica de los Países Bajos, donde nació Tini, que de la Holanda del Norte de donde proviene su discípulo 't Hooft. En cualquier caso, su corpulencia, mirada penetrante, la rotundidad de sus afirmaciones y su enorme franqueza estaba lejos de suscitar indiferencia.

Esa misma rotundidad y apasionamiento trasladaba a sus opiniones científicas, no siempre ortodoxas. Pero presumiblemente esa actitud era también la responsable de su focalización



Francisco José Ynduráin (izqda.) y Martinus J. G. Veltman (dcha.).

temprana en las teorías de Yang-Mills con masa, que a la postre condujeron a él y a su estudiante 't Hooft a demostrar que es posible establecer un procedimiento sistemático para calcular las consecuencias experimentales de dichas teorías libre de inconsistencias.

Dichas inconsistencias adoptan la forma de valores infinitos y/o sin sentido físico (violaciones de causalidad y unitariedad). Ese procedimiento se denomina Regularización y Renormalización, y para formularlo es esencial preservar las propiedades de simetría (gauge) de las teorías de Yang-Mills. Esto es particularmente difícil para las teorías con masa, y en esa tarea es donde juega un papel esencial el famoso bosón de Higgs. El Modelo Estándar, que está basado en dichas teorías con y sin masa, recibió con ello el espaldarazo definitivo.

La lectura de su libro de divulgación *Facts and Mysteries in Elementary Particle Physics* permite al lector acceder, de su propia voz, a la descripción de su visión de la Física de Partículas, de su trayectoria científica y al papel de su contribución. El estilo ameno también deja entrever su sentido del humor al que me referí anteriormente.

Uno de los temas en los que Tini fue pionero es en comprender que los cálculos analíticos de la Física de Partículas iban a necesitar del uso de ordenadores. En ello pudo influir su juvenil afición a la electrónica. Ya en 1963 desarrolló el primer programa de manipulación simbólica/algebraica, que

bautizó con el nombre de Schoonschip, y que fue precursor y modelo de los actuales Macsimma, Mathematica, Maple, Matlab, etc. En sus viajes a Madrid le acompañaba su peculiar ordenador con carcasa transparente, a prueba de aduanas, en el que alojaba Schoonschip en unos chips ROM escritos en lenguaje máquina. Décadas más tarde, algunos de los más difíciles cálculos de física de partículas se han podido realizar gracias a FORM, una versión portable (en un sentido menos literal), escrita por Jos Vermaseren, otro científico holandés que visita anualmente nuestro departamento de la UAM.

La vinculación de Tini a nuestra universidad se prolongó desde 1988 hasta 1996, cuando, al cumplir 65 años, se jubiló de ese puesto. Los esfuerzos de Paco por asegurarle un puesto de profesor emérito no funcionaron, con la desagradable consecuencia de que tres años más tarde, cuando le dieron el premio Nobel, su relación formal con la UAM había cesado. No obstante, Tini quiso acudir a celebrar su premio con nosotros en un evento científico con participación de algunos de sus amigos, como Nicola Cabibbo o Cecilia Jarlskog.

Tini también acudió al cursillo-fiesta para celebrar el 60 cumpleaños de Paco. Pese al fallecimiento temprano de éste en el 2008, Tini siguió manteniendo su relación y apoyo a nuestro departamento y al entonces recientemente creado Instituto de Física Teórica UAM/CSIC (IFT). Participó como conferenciante

(también lo hizo 't Hooft) en la serie de coloquios, que con el nombre "Paco Ynduráin" instauró el Departamento de Física Teórica de la UAM en memoria de su fundador. Su última visita fue para participar en el congreso que se organizó con ocasión de la inauguración del nuevo edificio del IFT.

En la fecha de ese evento (diciembre de 2011) ya había indicios no concluyentes del descubrimiento del bosón de Higgs y tuvimos la suerte de escuchar a grandes científicos como Veltman adelantando sus puntos de vista, entre ellos a otros dos de los padres del Modelo Estándar y premios Nobel de Física, David Gross y Sheldon (Shelley) Glashow. Shelley y Tini se habían conocido de estudiantes graduados y éste siempre le profesó gran afecto y respeto. Fue precisamente al término del congreso cuando pude charlar con él por última vez, durante una cena en el Café de Oriente, con nuestras respectivas esposas, Anneke y Marta, condimentada con sus graciosas descripciones de algunos eventos en "Oriente" a los que por su condición de premio Nobel había sido invitado. Desgraciadamente el deterioro de su salud y movilidad le impidió acudir a la invitación que le cursamos con ocasión de su nombramiento como profesor distinguido del IFT.

Los indicios se confirmaron, y ese mismo verano del 2012 se anunció que se había descubierto la partícula de Higgs. Con ello todas las piezas del Modelo Estándar, que a nivel teórico se habían predicho cerca de 40 años antes, se habían descubierto. Ha sido un recorrido sembrado de éxito, fruto de la inventiva de muchos físicos teóricos, experimentales y de aceleradores, y sólo posible gracias a la colaboración internacional. El Modelo Estándar aún deja muchas preguntas sin responder, algunas de las cuales, como la energía del vacío, siempre perturbaron a Veltman. Pero se trata sin ninguna duda de un gran hito de la humanidad y un legado que perdurará mucho más allá de la existencia de sus principales protagonistas. Espero que estas líneas hayan acercado al lector al conocimiento en su dimensión científica y humana de uno de ellos: Tini Veltman.

Antonio González-Arroyo
Dpto. de Física Teórica, UAM
Instituto de Física Teórica UAM/CSIC

Jack Steinberger (1921-2020)

El pasado día 12 de diciembre fallecía en su casa de Ginebra el físico Jack Steinberger a los 99 años de edad. Además de los múltiples reconocimientos que recibió a lo largo de su carrera, entre ellos el Premio Nobel de Física en 1988, en 1992 también fue investido doctor Honoris Causa por la Universidad Autónoma de Barcelona y nombrado Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, por su estrecha relación con la ciudad.

Steinberger había nacido en Bad Kissingen, Alemania, donde su padre era cantor de la sinagoga local. Pero al llegar los nazis al poder a comienzos de 1933 las amenazas a los judíos se hicieron cada vez más violentas. Dado el cariz de los acontecimientos sus padres lograron que una asociación alemano-norteamericana encontrara familias de acogida para sus dos hijos mayores, de 13 y 15 años en la región de Chicago a donde llegaron a comienzos de 1935. Sus padres también lograron emigrar tres años después, antes del estallido de la II Guerra Mundial. La familia, reunida de nuevo, se instaló en Chicago, donde abrieron una pequeña tienda de comestibles.

Steinberger empezó estudiando Ingeniería Química en el Armour (en la actualidad Illinois) Institute of Technology, con ayuda de una beca. Pero en plena depresión y sin ayuda económica tuvo que compaginar trabajo en una empresa con estudios vespertinos en la Universidad de Chicago, donde se licenció en Química en 1942. Mientras esperaba a ser movilizado, en plena guerra, hizo un curso acelerado de electricidad, magnetismo y ondas de radio, con lo que no sólo descubrió la física, sino que fue alistado con destino al Laboratorio de Radiación del MIT, donde trabajó en las aplicaciones militares del radar. Al final de la guerra volvió a Chicago con la intención de hacer un doctorado en Física Teórica.

