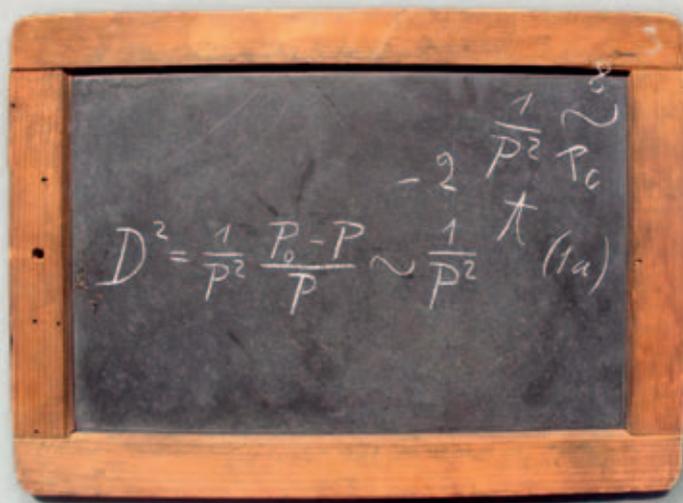


LYCHNOS

Cuadernos de la Fundación General CSIC / Nº 5 / Junio 2011 / Publicación trimestral / Precio: 9 euros



$\sim P \sim 10^8$
 $D^2 = \frac{kg}{s} \frac{dP}{dt}$
 $\tau \sim 10^{10}$ s.
 $\frac{1}{c} \frac{1}{P}$
 $\frac{P_0 - P}{P}$ (2a) $\frac{1}{c} \frac{dP}{dt}$
 $\rho \sim 10^{-26}$
-53

4
La investigación
de frontera

12
En la materia
y la energía

32
En la exploración
del universo

54
En zonas
límitrofes

78
En los estudios sobre
la sociedad y la cultura

LYCHNOS

Cuadernos de la Fundación General CSIC

Nº 5 JUNIO 2011

Dirección

Reyes Sequera

Edición

Sira Laguna

Maquetación

DiScript Preimpresión, S. L.

Ilustración

Lola Gómez

Edita

Fundación
General CSIC

Presidente

Rafael Rodrigo Montero

Director General

Javier Rey Campos

Dirección postal

c/ Príncipe de Vergara, nº 9 - 2ª derecha; Madrid 28001

www.fgcsic.es

© Fundación General CSIC, 2011

Todos los derechos reservados. La utilización por parte de terceros de las obras contenidas en esta revista, sin el consentimiento previo y por escrito de su titular, podrá constituir una infracción civil o la comisión de un delito contra la propiedad intelectual.

Imprime: Cyan S.A.

Dep.Legal S.527-2010

ISSN: 2171-6463

En esta edición se utiliza papel sometido a un proceso blanqueado ECF, cuya fibra procede de bosques gestionados de forma sostenible certificada.

ÍNDICE

LYCHNOS Nº 5 JUNIO 2011

01 La investigación de frontera...	4
Fronteras que están dentro. <i>Fernando Broncano</i>	6
02 ... en la materia y la energía	12
02.1 ITER y la energía de fusión. <i>Joaquín Sánchez</i>	14
02.2 El bosón "de Higgs". <i>Álvaro de Rújula</i>	21
02.3 Teoría M (Cuerdas). <i>Enrique Álvarez</i>	27
03 ... en la exploración del universo	32
03.1 La oscuridad del cosmos. <i>Enrique Gaztañaga</i>	34
03.2 El bestiario exoplanetario. <i>David Barrado-Navascués</i>	40
03.3 Grandes instalaciones en Astronomía: Astrofísica a lo grande. <i>Antxon Alberdi</i>	46
04 ... en zonas limítrofes	54
04.1 Presente y futuro de la Biología Sintética. <i>Javier Macía y Ricard Solé</i>	56
04.2 Información cuántica. <i>Antonio Acín</i>	60
04.3 Cuando la Economía se encontró con la Fisiología. <i>Enrique Turiégano</i>	66
04.4 Los problemas del milenio. <i>Manuel de León</i>	72
05 ... en los estudios sobre la sociedad y la cultura	78
05.1 La investigación de frontera en Humanidades y Ciencias Sociales. <i>Javier Moscoso</i>	80
05.2 El lenguaje: aprendizaje y uso. <i>Núria Sebastián</i>	85
05.3 Modernidad: comprender nuestro presente. <i>Peter Wagner</i>	90
06 Tribuna	96
Investigación de frontera: traer un futuro al presente. <i>Javier Rey</i>	98
07 Noticias	100

01

**La investigación
de frontera ...**



Fronteras que están dentro

Según el autor, la idea de frontera, como último confín al que llega nuestro conocimiento más allá del cual esperan grandes recompensas, ha sido de hecho una de las metáforas persistentes en la historia de la ciencia para hablar de sí misma. En el imaginario del tiempo estaban las grandes caravanas que atravesaban las estepas sufriendo todo tipo de percances y amenazas, pero que al final, con suerte, obtenían la tierra prometida. La empresa del conocimiento se entendía así como una empresa estratégica, es decir, como una empresa que debe conseguir algo que no es sino un medio para un fin ulterior: conocimiento para obtener utilidad.

Fernando Broncano

Universidad Carlos III

Hace poco más de diez años, un autor de divulgación, John Horgan, escribió un vaticinio titulado *El fin de la ciencia*. En este libro planteaba Horgan la posibilidad de que la ciencia ya hubiese llegado a sus últimas fronteras y que en adelante solo quedase hacer una investigación poco ambiciosa y cada vez más académica y superficial. Con la pequeña distancia que nos permite poco más de una década desde que el libro fue publica-

do quizá no podamos aún emitir una respuesta justificada a este vaticinio, si es que es posible emitir algún juicio al respecto. La ciencia es una empresa maratoniaca, de carreras de fondo y no de velocidad, y es difícil extrapolar a una dimensión histórica las tendencias observables en los resultados de los últimos años. Pero la pregunta que se hacía Horgan es, por lo demás, interesante en sí misma independientemente de la respuesta que podamos dar a tal cuestión. Es

el mismo hecho de preguntarse por el fin de la ciencia lo que nos habla de una cierta forma de ver, o de verse a sí mismas, la ciencia y la tecnología.

Horgan se inscribe en una larga tradición que entiende la empresa del conocimiento científico con la ayuda de la metáfora de la frontera. En esta tradición hay una obra que no puede desconocerse puesto que aún estamos bajo su impacto y que es central

para comprender el poder de las metáforas. Me refiero al informe que Vannevar Bush dirigió al presidente de los Estados Unidos en 1945 con el título de *Ciencia: la frontera sin fin*. Vannevar Bush, un ingeniero electrónico, era a la sazón director de la *Office of Scientific Research and Development* (OSRD), un organismo creado en el marco de la Segunda Guerra Mundial para movilizar la investigación científica en pro de la guerra,



Fernando Broncano.

y que fue el organismo director del Proyecto Manhattan en el que se realizó la construcción de la bomba atómica. Al terminar la guerra, V. Bush temía que se desmantelasen las nuevas formas sociales de organizar la ciencia mediante el apoyo público en la coordinación de grandes recursos de personal, infraestructuras, instituciones y financiación, y escribió este informe con el propósito explícito de que continuase este programa en el futuro. En la carta de presentación en la que enviaba el informe al presidente Truman, escribía Bush:

“El espíritu pionero todavía tiene vigor dentro de esta nación. La ciencia ofrece un lejano territorio en gran parte inexplorado para el pionero que tenga los instrumentos para esta tarea. Las recompensas de esta exploración tanto para la nación como para el individuo serán grandes. El progreso científico es una clave esencial para nuestra seguridad como nación y para nuestro progreso cultural.”