Uno de los profesores en Chicago era Enrico Fermi, quien le admitió en su grupo y le sugirió estudiar un problema que parecía existir en la desintegración del muón. Hoy sabemos que un muón se desintegra en un electrón y dos neu-



trinos. Pero hasta entonces se daba por hecho que el muón se desintegra en un electrón más otra partícula que, al no observarse, era presumiblemente un neutrino. En muchos casos el muón llega a pararse antes de desintegrarse, con lo que la señal del electrón ocurre unos microsegundos después, lo que la identifica. El problema estaba en que el número de electrones producidos parecía ser menor de lo esperado, dado el número de muones que llegan al reposo. Fermi sugirió medir la energía de los electrones, que hasta entonces se suponía era la mitad de la masa del muón, tal como se espera de una partícula en reposo que se desintegra en otras dos.

El experimento, realizado enteramente por él, se llevó a cabo en Chicago y en Mount Evans, Colorado, a más de 4.000 metros de altura, donde el flujo de muones es mayor que al nivel del mar. La energía del electrón resultó no ser fija, con un espectro continuo desde cero hasta aproximadamente la mitad de la masa del muón. El experimento dejó muy claro que el muón se desintegra en más de dos partículas. Más importante aún, algunos enseguida vieron un paralelismo entre este proceso y la desintegración beta nuclear. La teoría de dicha desintegración beta, formulada por Fermi en 1934, podía modificarse fácilmente para explicar las propiedades de la desintegración del muón. De ahí que a partir de entonces se hablase de la Interacción Universal de Fermi, un paso fundamental hacia

el futuro Modelo Estándar de la física de partículas.

Una vez doctorado en 1948, y a pesar de la tesis experimental, su objetivo seguía siendo abrirse camino en física teórica. Durante el curso 1948-1949 obtuvo un puesto de Invitado en el Instituto de Estudios Avanzado en Princeton, donde logró publicar un trabajo de gran interés relativo a la desintegración del pión neutro, que no podemos cubrir aquí por falta de espacio. Después de ese año decidió orientarse hacia la física experimental, y obtuvo un puesto en el Berkeley Radiation Laboratory, donde solamente estuvo un año, para unirse después a la Universidad de Columbia en Nueva York en 1950. Fue allí, en 1962, donde él y otros colaboradores realizaron el experimento por el cual recibiría en 1988 el Premio Nobel de Física (compartido con L. M. Lederman y M. Schwartz).

El experimento tiene que ver de nuevo con neutrinos. Por varios motivos, a finales de los cincuenta empezó a sospecharse que podrían existir neutrinos de más de una clase. Otra fuente de neutrinos son los piones cargados que a veces se desintegran en un electrón y un neutrino y, de manera mucho más probable, en un muón y un neutrino. ¿Se trata del mismo neutrino en ambos casos?

La idea de cómo distinguirlos sería hacer que los neutrinos interaccionaran de nuevo y ver qué se producía en la interacción. Esta idea se le ocurrió a

Bruno Pontecorvo (a quien Steinberger se refiere como “uno de los colegas más interesantes y creativos que he conocido”), y el cómo implementarla a Melvin Schwartz, quien había sido estudiante de Steinberger en Columbia. La idea de Schwartz era producir un haz de neutrinos a partir de la desintegración de piones producidos en un acelerador. El experimento se llevó a cabo en el Brookhaven National Laboratory, no lejos de Nueva York, y el resultado fue que los neutrinos producidos junto a los muones en la desintegración de los piones al interaccionar producen de nuevo muones, pero no electrones. La conclusión final: existen dos clases de neutrinos, una asociada al electrón y otra al muón. De nuevo, otro paso fundamental hacia el Modelo Estándar.

En 1968 le ofrecieron un puesto en el CERN, donde obtuvo resultados fundamentales en violación de la simetría CP, en neutrinos y en colisiones entre electrones y positrones, y donde continuó investigando hasta fechas recientes.

Steinberger ha escrito una autobiografía cuyo título es *Learning about Particles (50 Privileged Years)*. En ella describe su trabajo científico y algunas de sus vivencias, antes y después de su emigración forzosa. Una palabra importante en este título es “privileged”. Por un lado, al leer los nombres de sus colegas a lo largo de tan larga carrera, el privilegio es muy claro. Por otro lado, también ilustra un tema del que solía hablar, en concreto el papel de la suerte, o de la falta de ella, en la vida. El cómo pequeños hechos, aparentemente sin importancia, acaban siendo determinantes. También cuenta su regreso a

Bad Kissingen, poco después de recibir el Nobel y donde hoy en día los estudiantes de secundaria se forman en el Jack Steinberger Gymnasium.

Su relación profesional con Barcelona comenzó en 1984, cuando en la UAB se formó un grupo experimental de partículas, con motivo del reingreso de España al CERN. Este grupo optó por unirse a un experimento llamado ALEPH, del cual Steinberger era el director científico. ALEPH estaba en preparación para ser llevado a cabo en el acelerador LEP, entonces en construcción en el CERN. El proyecto ALEPH estaba ya muy definido y no resultaba fácil encontrar un papel relevante que jugar en el experimento para un grupo pequeño como el de la UAB. Steinberger siempre manifestó un gran interés por el proceso de integración del grupo en ALEPH. Cuando este comenzó a tomar datos en 1989, la integración era ya completa y muy de su agrado. Sus relaciones con el grupo de Barcelona fueron desde entonces muy estrechas. No deja de ser curioso que uno de los principales resultados de ALEPH (y de los otros tres experimentos similares que tuvieron lugar en LEP) fue que, bajo condiciones muy generales, existen solamente tres clases de neutrinos.

Las relaciones del grupo de Barcelona con Steinberger jugaron un papel muy relevante en la creación en Cataluña de dos instituciones científicas, el Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) y la fuente de luz Sincrotrón ALBA. Steinberger impresionó muy favorablemente al presidente Jordi Pujol durante la visita que éste hizo al CERN en 1991. Muy poco después de dicha vi-

sita el gobierno de la Generalitat creó el IFAE, en el que se integraron los grupos experimental y teórico de la UAB. El IFAE ha ido creciendo desde entonces y, desde el 2012, ha tenido la distinción de Centro Severo Ochoa, otorgada por el Gobierno a unos pocos centros en toda España.

Su influencia en la creación de ALBA es más indirecta y en buena parte también consecuencia de la mencionada visita al CERN, cuando empezó a gestarse un proyecto de construcción de un acelerador de partículas en España. El gobierno de la Generalitat apostó entonces por que esa infraestructura se ubicara en Cataluña. La evolución del proyecto se concretó en un acelerador de electrones de diseño y fabricación propios, que es la base de la fuente de luz de sincrotrón ALBA.

Jack Steinberger tenía una curiosidad insaciable de aprender cosas nuevas, sobre física o sobre cualquier otro tema. Su manera incisiva de atacar los problemas y reducirlos a lo esencial es poco menos que legendaria. Hablar con él era a la vez un placer y un suplicio, un placer por la claridad de su pensamiento, sin adornos, y un suplicio pues muy rápidamente llegaba justamente a la pregunta clave, precisamente a la que uno no sabía responder (y quizás él tampoco). Y si había respuesta la coletilla era inevitable: “Are you sure?”. Sin duda le echarán mucho de menos todos los que han tenido el privilegio de conocerle.