En este párrafo unía lo que serían las dos líneas directrices del informe: en primer lugar, el objetivo básico, que no

Fernando Broncano

Doctor en Filosofía por la Universidad de Salamanca. Profesor titular de Lógica y Filosofía de la Ciencia en esta universidad hasta el curso 1999-2000.

Su campo general de trabajo es la noción de racionalidad tanto en sus aspectos teóricos, epistémicos, como prácticos. En los aspectos epistémicos, ha trabajado en los problemas de la racionalidad en la ciencia, en sus aspectos cognitivos y en la racionalidad de las comunidades científicas. Desde aquí ha derivado a problemas más generales de Filosofía de la mente (racionalidad limitada, racionalidad colectiva, racionalidad y emociones). En cuanto a la racionalidad práctica, se ha orientado hacia la Filosofía de la técnica: habilidades, planes, capacidad de diseño colectivo, etc.

Actualmente trabaja en la importancia de las capacidades metarrepresentacionales en la cultura y la ciencia. Mantiene una actitud militante contra la división de la cultura en cultura científica y humanística. Considera que la experiencia establece la escala de toda actividad humana. Entre sus libros están: *Mundos artificiales* (2000), Fondo de Cultura Económica; *Saber en condiciones* (2003), Antonio Machado; *Entre ingenieros y ciudadanos* (2006), Montesinos; y *La melancolía del ciborg* (2009), Herder.

era otro que suscitar en el gobierno la voluntad de apoyar la investigación básica, y, en segundo lugar, el aparato retórico para justificar esta pretensión. Aquí, la metáfora de la frontera interminable evocaba el imaginario de las riquezas de todo tipo que esperaban al pionero que se atreviese a traspasar esa lejana inexplorada frontera. La ciencia se veía como una empresa de exploración en el espacio de lo desconocido en donde habrían de descubrirse tesoros de utilidad, aunque el esfuerzo realizado no pareciese tener recompensa inmediata.

La ciencia es una empresa maratoniada, de carreras de fondo y no de velocidad, y es difícil extrapolar a una dimensión histórica las tendencias observables en los resultados de los últimos años

En el imaginario del tiempo estaban las grandes caravanas que atravesaban las estepas sufriendo todo tipo de percances y amenazas, pero que al final, con suerte, obtenían la tierra prometida. La empresa del conocimiento se entendía así como una empresa estratégica, es decir, como una empresa que debe conseguir algo que no es sino un medio para un fin ulterior: conocimiento para obtener utilidad. Las connotaciones de los tesoros que guardan las tierras inexploradas están en la más profunda de las metáforas humanas: el viaje hacia un lugar prometido.

La idea de frontera, como último confín al que llega nuestro conocimiento más allá del cual esperan grandes recompensas, ha sido de hecho una de las metáforas persistentes en la historia de la ciencia para hablar de sí misma. Newton, por ejemplo, ya explicaba sus éxitos diciendo que se había subido a hombros de gigantes para ver más lejos que los demás. La idea de que el conocimiento constituye un espacio explica por qué las sospechas de haber llegado al final del territorio se usan también como recurso retórico. Es el que ha empleado Horgan, y fue posiblemente una creencia a finales del siglo XIX, como ejemplifica la sentencia que se atribuye a William Thompson, Lord Kelvin, y que estipulaba que la Fisi-

ca había ya llegado a sus límites y el resto sería solo cuestión de decimales en la precisión de las soluciones a las ecuaciones básicas. Verdadera o falsa, esta anécdota ejemplifica la mentalidad de los científicos que trabajan dentro de un paradigma, cuyos límites no pueden sino entender como los límites de lo cognoscible. Que la pretensión de haber llegado a los últimos confines coincidiese en el tiempo con la gran crisis de la ciencia que llevó a la relatividad, la Mecánica cuántica, a las Matemáticas de los transfinitos, a la Genética de poblaciones, a la teoría de juegos, etc., es una suerte de ironía histórica y muestra que a veces la vista de los exploradores no es tan larga como creen. Las metáforas iluminan pero a veces dejan sombras. Las metáforas de la frontera a veces hacen creer que el espacio que se explora solo tiene las dos dimensiones de la superficie. Pero, como Richard Feynman señaló, también allá abajo hay mucho sitio: una de las primeras llamadas a lo que habrían de ser mucho más tarde las Nanotecnologías.

Porque lo que ocurre es que la metáfora de la frontera parece una, pero en realidad son dos. El Diccionario de la RAE, en sus dos primeras entradas para el término frontera establece: 1. *f.* Confín de un Estado. 2. *f.* Límite. U. m. en pl. *Su cordicia no tiene fronteras.* El se-

La ciencia se veía como una empresa de exploración en el espacio de lo desconocido en donde habrían de descubrirse tesoros de utilidad

gundo, “límite”, corresponde a esta connotación del pionero. Pero el primero de los sentidos, “confín de un Estado”, se refiere a otro tipo de fronteras, a saber, a delimitaciones de territorios que ya están ocupados. ¿Por quién? En el caso de la ciencia, por las disciplinas.

Las disciplinas no son meros agregados de investigadores o profesores. Son instituciones que componen estructuralmente la trama de la ciencia desde su nacimiento. Fueron el modo en el que se organi-

zó la investigación en forma de comunidades de investigadores ligados por relaciones internas de confianza y control mutuo de la investigación. Están formadas por “colegios invisibles”, un término que acuñó el sociólogo Derek K. Solla Price para referirse a los vínculos de respeto que organizan las actividades, y que se expresan en las citas, en el seguimiento que unos científicos hacen de otros, en la dirección del trabajo, de la educación de nuevos científicos, etc. También en la composición interna de las sociedades científicas, en los consejos editoriales de las revistas, y en los relatores de calidad de los trabajos; en el sistema de premios y recompensas. En fin, en todo aquello que inyecta vida interna a la comunidad científica.

Desde la emergencia de la ciencia en la forma que adopta contemporáneamente, en el siglo XIX (quizá ya en el siglo anterior), las disciplinas fomentaron la división social del trabajo cognitivo en la ciencia y fueron el más poderoso instrumento para desarrollar el conocimiento, al constituirse a la vez como órganos de creación y de control de calidad de la misma. Fueron las disciplinas las que conformaron el conocimiento científico como un conocimiento muy filtrado por la crítica colectiva, sometido a tanta energía crea-

dora como escepticismo en la evaluación de los resultados. Las disciplinas correspondían, a medida que iban naciendo, a los diversos dominios de lo real tal como se iban también constituyendo en el mapa general del conocimiento. En el siglo XIX, por ejemplo, la antigua Mecánica racional, una parte de las Matemáticas, se convirtió en la parte más abstracta de lo que había sido llamado anteriormente, por su carácter especulativo, Filosofía Natural, y que ahora se comenzó a llamar Física. Lo mismo ocurrió con la Química, con la Biología, etc. Cada una de estas macro disciplinas fueron desarrollándose arborescentemente en nuevas subdisciplinas al compás de la constitución de zonas robustas de investigación (por cierto, la metáfora del “Árbol del Conocimiento” es otra de las grandes metáforas permanentes en la ciencia. Así, por ejemplo, forma parte de la tradición iconográfica del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), pues, a diferencia de la muy moderna metáfora de la frontera interminable, el árbol refiere a una tradición medieval a la que quería anclarse el Consejo en sus orígenes).