Enrique Fernández y Ramón Pascual
Profesores eméritos de la UAB
y miembros del IFAE



<https://congresos.adeituv.es/TAUP2021/>

Noticias

Olimpiada Iberoamericana de Física Virtual 2020

Debido a la situación mundial de pandemia, la XXV Olimpiada Iberoamericana de Física (Olbf), que estaba previsto que se realizara en Brasil en el mes de septiembre, tuvo que suspenderse. En su lugar, un Comité formado por dos representantes de dieciocho países iberoamericanos, en el que participó España, reunidos virtualmente el día 13 de septiembre de 2020, decidieron organizar un evento virtual: la Olbf Virtual 2020, que se desarrollaría en modalidad *online* en vivo del 5 al 13 de diciembre de 2020.

En esta asamblea se acordó también la formación de un Comité Organizador integrado por delegados de cinco países diferentes:

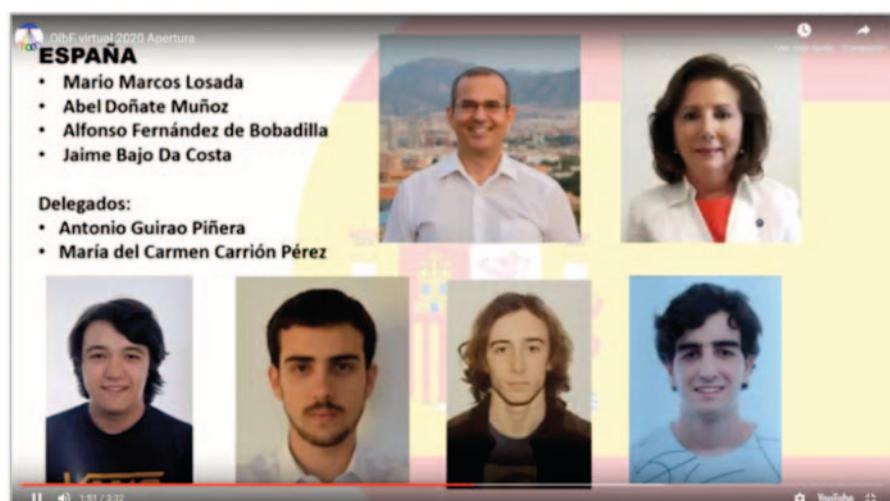
- Martín Monteiro (Uruguay) (Coordinador de la Organización),
 - Rolando Álvarez (Paraguay),
 - Rafael Espinosa (Ecuador),
 - Edwin Adverdi Pérez (El Salvador),
 - Ricardo Sauerwein (Brasil),
- junto con un Comité de Problemas integrado por delegados de otros cinco países:
- Martín Monteiro (Uruguay) (Coordinador del Comité),
 - Antonio Guirao (España),
 - Edwin Adverdi Pérez (El Salvador),
 - Rui Travasso (Portugal),
 - Fernando Vega (Colombia).

Además del nombramiento de estos dos comités, en la citada reunión virtual del 13 de septiembre se aprobó asimismo el reglamento que ha permitido el desarrollo de esta Olimpiada. Información más detallada de la Olbf virtual 2020 se puede encontrar en: <https://oibf2020.blogspot.com/>.

En la Olbf Virtual 2020 han participado sesenta y tres estudiantes y treinta y cuatro delegados de dieciocho países iberoamericanos: Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, España, Guatemala, Honduras, México, Paraguay, Perú, Portugal, Puerto Rico, República Dominicana y Uruguay.

La representación española estuvo constituida por los siguientes estudiantes:

- Jaime Bajo Da Costa, del IES Fray Diego Tadeo (Salamanca).



Dos capturas de pantalla del acto inaugural de la Olimpiada Iberoamericana de Física Virtual 2020. En la imagen inferior el equipo español, de izquierda a derecha: A. Guirao, M. C. Carrión, M. Marcos, A. Doñate, A. Fernández y J. Bajo.

- Alfonso Fernández de Bobadilla Hernández, del IES San Mateo (Madrid).
- Abel Doñate Muñoz, del IES Monastil (Alicante).
- Mario Marcos Losada, del Colegio Safa-Grial (Valladolid).

Como profesores Delegados del equipo español han participado Antonio Guirao y M.ª del Carmen Carrión, de los Departamentos de Física y de Física Aplicada de las universidades de Murcia y Granada, respectivamente.

Los estudiantes españoles han obtenido unos magníficos resultados: Jaime Bajo Da Costa segunda medalla de oro y premio especial a la Mejor Resolución del Problema 4, Alfonso Fernández de Bobadilla primera medalla de plata y Abel Doñate Muñoz medalla de pla-

ta. En esta ocasión el ganador absoluto y primer medallista de oro resultó ser un estudiante brasileño. Por ello queremos aprovechar esta reseña para manifestarles nuestra más sincera felicitación.

Todos los actos y reuniones del Jurado Internacional se realizaron a través de la plataforma Microsoft Teams, y la entrega de las respuestas a los problemas por parte de los estudiantes se realizó mediante la plataforma Pandorga, que permitió la corrección anónima de las pruebas.

La ceremonia de inauguración tuvo lugar el día sábado 5 de diciembre mediante un acto grabado que está disponible en el siguiente enlace: <https://oibf2020.blogspot.com/p/dele>

gaciones.html. Intervinieron en el acto Martín Monteiro, Coordinador de la Organización, Edwin Adverdi Pérez, miembro del Comité Organizador y finalmente el D. Carlito Lariucci, Presidente del Secretariado Permanente de la Olbf.

El mismo sábado se constituyó el Jurado Internacional, compuesto por los 34 delegados de los países participantes, y se procedió a la discusión y revisión de las pruebas, cuya versión final no fue aprobada hasta bien entrada la madrugada (hora española). Los estudiantes realizaron las pruebas el domingo día 6 de diciembre divididos en salas de vigilancia. Cada sala estaba ocupada por seis estudiantes y vigilada por tres profesores. Cada estudiante estaba obligado a tener encendida su cámara y micrófono para facilitar la vigilancia. Como se ha indicado anteriormente, los estudiantes entregaron sus pruebas escaneadas en formato pdf mediante la plataforma Pandorga, que garantiza su corrección anónima. Desde el lunes 7 de diciembre hasta el viernes 11 los delegados divididos en equipos realizaron el proceso de corrección.