Las disciplinas fueron convirtiéndose en análogos de los estados en el dominio político: eran también instituciones

de jerarquía que tenían efectos sobre el control de las direcciones de la investigación. Pues, como detectó Thomas S. Kuhn, estaban articuladas por paradigmas que movilizaban los esfuerzos de investigación en direcciones ordenadas por los principios del paradigma. Señaló Kuhn que esto daba lugar a lo que denominó “tensión esencial” de la ciencia: la tensión entre obediencia y creatividad, entre sumisión y deseo de explorar lo desconocido. Pues las disciplinas, al tiempo que eran un instrumento de desarrollo, lo hacían constriñendo la imaginación creadora de muchos nuevos investigadores que deseaban explorar las zonas oscuras de cada paradigma.

Ocurre así una nueva forma de frontera que tiene que ver menos con los confines de lo desconocido que con las zonas oscuras de lo ya conocido. En el siglo XIX, comenzaron ya muchos movimientos internos en la ciencia para transgredir las fronteras de las disciplinas constituidas. Dos de los grandes conceptos que articularon la idea de Naturaleza en el siglo XIX surgieron transdisciplinariamente. El primero fue la idea de *energía*. El descubrimiento del Principio de Conservación de la Energía, el gran principio de todas las leyes naturales, se originó por la convergencia de la investigación de gen-

Las disciplinas no son meros agregados de investigadores o profesores. Son instituciones que componen estructuralmente la trama de la ciencia desde su nacimiento

te muy diversa, como médicos (Mayer), ingenieros (Sadi-Carnot), experimentalistas (Joule Faraday), físicos matemáticos (Helmholtz), e incluso filósofos naturales del romanticismo alemán. El propio concepto de energía era un concepto transdisciplinar que abarcaba lo que de común e interactivo tienen los sistemas causales en todos los estratos de organización de lo real. Otro de los grandes principios transdisciplinares del siglo XIX fue el de *evolución*.

Para desarrollarse, la teoría de la evolución hubo de convocar en una tarea convergente a investigadores pertenecientes a campos tan diferentes como la Geología y la Paleontología, la Biología taxonómica, la Biología del desarrollo, la Estadística y algunas otras disciplinas que tuvieron que prestar sus recursos para investigar este dominio no contenido en ninguno de los confines anteriores.

La ciencia contemporánea ha explorado las “fronteras” en el sentido de confin de lo desconocido con una asombrosa voluntad de lejanía: las fronteras de lo grande (el tamaño del universo, su masa, el tiempo profundo de la historia del universo), de lo pequeño (la trama del espacio y el tiempo en las escalas cuánticas) y de lo complejo (los sistemas neuronales, los sistemas informáticos). Parecería que el diagnóstico de John Horgan estaría justificado como si ya no hubiese fronteras y estuviésemos esperando a esa inevitable “Teoría del Todo” en la que todo sería ya cuestión de “detalle” en la escala de los mapas del universo. Pero sería equivocado pensar así. Como ya ocurrió en el siglo XIX, han sido los conceptos transdisciplinares los que han producido los frutos más sorprendentes en el conocimiento contemporáneo. Así, si el siglo XIX fue el siglo de la energía, en el pasa-

do siglo XX se formó otro de los conceptos transdisciplinares que aún siguen convocando la convergencia de disciplinas. Me refiero al concepto de *información*. Nacido en campos lejanos en apariencia de la investigación fundamental, como era la Ingeniería electrónica, el concepto de información ha revolucionado todos los campos contemporáneos del conocimiento, desde la Tecnología y la Biología, a la Física fundamental. Redes y sistemas adaptativos son nuevos conceptos que tienen también este poder articulador, reorganizador del conocimiento.

Si observamos la ciencia con una mirada distante, ya a la historia, ya a su composición sociológica, quizá reparemos en que esta segunda forma de vida en la frontera ha sido mucho más común de lo que pudiera parecer. Muchas veces nos referimos a estas fronteras como investigación “interdisciplinar”, pero es incorrecto llamarla de esta forma, pues parece que se trata de una investigación marginal en la que investigadores formados en una disciplina, pero quizá no en “la frontera” de ella (en el sentido del límite de lo desconocido), se dedican en sus ratos libres a colaborar con otros colegas, como a veces los policías asisten a los paramédicos en un parto inoportuno. No. Lo cierto es que en las

Las disciplinas fomentaron la división social del trabajo cognitivo en la ciencia y fueron el más poderoso instrumento para desarrollar el conocimiento, al constituirse a la vez como órganos de creación y de control de calidad

fronteras de las disciplinas hay mucha vida científica y una vida que tiene, como todas las formas de vida en la frontera, una capacidad creativa mucho más intensa de lo que se les concede. Es cierto que a veces las disciplinas se subdividen en subdisciplinas, pero las estructuras disciplinarias de investigación más novedosas de la ciencia contemporánea han nacido en las fronteras de las disciplinas de una forma nueva, transdisciplinar,

inventando nuevos métodos y conceptos y amalgamando lo que parecía imposible de mezclar. En estos nuevos nichos de conocimiento, la ciencia y la tecnología se interpenetran y cambian sus papeles. La Ingeniería, aparentemente más aplicada, se convierte en investigación fundamental e incluso especulativa, como está ocurriendo ahora con la Robótica que se dedica a la simulación de mentes y cuerpos inteligentes, o las ciencias biológicas se convierten en ingenierías, como ocurre con la investigación fundamental en Informática. Campos como las ciencias cognitivas, la Robótica, las Neurociencias, la Exobiología, se han creado en esos territorios de nadie.

Hay muchas razones prácticas para mirar con más cuidado a los territorios de frontera entre disciplinas pero hay también muchas y poderosas razones teóricas. Hemos pensado siempre los conceptos como estructuras estables definidas por las teorías (científicas o filosóficas) que, si cambian, lo hacen al compás de estas teorías estructurales. Pero los conceptos, como la creatividad humana, son mucho más transgresores de frontera de lo que parece. Conceptos definidos en una disciplina migran hacia otras, o se transforman en promoto-

res de ideas muy alejadas de las condiciones en las que nacieron para clasificar un trozo de la realidad y se convierten en resortes de la creatividad. En las humanidades esta libertad conceptual está bien asentada, y a veces produce mucha irritación pues parecen transgredirse las fronteras de lo racional (me refiero, por ejemplo, a las invectivas que los físicos Alan Sokal y Jean Bricmont dirigieron en 1998 a todos los filósofos posmodernos que usaban sin restricciones conceptos, o al menos términos, tomados de la Física y empleados metafóricamente). Hay, ciertamente, razones para irritarse por la falta de claridad conceptual, pero deberíamos pensar en una segunda instancia si la propia ciencia, contemplada con distancia, no en el trabajo duro de cada día, no ha realizado estas transgresiones mucho más a menudo de lo que parece. Newton empleaba reglas y cuerdas para construirse modelos físicos de sus funciones; Maxwell acudía a rodillos, vórtices y celdillas para imaginarse el éter; Plank imaginaba resonadores y mecanismos tecnológicos para resolver el problema del cuerpo negro. Todos ellos, sin quererlo quizá, se alzaban sobre metáforas para intentar asomarse a lo desconocido. Eran también transgresores de las fronteras. ■

WORKSHOPS

Workshops

FGCSIC

Los Workshops FGCSIC son talleres de formación y debate sobre temáticas específicas, que constituyen una oportunidad de encuentro al más alto nivel para los investigadores, emprendedores, profesionales e interesados en los diversos aspectos de la I+D+i. De formato ágil e innovador, en ellos se incentivará el intercambio de conocimiento, propiciando un entorno participativo y constructivo.

Los Workshops FGCSIC son de libre acceso con aforo limitado. Más información www.fgcsic.es/workshops

Workshops FGCSIC 2011

- Vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva
- Planificación estratégica de la I+D
- Prospectiva científica
- Métricas de la producción científico-técnica

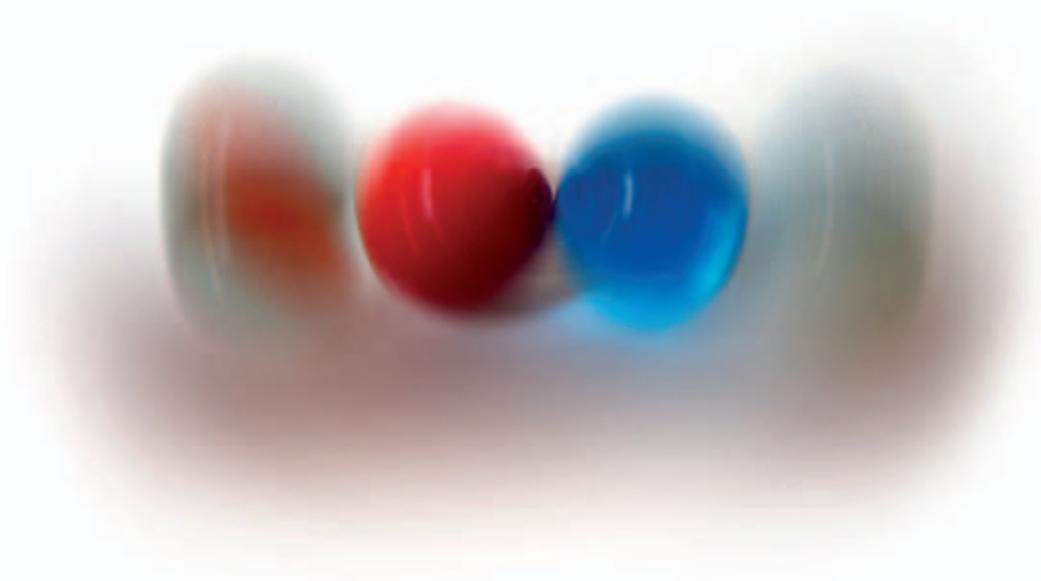


Fundación General CSIC

CaixaForum^{Madrid}
Obra Social "la Caixa"

02

**... en la materia
y la energía**



ITER y la energía de fusión

La energía de fusión puede desempeñar un papel muy importante en la segunda mitad del siglo como fuente de energía masiva. Entre sus ventajas destacan que es respetuosa con el medio ambiente, su materia prima es abundante y se encuentra distribuida por todo el planeta. ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional) es la herramienta para lograr esta fuente de energía.

Joaquín Sánchez

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT)

La fusión como fuente de energía

La humanidad consume a día de hoy energía a un ritmo aproximado de 10 teravatios (TW), el equivalente a 10.000 grandes plantas nucleares. La cifra es en sí misma escalofriante, pero comienza a ser preocupante si nos fijamos en algunos detalles adicionales. En primer lugar, una gran parte de la generación de energía aún proviene de la quema masiva de combustibles fósiles, entre ellos el petróleo a razón de casi 90 millones de barriles

diarios, con todos los problemas que ello conlleva. En segundo lugar, el consumo dista de ser uniforme, siendo mucho mayor en el mundo desarrollado, lo que nos permite imaginar que los 10 TW se incrementarán significativamente a medida que en las próximas décadas los países en vías de desarrollo mejoren su nivel de vida y por tanto su demanda de energía.

Frente a este gran problema, la tecnología ofrece un abanico de potenciales soluciones

y entre ellas se sitúa la energía de fusión, que puede desempeñar un papel muy importante en la segunda mitad del siglo como fuente de energía masiva, respetuosa con el medio ambiente y basada en una materia prima abundante y distribuida por todo el planeta.

La fusión es la reacción por la que núcleos, generalmente pequeños, se unen para dar lugar a núcleos algo mayores con una pérdida de masa en el proceso, masa que según la expresión de Einstein ($E=mc^2$)

se transforma en energía cinética de las partículas y núcleos resultantes.

El Sol obtiene su energía mediante una serie de reacciones que se inician con la fusión de dos núcleos de hidrógeno para generar deuterio. Esta reacción se produce gracias a la altísima fuerza gravitatoria existente en el centro de la estrella, que comprime el hidrógeno hasta alcanzar densidades de 10^{32} protones por metro cúbico a temperaturas de 1,5 keV (16 millones de



Joaquín Sánchez.

Joaquín Sánchez

Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid en 1986, año en el que se incorpora al CIEMAT como experto en diagnosis de plasmas.

Tras dos años en el Instituto Max Planck IPP de Garching (Alemania), pasa a ser responsable de los sistemas de diagnóstico en los sucesivos dispositivos de fusión por confinamiento magnético del CIEMAT: TJ-I, TJ-IU y finalmente TJ-II. Desde junio de 2004 es director del Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT).

Ha colaborado con el instituto Max Planck IPP (Alemania), Oak Ridge National Laboratory (EEUU), Universidad de Princeton (EE UU), National Institute for Fusion Science (Japón) y Massachusetts Institute of Technology (EE UU). Entre 2000 y 2003 fue responsable, *Task Force Leader*, de la explotación científica de los sistemas de diagnóstico en el experimento JET, perteneciente a la Unión Europea y situado en Culham (Reino Unido). Actualmente, es Investigador coordinador del proyecto Consolider Tecnología de Fusión y preside la Plataforma Tecnológica de Fusión, organización orientada a fomentar la participación de la industria española en el proyecto de fusión ITER.

Es delegado español en el Consejo de Gobierno de la Empresa Común del ITER Fusion for Energy de Barcelona, vicepresidente del Comité Consultivo de Energía de Fusión de EURATOM y presidente del Group of Chairpersons del programa de Fusión Europeo.

Con un consumo per cápita como el actual, la humanidad podría obtener toda la energía que necesita gastando un gramo de litio por persona al año

grados Kelvin). En ausencia de esta altísima fuerza gravitatoria, la reacción entre dos protones es inalcanzable a la luz de nuestras capacidades actuales, por ello el objetivo de la investigación en la fusión como fuente de energía se dirige a otra reacción con una sección eficaz mucho mayor: la fusión de un núcleo de deuterio con uno de tritio (reacción D-T) que da lugar a un núcleo de helio y un neutrón, que nacen con una energía conjunta de 17,5 MeV (Figura 1).