El primer problema, titulado "Un modelo de catapulta", involucraba conceptos de mecánica del sólido rígido, tales como su momento de inercia, así como el cálculo de la velocidad y alcance del proyectil. El segundo problema, titulado "Gotas eléctricas", estuvo ligado a conceptos de electrostática y ruptura dieléctrica. El tercer problema llevaba por título "El brillo de las estrellas: fotometría fotoeléctrica". Se trata de un problema muy interesante que, considerando el montaje básico del astrónomo Joel Stebbins, con la colaboración del físico Jakob Kunz, pioneros en utilizar células fotoeléctricas en los detectores de los telescopios, aborda el estudio de las estrellas de brillo variable. El cuarto problema llevó por título "Dinámica de microtúbulos". Los microtúbulos son filamentos que dan rigidez a las células del cuerpo humano, y en este problema se implementa una versión simplificada de la dinámica de los microtúbulos para describir el trabajo que realizan en una membrana. El quinto y último problema titulado "Descarga de una botella" fue un problema de tratamiento de datos, el más ligado a una prueba de tipo experimental, que permitía estudiar



*En memoria de
José Tornos Gimeno
(1956 – 2020)
PEPE*

05 - 13 DE DICIEMBRE DE 2020

Captura de pantalla de la presentación homenaje a Pepe Tornos en el acto de clausura

la descarga de una botella cilíndrica, a través de un tubo horizontal. Los estudiantes debían diseñar un procedimiento que les permitiera realizar múltiples medidas de la magnitud que se estaba buscando a partir del ajuste de una gráfica. Para ello disponían de un vídeo del experimento a través de YouTube que les permitía realizar las medidas.

Estos problemas, una vez adaptados por el jurado, permitieron establecer una correcta gradación entre los participantes. Estas pruebas, junto con otros datos de la Olimpiada, pueden encontrarse en la dirección: <https://olbf2020.blogspot.com/>.

De acuerdo con el Reglamento de la Olbf virtual 2020, cada uno de los ejercicios fue corregido de forma anónima por dos equipos independientes, constituidos por delegados de países diferentes, siguiendo los criterios generales de puntuación previamente establecidos por el jurado internacional. Este procedimiento asegura la homogeneidad en la calificación. La corrección se realizó mediante sesiones virtuales de los miembros de cada uno de los equipos. Finalmente se procedió a realizar una sesión conjunta de ambos equipos, que discutieron cada una de las calificaciones y llegaron a una puntuación de consenso.

En la Asamblea General de delegados se aprobó la lista de premiados y se confirmó la candidatura de Brasil y Guatemala como sedes de las olimpiadas siguientes.

Los nombres de los premiados se hicieron públicos en la ceremonia de clausura celebrada el domingo 13 de

diciembre (<https://olbf2020.blogspot.com/p/medallero.html>). En ella es de destacar el homenaje realizado a nuestro compañero José Tornos Gimeno, recientemente fallecido y delegado de España en la Olbf desde sus comienzos. Los delegados de todos los países participantes reconocieron su destacada dedicación a la Olbf, su participación en la elaboración del reglamento, su implicación en la prueba experimental y su definición de la Olimpiada como "La fiesta de la Física". Especialmente emotiva fue la intervención de su esposa y compañera, Leonor de Miguel, licenciada en Física, que muy emocionada agradeció a los organizadores el homenaje realizado (<https://www.youtube.com/watch?v=JSCEZpUSfh0>). El acto de clausura finalizó con unas palabras de despedida del Presidente del Secretariado Permanente, D. Carlito Lariucci.

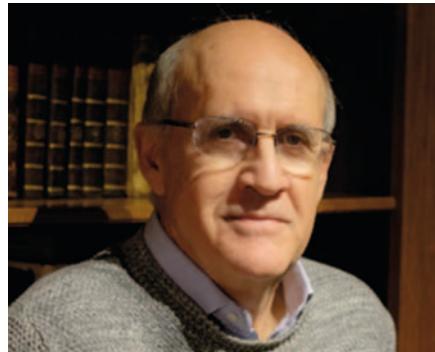
Por último, queremos reiterar nuestra felicitación a todos los estudiantes que han participado en esta Olbf Virtual 2020 y en particular a los estudiantes españoles. Asimismo, hemos de manifestar nuestro agradecimiento a todos los compañeros que han formado parte del Comité Organizador y del Comité Académico de Problemas, y muy especialmente al Profesor Martín Monteiro, Coordinador del Comité Organizador, por su esfuerzo, interés y eficacia en llevar a buen término esta Olimpiada.

M.ª Carmen Carrión,
y Antonio Guiaro
*Delegados de España en la Olbf
Virtual 2020*

Luis Ibáñez, Premio Nacional de Investigación “Blas Cabrera”

Luis Ibáñez Santiago, catedrático de Física Teórica de la UAM y miembro de la RSEF, ha sido galardonado con el Premio Nacional de Investigación “Blas Cabrera” 2020 en el área de ciencias Físicas, de los Materiales y de la Tierra. El Premio se le ha concedido en reconocimiento “por su labor en el ámbito de las teorías de la supersimetría, teoría de las cuerdas y de la supergravedad para la concepción actual de la Física de Partículas”.

El Prof. Ibáñez estudió la licenciatura de Física en la UCM y realizó su tesis doctoral en la UAM. De 1979 a 1981 fue postdoc en la Universidad de Oxford. En 1984 pasó a trabajar al CERN en Ginebra, donde fue “staff member” hasta 1992. Desde ese año es catedrático en el Departamento de Física Teórica de la UAM. En 2003 fue uno de los miembros fundadores del Instituto de Física Teórica UAM-CSIC, del que es su director desde 2018.



Su trabajo de investigación se ha centrado en el área de la Física Teórica de Partículas Elementales y, en particular, en el estudio de nuevas teorías más allá del Modelo Estándar. Esto incluye extensiones del Modelo Estándar con la propiedad de “supersimetría”, a cuya construcción contribuyó sustancialmente entre 1981 y 1985. La mayoría del trabajo del Prof. Ibáñez se ha desarrollado en el contexto de la Teoría de Cuerdas, la candidata más firme a una teoría unificada de todas

las interacciones, incluyendo también la gravitación cuántica. Luis Ibáñez jugó un papel importante en el descubrimiento en 1990 de la llamada “Dualidad S”, concepto fundamental dentro de la Teoría de Cuerdas. Ha publicado unas 150 publicaciones científicas y el libro “String Theory and Particle Physics”, en Cambridge U.P. Es editor de Journal of High Energy Physics. Tanto el libro como la revista son referencias en el campo.

Luis Ibáñez ha recibido varios galardones como el “Premio de Investigación Rey Juan Carlos I” (1985), “Premio Iberdrola Ciencia y Tecnología” (1995), “Premio Miguel Catalán a la carrera científica” de la CAM (2017). En 2012 recibió también una “Advanced Grant” del European Research Council. Ha pertenecido a diversos comités científicos internacionales como el External Advisory Committee de la CERN’s Theory Division, European Physical Society HEP Board, European Committee for Future Accelerators (ECFA), etc.

Laura Lechuga, Premio Nacional de Investigación “Juan de la Cierva”

Laura Lechuga, profesora de investigación del CSIC y Jefe de grupo en el Instituto Catalán de Nanociencia y Nanotecnología (ICN2, Barcelona) del CSIC y miembro de la RSEF, ha sido galardonada con el Premio Nacional de Investigación “Juan de la Cierva” 2020 en el área de Transferencia de Tecnología, por su contribución innovadora a los métodos de diagnóstico a través de proyectos pioneros como el desarrollo de las plataformas tipo “lab-on-a-chip”.