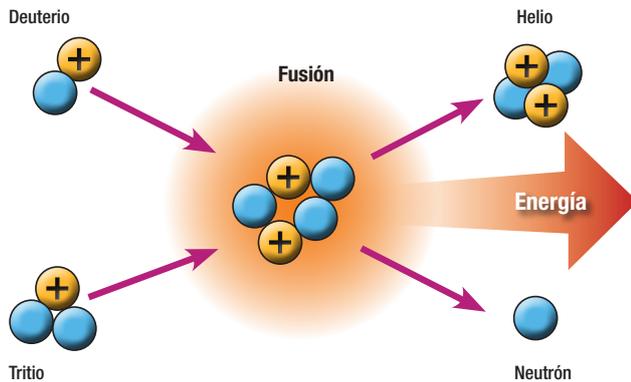
La materia prima de la reacción D-T es muy copiosa en la naturaleza y además está distribuida por todas las regiones. El agua normal contiene 33 miligramos de deuterio por li-

tro y el tritio se genera a partir de otro elemento muy abundante: el litio que, entre otras posibilidades, podemos extraer de la sal marina. Una gran ventaja es que las cantidades necesarias son muy modestas, por lo que la posible repercusión del precio del litio en el precio final de la energía sería muy pequeña. Con un consumo per cápita como el actual, la humanidad podría obtener toda la energía que necesita gastando un gramo de litio por persona al año. Por otro lado, el producto de la reacción, el helio, es uno de los elementos más inocuos que existen (se utiliza entre otras cosas para rellenar los globos que comparamos a nuestros niños), no crea efecto invernadero, no se

acumula en la atmósfera y en cualquier caso generaría gases del orden de seis mil toneladas anuales, cantidad muy modesta si la comparamos con las 10^{10} toneladas anuales de CO_2 que se emiten actualmente a la atmósfera.

Hasta ahora hemos hecho una presentación centrada en las grandes ventajas de esta fuente de energía, ¿donde están las dificultades? La mayor dificultad es la consecución de la reacción en sí misma. Para que los dos núcleos se fusionen han de acercarse, superando la repulsión electrostática, a distancias lo suficientemente bajas como para que la atracción por las fuerzas nucleares entre en jue-

/// Figura 1. Esquema de la reacción de fusión D-T //////////////////////////////////////



Fuente: esquema cedido por el autor.

go. Una forma de conseguirlo es hacerlos chocar entre sí a gran velocidad, la que resultaría de acelerar el deuterio y el tritio a unos 20.000 voltios. Conseguir estas velocidades no es un problema, de hecho se aceleran partículas a energías millones de veces mayores, pero sí es un problema el rendimiento energético del proceso. Si aceleramos unos núcleos contra otros, el carácter coulombiano de la repulsión electrostática hace que la probabilidad de colisión “frontal” sea muy pequeña y la mayor parte de las partículas se cruzan evitándose mutuamente y sin producir reacciones de fusión.

La única manera de alcanzar una tasa de reacciones que haga el proceso energéticamente rentable es mantener el

gas de deuterio-tritio confinado, de manera que los núcleos estén continuamente colisionando mientras mantienen esa energía promedio de 20 keV. El problema toma su verdadera dimensión cuando nos planteamos en qué recipiente mantendríamos este gas en agitación térmica, ya que 20 keV por partícula suponen una temperatura de 220 millones de grados.

Curiosamente, este serio problema es también la fuente de una de las grandes ventajas de la fusión nuclear: es intrínsecamente segura, ya que, tan pronto como las condiciones óptimas de funcionamiento se degradan por el fallo de algún sistema, el reactor se vuelve incapaz de mantener esas altísimas temperaturas y la reacción se extingue por sí misma

La fusión nuclear es intrínsecamente segura, ya que, tan pronto como las condiciones óptimas de funcionamiento se degradan por el fallo de algún sistema, el reactor se vuelve incapaz de mantener esas altísimas temperaturas y la reacción se extingue por sí misma sin dejar prácticamente calor residual

sin dejar prácticamente calor residual.

Históricamente se han desarrollado dos tipos de “recipientes” para abordar el problema. La primera posibilidad es simplemente calentar el gas repentinamente, en unos pocos nanosegundos, para que antes de que le dé tiempo a expandirse libremente se produzca la reacción. En este principio se basa el método de “confinamiento inercial” cuyo principal exponente es el experimento NIF de Livermore (EEUU) que ha arrancado recientemente. La segunda posibilidad utiliza el hecho de que el gas a tan altas temperaturas, en estado de “plasma”, está compuesto de partículas cargadas y por tanto susceptibles de ser atrapadas por un campo magnético. Esta aproximación de “confinamiento magnético” ha sido la apuesta principal del Programa Europeo de Fusión y constituye la base del experimento ITER.

Confinamiento magnético: el proyecto ITER

El campo magnético no puede ceder ni quitar energía a las partículas cargadas pero puede curvar su trayectoria, de manera que esta acaba siendo una hélice arrollada en torno a la línea de campo. Para partículas con energías de 10 keV y campos del orden de va-

rios tesla, el radio de estas hélices es de pocos centímetros para los iones y milímetros para los electrones. Si ahora hacemos que la línea de campo se cierre sobre sí misma, en una geometría “toroidal”, conseguimos mantener las partículas atrapadas.

El “tokamak”, palabra procedente del ruso *toroidalnaya kamera ee magnitnaya katushka* (cámara toroidal y bobina magnética), es una trampa magnética en forma toroidal que realiza precisamente esa tarea. Pero, aunque el campo magnético retarda el escape de energía en el tokamak, no lo elimina completamente porque las colisiones entre las partículas dan lugar a una inevitable difusión. Por ello hay que recurrir a un segundo parámetro para mantener la energía: el tamaño. Los tokamaks más eficientes son los más grandes. Por ejemplo, el tokamak más grande del mundo, el JET, perteneciente a la Unión Europea y situado en Oxford, que ha llegado a producir potencias de fusión de hasta 16 MW, puede contener 80 m³ de plasma, tiene una altura de unos 12 metros en su conjunto y un diámetro similar. El siguiente paso en el desarrollo de la fusión sería el gran experimento ITER que tendrá 1000 m³ de plasma y, de acuerdo con las leyes de

escala obtenidas del conjunto de todos los experimentos previos, deberá alcanzar ganancias energéticas de entre 5 y 10 veces, demostrando lo que llamaríamos la “viabilidad científica” de la fusión como fuente de energía.

ITER es un gran tokamak, en cuya construcción participan países que albergan a más de la mitad de la población de la Tierra: China, Corea, EEUU, India, Japón, Rusia y Europa, que participa como un solo socio. El experimento se sitúa en Cadarache, en el sur de Francia. Se trata de una máquina de grandes proporciones basada en bobinas superconductoras y, para dar una idea de su complejidad, baste recalcar que en un espacio de menos de dos metros tendremos temperaturas de cien millones de grados en el plasma y temperaturas cercanas al cero absoluto en las bobinas superconductoras, que trabajan a 1,4 K. Otro ejemplo ilustrativo es la complejidad del sistema de diseño asistido por ordenador (CAD) que tiene que manejar 10 millones de piezas diferentes, diez veces más que las necesarias en el avión Airbus 380 (Figura 2).

La construcción de este gran proyecto comenzó en 2008 y se espera que los experimentos se inicien en 2019.

ITER es un gran tokamak, en cuya construcción participan países que albergan a más de la mitad de la población de la Tierra: China, Corea, EEUU, India, Japón, Rusia y Europa, que participa como un solo socio

Los problemas tecnológicos

Al principio de este artículo hemos explicado que el tritio, necesario para la reacción D-T, lo obtenemos en el propio reactor a partir del litio. Este trabajo lo realizará un sistema que rodea al plasma, denominado *breeding blanket*

“manto fértil”, que será el encargado además de extraer la energía de los neutrones y de evitar que estos lleguen a alcanzar las bobinas superconductoras. El reactor comienza su operación inicial con una pequeña carga de tritio de origen externo y a medida que se producen reacciones de fusión, cada tritio fusionado da lugar a un neutrón. El neutrón colisiona con el material del manto, dando lugar a varios neutrones nuevos, de menor energía. Estos neutrones secundarios serán los que colisionen con el litio para generar de nuevo tritio. Esta multiplicación neutrónica intermedia que realizamos es imprescindible para mantener una tasa suficiente de renovación del tritio, levemente por encima del 100%.

ITER no tendrá un manto fértil completo pero llevará a cabo un programa de pruebas de los diversos conceptos desarrollados con pequeñas secciones de manto fértil (2x1 m²), que se acoplarán en los puertos de acceso al plasma.

El otro gran desafío para la fusión, una vez resuelto el problema del confinamiento del plasma, lo constituyen los materiales.

Nuestro primer problema con los materiales lo ocasionan las

partículas cargadas que escapan del plasma y llegan a las paredes del reactor. Como hemos explicado más arriba, el campo magnético retarda su salida al exterior pero no la impide: al final la pared del reactor acaba recibiendo un intenso flujo de partículas cargadas con energías típicas de 50 eV. El problema con este flujo de partículas es que su deposición está normalmente concentrada en zonas específicas de la máquina, llegando a generar cargas térmicas loca-

les de 20 MW /m² capaces de evaporar prácticamente cualquier material conocido. Esto será un problema menor para ITER, que tiene prevista la sustitución periódica de los componentes afectados, pero puede ser una seria limitación para un reactor comercial. Los materiales que se consideran para este cometido son los compuestos de fibra de carbono o el wolframio, en ambos casos refrigerados por helio, y como solución a largo plazo las paredes basadas

en metal líquido, fundamentalmente litio.

Por su parte, los neutrones que se generan en la reacción D-T, que llevan el 80% de la energía, no suponen un problema de carga térmica, ya que se distribuyen de manera isotrópica y se absorben uniformemente en todo el volumen del manto fértil. Sin embargo, causan otro tipo de daños en los materiales estructurales que rodean al reactor: se forman burbujas intersticiales de helio e hidrógeno y se producen desplazamientos de átomos en la red cristalina del material. Todos estos efectos fragilizan el material y deterioran sus propiedades estructurales. El problema casi no se manifestará en ITER ya que la tasa acumulada de neutrones será pequeña, pero en un reactor comercial cada átomo del material estructural sufrirá en promedio 20-30 desplazamientos (dpas) por año de operación.

Por otra parte, las colisiones de estos neutrones tan energéticos con el material generan isótopos radiactivos que originalmente no estaban presentes. Ello da lugar a que estos materiales, al final de la vida del reactor, se conviertan en un residuo, que no es de alta actividad pero que no puede ser desechado en vertederos convencionales ni reciclado. Actualmente se reali-

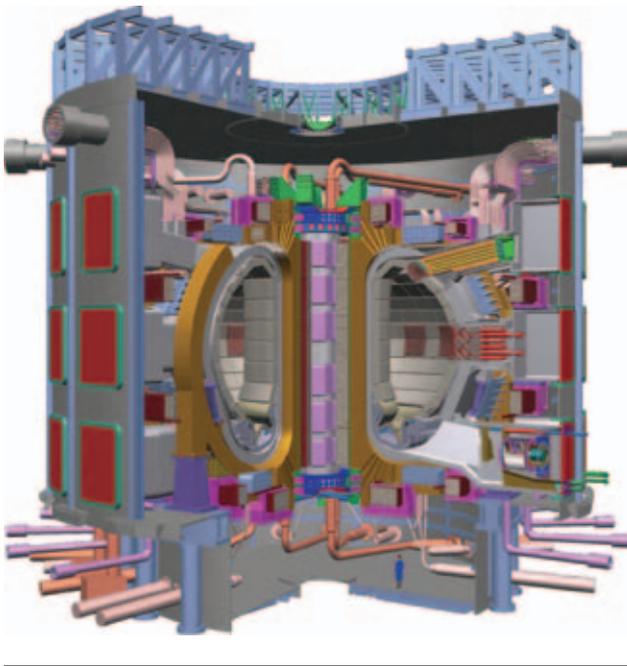
zan estudios, con resultados esperanzadores, sobre los denominados "materiales de baja activación", entre ellos tenemos algunos tipos de acero y los materiales compuestos de carburo de silicio. Estos materiales aún generarían residuos pero su actividad tendría un periodo menor de cien años, tras los cuales se podrían reutilizar, de esta manera la fusión no generaría hipotecas medioambientales para generaciones futuras.

Los proyectos IFMIF y DEMO

ITER será un gran paso, pero es inevitable preguntarse por los pasos que habrá que dar después de ITER, o en paralelo, para llegar a los reactores comerciales de fusión. Aparte de un programa en paralelo de Física y tecnología en los campos ya discutidos, se plantea la construcción de otro gran experimento: IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), que sería una fuente intensa de neutrones de 14 MeV necesaria para realizar pruebas de materiales de baja activación.

Con los resultados de ITER, IFMIF y los programas de Física y tecnología, se abordará, en torno a 2030, la construcción del siguiente gran experimento de fusión, al que a día de hoy se da el nombre genérico de "DEMO" (de *demonstration reactor*). Las diferencias

/// Figura 2. Vista general del experimento ITER //////////////////////////////////////



Fuente: www.iter.org

principales con ITER serían: operación continua, 24 horas al día 7 días a la semana, diseño que permita minimizar los tiempos de parada para mantenimiento, materiales de baja activación y autosuficiencia en tritio (manto fértil). Finalmente, DEMO, que comenzaría su operación en los años 2040, tendría un sistema de extracción de energía que alimentaría una central eléctrica conectada a la red.

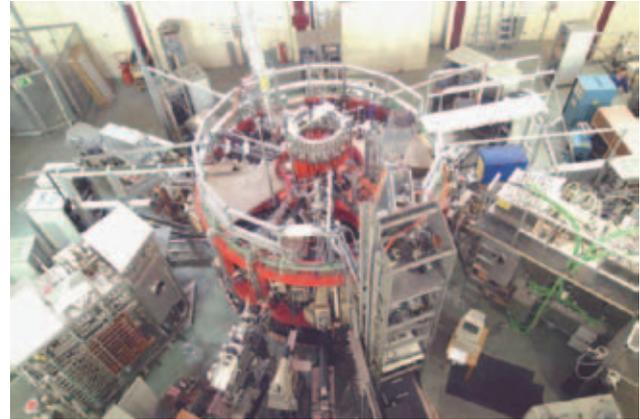
Dada la proximidad de DEMO a la fase comercial, no es descartable que, aún siendo su coste incluso superior al de ITER, existan varios DEMO en paralelo, promovidos por grupos de países o países en solitario. No debemos perder de vista que el mercado de la energía es del orden de varios billones (10^{12}) de euros anuales, centenares de veces el coste completo del proyecto ITER.