La Prof.^a Lechuga realizó su Tesis Doctoral en el Centro Nacional de Microelectrónica (CNM) del CSIC y doctorándose en 1992 en la UCM. Ha sido profesora adjunta en la Universidad del Ártico de Noruega (2012-2016) y profesora visitante distinguida en la Universidad de Campinas (Brasil) (2013-2017). Su investigación se centra en el desarrollo de nuevos dispositivos nanobiosensores basados en principios nanoplasmónicos



y nanofotónica de silicio, incluida su biofuncionalización, microfluidica y la ingeniería óptica y electrónica necesaria para generar dispositivos de análisis portátiles para su uso descentralizado. Además el uso real de estos dispositivos nanobiosensores para una amplia gama de aplicaciones clínicas y ambientales complejas ha sido uno de sus objetivos primordiales.

Laura Lechuga es miembro del Consejo Asesor Científico de diversos centros de investigación de alto nivel en todo el mundo y ha formado parte de numerosos paneles de evaluación internacionales. También ha participado en proyectos financiados por la UE (algunos de ellos como coordinadora) y ha formado parte de numerosos paneles de evaluación de la UE (incluidos los paneles de ingeniería de la Advanced Grant de la ERC). Además, es co-fundadora de dos empresas spin-offs, coautora de ocho familias de patentes y autora de más de 365 presentaciones invitadas en todo el mundo.

La Prof.^a Lechuga es Fellow of the Optical Society y ha recibido numerosos premios y reconocimientos como el Premio de Física, Innovación y Tecnología de la RSEF/Fundación BBVA en 2016 y en 2020 también el Premio Ada Byron a la Mujer Tecnóloga y el Premio Rei Jaume I en su modalidad de Nuevas Tecnologías.

José Capmany, Premio Nacional de Investigación “Leonardo Torres Quevedo”

José Capmany, Catedrático de la Universitat Politècnica de València (UPV) y miembro de la RSEF, ha sido galardonado con el Premio Nacional de Investigación “Leonardo Torres Quevedo”, en el área de Ingenierías. El jurado le hace merecedor de esta distinción por “su contribución pionera al campo de la Ingeniería Fotónica y las Telecomunicaciones Ópticas, a través de una actividad científica de vanguardia con una importante repercusión internacional”. El jurado ha subrayado la ejemplaridad de la trayectoria profesional del candidato, su capacidad de liderazgo y la perseverancia en el desarrollo de la aplicación práctica de sus investigaciones.

Los Premios Nacionales de Investigación, creados en 1982, son concedidos por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y suponen el reconocimiento más importante de España en el ámbito de la investigación



científica. Su objetivo es distinguir el mérito de aquellos investigadores e investigadoras de nacionalidad española que estén realizando una labor destacada en campos científicos de relevancia internacional y que contribuyan excepcionalmente al avance de la ciencia, al mejor conocimiento del ser humano

y su convivencia, a la transferencia de tecnología y al progreso de la Humanidad.

José Capmany Francoy es Ingeniero de Telecomunicación y Doctor Ingeniero por la UPM, y Licenciado y Doctor en Ciencias Físicas. Dirige el Photonics Research Labs de la UPV, que fundó en el año 1991. Su campo de investigación es la fotónica integrada programable y la fotónica de microondas para comunicaciones. Su actividad investigadora fue reconocida en 2012 con el Premio Rey Jaime I en Nuevas Tecnologías. En 2016 obtuvo una Advanced Grant del Consejo Europeo de Investigación. Es Fellow de Institution of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y de la Optical Society of America (OSA). Ha cofundado las empresas spinoff VLC Photonics (recientemente adquirida por Hitachi), Ephoox e iPronics, Programable Photonics.

Nazario Martín León, Premio Nacional de Investigación “Enrique Moles”

Nazario Martín León, catedrático de Química Orgánica de la UCM, vicedirector del Instituto IMDEA-Nanociencia y miembro de la RSEF, ha sido reconocido con el Premio Nacional de Investigación “Enrique Moles” 2020 en el área de Ciencia y Tecnología Químicas, por su contribución científica en el área de los materiales moleculares y de nanoformas de carbono, y por las aplicaciones de estas investigaciones en el campo de la electrónica molecular.

El jurado ha resaltado la relevancia internacional del trabajo científico del candidato, su labor de mentor y de impulsor de nuevas generaciones de investigadores, su implicación en puestos de responsabilidad científica y de gestión de la investigación y, en definitiva, la aportación que toda esta actividad ha supuesto para el progreso de la Química en España.



Licenciado y Doctor en Ciencias Químicas por la UCM. Realizó una estancia postdoctoral en la Universidad alemana de Tubinga. Ha sido profesor visitante de distintas universidades, entre ellas la Universidad de California en Santa Bárbara y en Los Ángeles en Estados Unidos, y en las de Angers y Estrasburgo en Francia.

El Prof. Martín León es miembro de la Real Academia de Doctores y de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, así como Fellow de la Royal Society of Chemistry. Ha sido Presidente y Editor General de la RSEQ y Presidente de la COSCE. Ha recibido numerosos premios y reconocimientos, entre los que cabe destacar el “Premio Dupont de la Ciencia” en 2007, la “Medalla de Oro y Premio a la Investigación” de la RSEQ en 2012, año en el que también fue distinguido con el “EuCheMS Lecture Award”. En 2013 recibió el Premio Rei Jaume I en Investigación Básica, el premio de investigación Alexander von Humboldt y el premio de investigación Richard E. Smalley Research. Ha recibido también el premio Catalán-Sabatier de la Sociedad Química Francesa en 2014, y el premio Elhuyar-Goldsmith de la Sociedad Química Alemana (DGCh) en 2016.

José Cernicharo Quintanilla, Premio Miguel Catalán a la carrera científica

José Cernicharo, Investigador del Instituto de Física Fundamental (IFF-CSIC) y miembro de la RSEF, ha sido galardonado con el Premio “Miguel Catalán” 2020 a la carrera científica dentro de los premios de investigación de la Comunidad de Madrid, “por la calidad de sus investigaciones, su reconocido liderazgo a nivel nacional e internacional en el área de Astrofísica Molecular y por sus contribuciones e innovaciones tecnológicas”.

La Comunidad de Madrid convoca anualmente el Premio de Investigación “Miguel Catalán” a la carrera científica con el fin de reconocer la actividad científica y los valores científicos desarrollados por investigadores que a lo largo de su trayectoria profesional hayan estado de alguna forma vinculados a la Comunidad de Madrid.

José Cernicharo Quintanilla es profesor de investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en



el IFF-CSIC de Madrid. Es licenciado en Ciencias Físicas por la UCM (1979) y Docteur d’État ès Sciences por la Universidad Paris VII (1988). El Prof. Cernicharo es un astrofísico ampliamente reconocido por sus contribuciones en Astrofísica Molecular y por sus aportaciones científico-técnicas en el campo de la radioastronomía. A lo largo de su carrera ha abierto numerosas nuevas

líneas de investigación con un carácter muy interdisciplinar, destacando el descubrimiento de gran cantidad de especies moleculares en el espacio, su participación en la definición de instrumentación radioastronómica avanzada y su capacidad para integrar ciencia básica y tecnología astrofísica y de laboratorio.