El papel de España en el programa de fusión

España participa, a través del CIEMAT, en el programa europeo de fusión desde los años 80 y lo hace en sus dos vertientes: los sistemas de confinamiento, con el tokamak TJ-I (1983-93) y el “stellarator” TJ-IU (1993-97), por un lado, y los materiales bajo irradiación, por otro. En 1998 entra en servicio el dispositivo TJ-II, la gran apuesta española en el campo

de la fusión. TJ-II es un “stellarator”, un sistema de confinamiento de geometría toroidal pero con una filosofía de diseño diferente a la de los “tokamak”. Pese a presentar una mayor complejidad y un mayor coste de construcción que un tokamak de tamaño equivalente, los stellarators ofrecen la posibilidad de operar en estado estacionario (el tokamak es intrínsecamente pulsado) y una mayor estabilidad, lo que hace de esta configuración un candidato ideal para su uso en los futuros reactores comerciales. Existen stellarators en operación en España (1), Japón (2), Rusia (1), EEUU (1), Australia (1) y Alemania (1). Este último país está construyendo el dispositivo superconductor W7X que comenzará su operación en 2014 y será el mayor del mundo.

Con el comienzo de la construcción de ITER, el programa español se ha ido readaptando para participar y tener un mayor papel en los desarrollos de tecnología de fusión. Como resultado, España participa, a través de consorcios internacionales, en numerosos subsistemas del proyecto ITER (instrumentación y medida, módulos de manto fértil, mantenimiento remoto, sistema de control...) y del proyecto IFMIF. Otros elementos importantes en el programa español han sido el lanza-



El stellarator español TJ-II, situado en el CIEMAT. Fuente: CIEMAT

miento de la ICTS “Technofusion”, orientada al desarrollo de materiales, aplicaciones de metales líquidos y sistemas de mantenimiento remoto, o el proyecto Consolider “Tecnología de Fusión”, encaminado al desarrollo de la tecnología del manto fértil.

Un resultado importante de la existencia de un sólido programa español de fusión fue la capacidad para competir a nivel europeo por la sede del proyecto ITER. La calidad de la candidatura de Vandellós como posible emplazamiento permitió pasar con éxito todos los exámenes técnicos. Al final, el acuerdo político de finales de 2003 dio el emplazamiento a Cadarache, pero España consiguió la sede de la oficina técnica de adjudicación y seguimiento de contratos, situada en Barcelona, que

cuenta con trescientas personas y manejará un presupuesto cercano a los 6.000 millones de euros durante la construcción de ITER.

Finalmente, es obligado destacar el excelente papel que la industria española está teniendo en la construcción de ITER. Nuestro país es el segundo, tras Francia, en número de ofertas presentadas a las licitaciones y el tercero, tras Italia y Francia, en presupuesto total adjudicado. El dato es aún más relevante si tenemos en cuenta que uno de los contratos en manos de empresas españolas es el de la construcción de las grandes bobinas superconductoras de campo toroidal, verdadero “corazón tecnológico” del proyecto, adjudicado a un consorcio hispano-italiano, liderado por Iberdrola Ingeniería. ■



HACE 20 AÑOS NACIÓ
LA PERSONA QUE
AYUDARÁ A LOCALIZAR
30 NUEVOS PLANETAS.

Probablemente ellos no lo sepan, pero el futuro los está esperando con pequeños y grandes proyectos. Por eso en **Santander Universidades** apoyamos a los estudiantes hoy. Porque ellos son nuestro mañana.

- 14 años apoyando a la Universidad.
- Dedicando 100 millones de euros al año.
- 17.147 becas al año para universitarios.
- Impulsando Universia: Red de Universidades.
- Colaborando con 933 Universidades en 22 países.



Santander
UNIVERSIDADES

EL VALOR
DE LAS IDEAS

El bosón “de Higgs”

El Large Hadron Collider del CERN (LHC) es, entre otras cosas, una máquina de sacudir el vacío, ya que su principal objetivo es encontrar el bosón de Higgs o demostrar que no existe. En general, demostrar que algo no existe es imposible. El éxito del experimento de Michelson y Morley fue su fracaso. Asimismo, el máximo éxito del LHC consistiría en demostrar que no existe el Higgs. Esto nos situaría en una tesitura científica prerrevolucionaria, quizás análoga a la que tuvo lugar en el albor del siglo XX.

Álvaro de Rújula

CSIC, UAM, CERN y Boston University

El modelo estándar

Hace 124 años Michelson y Morley publicaron su crucial experimento. Se trataba de medir el movimiento de la Tierra con relación al *éter*, la interpretación newtoniana del vacío como la trama del espacio absoluto. Mucho después aún estamos intentando entender *el vacío*, con medios como el tupido entramado de aceleradores del CERN (Figura 1) y varios de sus detectores, como CMS y ATLAS (Foto 1) que ya no son experimentos de mesa. El fracaso de Michelson y Morley acabaría apuntalando la visión eins-

teniana: el vacío no es un escenario en el que las cosas están o se mueven. Al contrario, esas mismas cosas configuran el espacio-tiempo en el que están.

Las “teorías cuánticas relativistas” predictivas –llamadas teorías de *campos* “renormalizables”– tienen la particularidad de que, en ellas, lo que no está prohibido es obligatorio, como en las dictaduras. Para que la teoría prohíba un proceso no observado es necesario que una simetría de la teoría lo haga. De otro modo las correcciones “cuánticas”

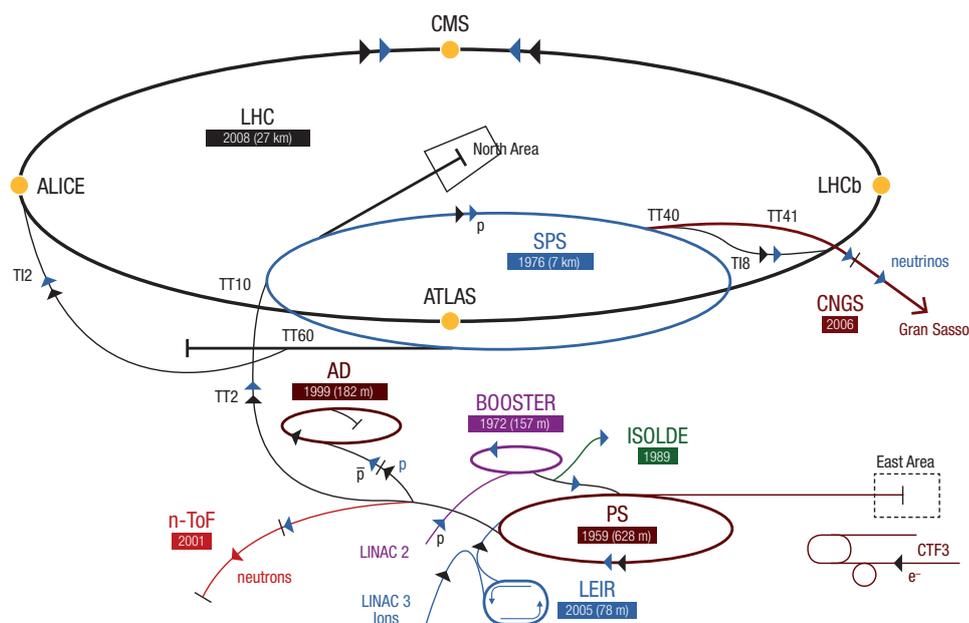
(en potencias sucesivas de la constante de Planck) lo generarán, con una amplitud impredecible, para más *inri*.