Fue *Mission Scientist* del satélite Herschel de la ESA e investigador principal del Proyecto Consolider ASTRO-MOL. Actualmente es investigador principal del proyecto Nanocosmos del ERC. Ha publicado más de 500 artículos en revistas con revisión por pares, con más de 21.000 citas. Su labor científica ha sido reconocida por el Premio del Gobierno Francés «Betancourt-Perronet» (1997), el Premio a la Excelencia Científica Gabriel Alonso Herrera de los Premios de Investigación Científica e Innovación de Castilla-La Mancha (2008) y la Medalla de Física de la RSEF y la FBBVA (2018).

Isabel Guillamón, Premio Miguel Catalán a investigadores menores de 40 años

Isabel Guillamón Gómez, profesora del Departamento de Física de la Materia Condensada de la UAM y miembro de la RSEF, ha recibido el Premio de Investigación Miguel Catalán 2020 en la categoría de investigadores menores de 40 años y en la sección de Ciencias Básicas. Este premio en ciencias es un premio concedido por la Comunidad de Madrid, en honor a Miguel A. Catalán Sañudo, que, en su categoría junior, se concede como reconocimiento a una trayectoria de calidad científica desarrollada y con proyección de futuro.

Durante su carrera investigadora, la Dra. Guillamón se ha centrado en el estudio de la superconductividad en sistemas electrónicos fuertemente correlacionados. Ha realizado contribuciones en física de vórtices, superconductividad de alta temperatura, transiciones de fase cuánticas y física



de sistemas bidimensionales. Se doctoró en la Universidad Autónoma de Madrid en 2009 y realizó una estancia postdoctoral de 3 años en la Universidad de Bristol. Actualmente, es investigadora principal del proyecto ERC “Pnicteyes”, dentro del cual desarrolla experimentos de microscopía túnel en

superconductores no convencionales y otros sistemas electrónicos con correlaciones fuertes a temperaturas de unas decenas de mK y campos magnéticos de hasta 22T. Para ello, utiliza herramientas avanzadas, como son la microscopía de efecto túnel y las oscilaciones cuánticas, que requieren muy bajas temperaturas (mK) y altos campos magnéticos, y proporcionan información directa sobre propiedades electrónicas en la fase normal y superconductora. En el marco de este proyecto, la Dra. Guillamón ha diseñado y supervisado la construcción de un nuevo laboratorio optimizado para realizar medidas bajo campos magnéticos elevados en condiciones de bajo ruido mecánico. Este premio reconoce “su contribución científica en el campo de la Física de la Materia Condensada y la puesta en marcha de un laboratorio de microscopía con técnicas pioneras”.

Pablo Jarillo Herrero, Premio de la National Academy of Sciences al Descubrimiento Científico

Pablo Jarillo Herrero, profesor del Massachusetts Institute of Technology (MIT) y miembro de la RSEF, ha recibido el Premio de la National Academy of Sciences (NAS) al Descubrimiento Científico. Este Premio se concede cada dos años para reconocer un logro o descubrimiento en investigación básica, conseguido en los cinco años anteriores y que se espera que tenga un impacto significativo en áreas como la ciencia de los materiales o la física, entre otras. El candidato debe ser un científico de una universidad u otra institución de investigación de los Estados Unidos.

El Prof. Jarillo se licenció en la Universidad de Valencia en 1999 y desde entonces ha desarrollado una carrera investigadora internacional que comenzó con un máster en la Universidad de California en San Diego, el doctorado en la Universidad de Delft



y un postdoc en la Universidad de Columbia. En la actualidad ocupa la cátedra “Cecil and Ida Green Professor of Physics” en el MIT. Su investigación se centra en el área de la física experimental de la materia condensada,

en particular el transporte electrónico cuántico y la optoelectrónica de nuevos materiales bidimensiones, con especial énfasis en sus propiedades superconductoras, magnéticas, y topológicas. Su descubrimiento en 2018 del comportamiento aislante y superconductividad no convencional en bicapas de grafeno con un pequeño ángulo relativo ha originado un nuevo campo de investigación: el estudio de electrones fuertemente correlacionados en materiales bidimensionales. Jarillo Herrero ha recibido numerosos premios y reconocimientos, como el Premio Investigador Joven Experimental de la RSEF en 2006, el premio Wolf de Física, el Oliver E. Buckley Award en Física de la Materia Condensada de la American Physical Society, y en 2020 recibió la Medalla Lise Meitner de la Real Academia Sueca y la Medalla de Física de la RSEF y la Fundación BBVA.

Pascuala García Martínez, Fellow de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica

Pascuala García Martínez, Catedrática de Óptica de la Universitat de València (UV) y miembro de la RSEF, ha sido nombrada Fellow de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica (SPIE). Este nombramiento es una distinción para aquellos miembros de esta sociedad que hayan realizado contribuciones científicas y tecnológicas significativas en los campos de la óptica y la fotónica. En particular, el nombramiento de la Prof.^a García Martínez se debe a sus contribuciones a los sistemas ópticos de procesado de imágenes, óptica difractiva y polarización.

La Prof.^a García es licenciada en Física (1993) y doctora en Física (1998) por la UV. En la actualidad es vicedecana de Estudios y Ordenación Académica de la Facultat de Física de la UV. Ha realizado diversas estancias de



investigación en centros extranjeros como: Georgia Tech Lorraine, Metz (Francia), Faculty of Electrical Engineering, Tel-Aviv University (Israel) y Centre d'Optique, Photonique et Lasers, Université Laval, Québec (Ca-

nadá). Su trayectoria investigadora se centra en el campo de los moduladores espaciales de luz y sus aplicaciones a la difracción y a la polarización de la luz. Realiza su investigación en colaboración con el Grupo de Tecnologías Ópticas y Optoelectrónicas de la Universidad Miguel Hernández de Elche. En 2015 recibió la mención honorífica de Senior Member de la OSA (Optical Society of America). Dirige la Red de Innovación Docente Interuniversitaria para la Enseñanza de la Física: Óptica, dedicada a diseñar elementos multimedia desde 2014.

Profundamente comprometida en defender los derechos de las mujeres investigadoras. Preside el Grupo Especializado de “Mujeres en Física” de la RSEF desde 2018. Es Vocal de la Junta Directiva de la Asociación de Mujeres Investigadoras y Tecnólogas (AMIT).

Eleonora Viezzer, Premio Manuel Losada Villasante a la Excelencia en la Investigación Científica

Eleonora Viezzer, profesora titular en el Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear de la Universidad de Sevilla y miembro de la RSEF, ha sido galardonada con el VIII Premio Manuel Losada Villasante a la Excelencia en la Investigación Científica por sus trabajos en fusión nuclear.

Estos premios están convocados por la Cadena Ser (Sociedad Española de Radiodifusión, SLU) con los colaboradores Ayto. de Carmona, Universidad de Sevilla, Fundación CAJASOL, Mercadona y Foro Interalimentario, y tienen cuatro modalidades: Excelencia en la Investigación Científica, Investigación Agroalimentaria, Investigación en Innovación e Investigación en Economía Circular. Su objetivo es promover y reconocer la actividad investigadora en la Comunidad Autónoma de Andalucía, respaldando el desarrollo de iniciativas innovadoras que redunden en beneficio de toda la sociedad.

La fusión nuclear es la fuente de energía de las estrellas. Limpia y vir-



tualmente inagotable, es la única alternativa viable que la humanidad tiene para cubrir sus necesidades energéticas respetando el medio ambiente. Para producir la energía de las estrellas en la Tierra, el plasma (fuel) debe mantenerse confinado en un reactor a cientos de

millones de grados. Como ningún material es capaz de resistir estas temperaturas, el plasma debe levitar sin rozar las paredes del reactor.

Este es uno de los retos a los que tiene que dar respuesta ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), el reactor de fusión experimental definitivo que se construye en Cadarache (Francia). El éxito de ITER será crucial en el diseño y desarrollo de DEMO (DEMOstration Power Station), el reactor de fusión nuclear demostrativo y último paso antes de la fusión comercial.

Las contribuciones que la Prof.^a Viezzer realiza a este reto han sido merecedoras, entre otras, de una de las prestigiosas becas ERC Starting Grant (2019-2024) del Consejo Europeo de Investigación (ERC) con una financiación de más de 1,5 millones de euros. Eleonora Viezzer colidera el grupo Plasma Science and Fusion Technology Group (www.psft.eu) en la Universidad de Sevilla.

Antonio Guirao, premiado por la Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia

Antonio Guirao Piñera, profesor del Departamento de Física de la Universidad de Murcia y miembro de la RSEF, ha obtenido el Premio de Investigación 2020 de la Real Academia de Medicina y Cirugía de la Región de Murcia, en la modalidad “Salud y Sociedad en la Región de Murcia”, por el trabajo titulado “The COVID-19 Outbreak in Spain. A Simple Dynamics Model, Some Lessons, and A Theoretical Framework for Control Response”. Estos Premios distinguen a trabajos que destaque por su repercusión científica, rigor metodológico e impacto social. En esta edición 2020, la modalidad “Salud y Sociedad”, patrocinada por la Fundación Caja Murcia, se ha dedicado específicamente a la pandemia de COVID-19. El premio se entrega en el acto de apertura del Curso Académico 2021 de la institución.



El trabajo, publicado en la revista *Infectious Disease Modelling* (2020; 5: 652-669) perteneciente al área de salud pública y matemáticas aplicadas, investiga la dinámica de crecimiento de la epidemia de coronavirus en España en la primera ola, y comparativamente en varias regiones españolas, Italia y

Alemania. Los modelos utilizados permiten predecir las curvas epidémicas y conocer la evolución bajo distintos escenarios de mitigación y supresión. El marco teórico propuesto en el artículo resulta de utilidad para la prevención y el control de las epidemias. La investigación se desarrolló con un proyecto del Instituto de Salud Carlos III.

Antonio Guirao es licenciado en Física por la Universidad de Valencia y doctor en Física por la Universidad de Murcia. Realizó un postdoctorado en la Universidad de Rochester. Ha investigado en óptica, procesamiento de información, historia de la física y modelado de sistemas. Ha desempeñado distintos cargos de gestión universitaria y desarrolla una intensa labor de divulgación. En 2020 recibió el Premio Enseñanza y Divulgación de la Física (modalidad Enseñanza Universitaria) de la RSEF y la Fundación BBVA.

José María De Teresa, presidente de la división de Física de la Materia Condensada de la EPS

José María De Teresa, profesor de investigación en el Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón y miembro de la RSEF, va a presidir durante los próximos cuatro años el comité científico de la división de Física de Materia Condensada (CMD) de la Sociedad Europea de Física (EPS), siendo el primer científico español que va ejercer este cargo desde su fundación en 1968.

Esta división se ocupa del estudio de las propiedades físicas de la materia en sus estados sólido y líquido y de sus aplicaciones en campos como la electrónica, el magnetismo, la superconductividad, la óptica, la biofísica, etc. Las actividades más importantes de la división son la organización de un congreso anual o bienal en cooperación con las sociedades nacionales de Física europeas (el último organizado junto a



GEFES-RSEF en 2020 con más de 2.000 participantes), la gestión del prestigioso premio Europhysics Prize y la emisión de un boletín de noticias con periodicidad mensual. Asimismo, el Prof. De Teresa ejercerá la representación de la Física de Materia Condensada en la EPS y contribuyendo a sus actividades: pu-

blicación de la revista *Europhysics News*, interlocución en la política científica europea, apoyo a los jóvenes investigadores, etc.

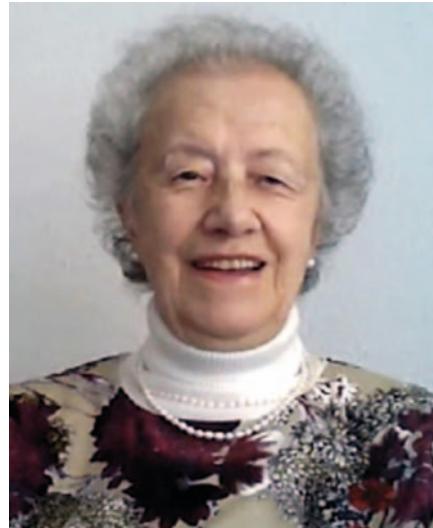
José María De Teresa dirige el grupo de Nanofabricación y Microscopías Avanzadas (NANOMIDAS) del Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (CSIC-Universidad de Zaragoza) y coordina la red española de Nanolitografía (NANOLITO). Ha trabajado en la física de óxidos altamente correlacionados y en dispositivos espintrónicos, en particular con el premio Nobel Albert Fert en el periodo 1998-2000. Actualmente su interés se centra en la nanofabricación y el estudio de dispositivos basados en materiales magnéticos, superconductores y nuevos materiales. En 1997 recibió el premio a Jóvenes Investigadores de la RSEF.

María Josefa Yzuel, Premio Presidencial 2021 de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica

María Josefa Yzuel Giménez, catedrática emérita de la UAB y miembro de honor de la RSEF, ha recibido el Premio Presidencial de la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica (SPIE President's Award 2021). Este Premio se otorga a una persona que, en opinión del Presidente y de la Junta Directiva, ha prestado un servicio único y meritorio de gran beneficio para esta sociedad científica.

Fundada en 1955 para promover las tecnologías basadas en la luz, la Sociedad Internacional para la Óptica y la Fotónica (The International Society for Optics and Photonics, SPIE) es una organización internacional sin ánimo de lucro con sede en Bellingham (EE. UU.), que sirve a 255.000 personas de más de 180 países y que está posicionada como una de las principales sociedades científicas para la difusión y divulgación de los avances en Óptica y Fotónica.

M.ª Josefa Yzuel es licenciada y doctora en Ciencias Físicas por la Universidad



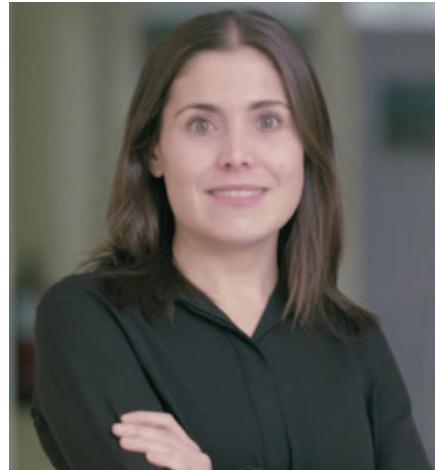
de Zaragoza. Pionera en la incorporación de la mujer al ámbito de la Física en España, fue la primera Profesora Agregada de Universidad de Física en 1971, y la primera Catedrática de Universidad en el área de la Óptica en 1982. Es Académica Numeraria de la Reial Academia de Ciències i Arts de Barcelona, así como Académica Correspondiente de la Aca-

demia de Ciencias de Granada, la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas, Químicas y Naturales de Zaragoza y la Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales de Venezuela. Hija predilecta de Jaca, ha recibido la imposición de la Encomienda de la Orden Civil de Alfonso X el Sabio y es Doctora Honoris Causa por las Universidades Miguel Hernández de Elche y Granada. Ha recibido el Premio Igualdad de la Universidad de Alicante (2017) y el Premio Julio Peláez a mujeres pioneras en Física, Química y Matemáticas (2020). Medalla de Física de la RSEF y la Fundación BBVA en 2014, ha sido vicepresidenta de la RSEF y de la Comisión Internacional para la Óptica, secretaria general de la Sociedad Europea de Óptica, presidenta de la Sociedad Española de Óptica y presidenta de SPIE en 2009. En 2015 fue la Presidenta del Comité Español para el Año Internacional de la Luz y de las Tecnologías Basadas en la Luz y en la actualidad lo es del Comité Español para el Día Internacional de la Luz.

Clara Cuesta, Premio a la Investigación L'Oréal-Unesco 2020

Clara Cuesta, investigadora de la Unidad CIEMAT-Física de Partículas y miembro de la RSEF, ha sido reconocida con uno de los cinco Premios a la Investigación L'Oréal-Unesco 2020. Estos premios se otorgan a proyectos españoles desarrollados por investigadoras menores de 40 años y cuya dotación económica se destinará a seguir financiando sus investigaciones. En el caso de la Dra. Cuesta, cuyo proyecto tiene por título "Estudio del origen de la masa de los neutrinos con detectores de ^{76}Ge " (<https://youtu.be/c7NlSCaVtQY>), el premio reconoce su trabajo dedicado al estudio de las propiedades de los neutrinos, partículas clave del universo, para comprender mejor su funcionamiento, el origen de la materia y la desaparición de la antimateria.

El Programa L'Oréal-Unesco "For Women in Science" lleva más de 20



años en España trabajando para promover la visibilidad de las mujeres en la ciencia y fomentar vocaciones científicas en las más jóvenes. Durante su trayectoria ha reconocido los logros de más de 70 investigadoras en nuestro país y ha dado visibilidad a través

de numerosas iniciativas a su trabajo, convirtiéndolas en referentes para las futuras generaciones.

Clara Cuesta Soria, licenciada en Física por la Universidad de Zaragoza, se doctoró en 2013 en dicha universidad con una tesis sobre la búsqueda de materia oscura en el experimento ANAIS, situado en el Laboratorio Subterráneo de Canfranc. En 2013 inició una etapa postdoctoral en la Universidad de Washington (Seattle, EE. UU.) donde se convirtió en una experta en física de neutrinos trabajando en los experimentos de neutrinos MAJORANA DEMONSTRATOR y COHERENT. Entre sus principales contribuciones está el haber colaborado en la primera observación de un tipo de interacción de los neutrinos con los núcleos, la dispersión elástica coherente, un proceso que no se había observado en más de 40 años.

Luis Vázquez Martínez, Premio Liouville

Luis Vázquez Martínez, Catedrático de Matemática Aplicada en la Facultad de Informática de la UCM y miembro de la RSEF, ha recibido el premio internacional "Liouville" por sus logros y realizaciones en el campo del Cálculo Fraccionario y Aplicaciones. Le ha sido entregado durante la "First Online Conference on Modern Fractional Calculus and its Applications" (OCMFCA 2020), organizada por la Universidad Biruni en Estambul del 4 al 6 de diciembre de 2020. En esta conferencia participaron 500 científicos y fue también la oportunidad para celebrar los 325 años de la introducción del Cálculo Fraccionario por Leibniz, que involucra integrales y derivadas de orden arbitrario real o complejo y tiene un amplio rango de aplicaciones, desde la Mecánica a la Economía, así como desde la Teoría de Control a la Biología y Ciencias Biomédicas.

Las contribuciones del Prof. Vázquez se encuadran en el estudio de familias de ecuaciones obtenidas por



interpolación fraccionaria como la ecuación de difusión tipo Dirac. También en el estudio de la distribución y dinámica del polvo atmosférico de Marte, habiendo sido el Investigador Principal inicial del proyecto REMS-Curiosity-MSL de la NASA a Marte y, por último, en la modelización de

la transferencia no local de energía a través de barreras dieléctricas de gradiente con posibles aplicaciones en temas de invisibilidad y camuflaje. Estos últimos estudios en colaboración con el Instituto de Estudios Espaciales de la Academia de Ciencias de Rusia.

El Prof. Vázquez se licenció en Ciencias Físicas en la UCM en 1971 y se doctoró en la Universidad de Zaragoza. Ha sido investigador visitante asociado en el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Brown (Providence, R. I., EE. UU.) durante los años 1975-1977. Fue colaborador del Centro de Estudios No Lineales del Laboratorio Nacional de Los Álamos, Nuevo México (EE. UU.) en el periodo 1987-1991 y científico asociado en el CERN en 1988. Es Académico Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de España (2005) y Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España (2017).

PREMIOS DE FÍSICA

REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA • FUNDACIÓN BBVA



Convocatoria 2021

Se concederán ocho premios en las categorías: Medalla de la RSEF, Investigador Joven en las modalidades de Física Teórica y Física Experimental, Enseñanza y Divulgación de la Física (Media y Universitaria), Física, Innovación y Tecnología y Mejores Contribuciones a las Publicaciones de la Real Sociedad Española de Física (Enseñanza y Divulgación).

Toda la documentación necesaria relativa a un premio, incluidas las cartas de presentación y de apoyo, deberá ser enviada en formato digital a la dirección de correo electrónico secret.y.admon@rsef.es, de la Secretaría de la RSEF, **desde el 15 de marzo de 2021 hasta las 14:00 horas (hora peninsular) del 21 de mayo de 2021.**

Tanto los/as candidatos/as y los/as presentadores/as a los premios para que las candidaturas puedan ser válidas, como los/las firmantes de posibles cartas de apoyo para que éstas sean tenidas en cuenta, deberán cumplimentar el **Fichero de Tratamiento de Datos Personales:**

https://rsef.es/images/Fisica/Trat.DatosPersonales_PersonalDataProcessingTerms.pdf

La convocatoria de estos premios se resolverá antes del **22 de septiembre de 2021.**

BASES DE LA CONVOCATORIA: <https://rsef.es/images/Fisica/BasesPdF-RSEF-FBBVA2021.pdf>

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 Lucía

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 Albilllos, 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)
A. Ruiz Jimeno (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 Albilllos (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 (Cristalográfica 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)
A. Sastre Santos (Nanociencia y Materiales Moleculares, GENAM)
P. García Martínez (Mujeres en Física, GEMF)
D. Cortina Gil (Física Nuclear, GEFN)
L. T. Oriol Langa (Polímeros, GEPO)
F. L. 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 +.....

www.sidilab.com sidilab@sidilab.com 916659203 902103425

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