El modelo estándar es una tal teoría, en la que se basa nuestro entendimiento de las partículas elementales y sus interacciones. *Ab initio*, una de sus simetrías, misteriosamente llamada “de calibre (gauge)” prohíbe que las partículas tengan las masas no nulas que caracterizan a su gran mayoría; solo fotones y “gluones” tienen masas cero. Romper la simetría a mano no funciona, la teoría pierde su capacidad

predictiva, adquiriendo infinitos parámetros arbitrarios. En nuestro inescrutable lenguaje litúrgico, la teoría deja de ser renormalizable.

Para salir del atolladero es necesario que la rotura de la simetría sea “espontánea”. Un perdigón en el fondo de una probeta vertical está en una posición simétrica (en el eje) y estable (en el fondo). Calentemos la probeta y deformémosla hasta que su fondo se parezca al de una botella. Si realizamos la operación con inconmensurable destreza, la bola se quedará en el eje, po-

/// Figura 1. El “complejo” complejo de aceleradores del CERN, en la mejor tradición de la relojería helvética



Los protones (iones pesados) se aceleran inicialmente en los aceleradores LINAC2 y Booster (LINAC3). Son transferidos al PS (que es un veterano de 62 años). De ahí pasan al SPS, siempre acelerándose en cada anillo. Finalmente son transferidos para acelerarse y colisionar en los dos anillos del LHC, que tienen 27 km de circunferencia.

Fuente: CERN.

sición simétrica, pero inestable. De otro modo se caerá en una dirección cualquiera; la simetría original se ha roto espontáneamente: hay una dirección preferente, que pudiera haber sido cualquier otra. Como en un ferromán “de Heisenberg” en el que los espines de los átomos interactúan entre ellos y, por debajo de una temperatura crítica, se alinean espontáneamente. La teoría tiene una simetría (to-

das las direcciones son equivalentes) aunque sus soluciones de mínima energía (el imán frío) apunten en una dirección espontáneamente generada.

El mecanismo de Higgs

La energía gravitacional o la de interacción entre espines del párrafo anterior se describen como “potenciales” de interacción. El modelo estándar incluye el potencial de un hipotético *campo escalar* (de espín cero):

el campo “de Higgs”. En el estado de mínima energía (¡el vacío!), el campo rompe la simetría gauge y una de sus componentes, que es neutra, adquiere un valor constante no nulo (su valor en el vacío). La teoría “rota” tiene pues un vacío que no está vacío, sino permeado por una “substancia”: un campo constante. A diferencia del viejo éter, este vacío es invariante relativista (es el mismo para un observador que para otros en movimiento respecto a él) y hasta invariante general-relativista (el valor del campo en el vacío no se diluye, aunque el universo se expanda).

Una vez añadido el campo escalar, todo lo del párrafo anterior “le pasa” al modelo estándar, pero también –inevitablemente– le pasan otras cosas. Las partículas de espín $\frac{1}{2}$ (como el electrón y los quarks) adquieren masa, puesto que su interacción con el vacío –que ya no lo está– tiene ahora la forma (única e inevitable) de un “término” de masa. Algo aún más sorprendente le pasa a los “bosones intermedios” (W^+ , W^- y Z^0), las partículas de espín 1 mediadoras de las interacciones débiles, responsables, por ejemplo, de la radiactividad natural. De entrada tienen masa nula y, como el fotón, dos estados de polarización. Una vez que la simetría de gauge está rota, adquieren masa, lo cual requiere un tercer es-

El modelo estándar es una tal teoría, en la que se basa nuestro entendimiento de las partículas elementales y sus interacciones

tado de polarización o “grado de libertad”. Este grado lo heredan de las otras tres componentes del campo de Higgs, que de entrada tiene cuatro: dos eléctricamente cargadas y dos neutras, solo una de las cuales sobrevive como el campo que “llena” el vacío.

Hay que admitir que todo lo anterior suena a cuento, pero no lo es: el modelo estándar describe lo observado con precisión impresionante. Su parte mejor comprobada es la “electrodinámica cuántica”: la interacción del fotón con las partículas cargadas (la carga eléctrica es la capacidad de emitir o absorber fotones). Puede uno predecir, por ejemplo, el cociente giro-magnético del electrón: la intensidad con la que se comporta como un imán puntual. Observación y teoría son crecientemente precisas y coinciden hoy en día en 14 (¡catorce!) cifras significativas. Las interacciones fuertes (entre quarks) y débiles no están medidas con precisión tan espeluznante, pero sí la suficiente como para indicarnos que vamos por buen camino. El cociente de masas $M(W)/M(Z)$, siendo M la masa y W y Z los bosones intermediarios, es el predicho por el “mecanismo” de Higgs que he esbozado.

El bosón de Higgs

A todo este edificio estándar le falta una constatación: el des-



Álvaro de Rújula.

cubrimiento del “bosón de Higgs”. Ya va siendo hora de recordar que un bosón es una partícula de espín entero, como el fotón, cuyo espín es la unidad. Un fermión (como el electrón) es una partícula de espín semi-entero ($1/2$ en este caso). Los fermiones son asociados: solo cabe uno en un estado cuántico determinado. Los bosones, como los hinchas, son lo contrario: añadirlos sucesivamente en el mismo estado cuesta cada vez menos energía.

Al sacudir una substancia cualquiera, vibra. Las vibraciones de campos electromagnéticos, por ejemplo, son la luz. A un nivel elemental, las vibraciones son cuantos (o partículas): fotones este caso. Si existe una substancia, el campo de Higgs que permea el vacío, la podríamos también “sacudir” con energía suficiente

Álvaro de Rújula

Doctor en Física Teórica por la Universidad Complutense de Madrid, de la que fue profesor. Impartió clases en el Institut des Hautes Études Scientifiques (IHES) de París y en la Universidad de Harvard. Forma parte, desde 1977, del equipo del Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) y es docente de la Universidad de Boston, desde 1985. Es colaborador del premio Nobel de Física Sheldon Glashow.

Miembro electo de la Academia Europea, desde 1991; del Instituto de Física Teórica UAM/CSIC y del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), desde 2009

Como físico teórico, de Rújula se ha ocupado de diversos temas clave de esta disciplina, tanto de asuntos que tienen que ver con la estructura interna del átomo como de cuestiones relacionadas con la Cosmología y la Astrofísica. Es uno de los principales investigadores del equipo del CERN que ha puesto en marcha el Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

como para crear sus correspondientes cuantos (bosones de Higgs) de masa aún desconocida.

En buena liza, el bosón de Higgs debería llamarse de Peter Higgs, François Englert y Robert Brout y quizás de algunos más. Los físicos de partículas hemos perdido con este bosón la ocasión de darle un mejor nombre; algunos intentos que no citaré son patéticos. La tradición es bautizar a las partículas con nombres absurdos, como “quarks” y a las teorías con nombres engañosos y rimbombantes, como “cromodinámica cuántica”. Siguiendo una más antigua tradición, opino que, el bosón de Higgs debería de llamarse el “kenonón”, del griego κενον, “vacío”. Sin denuncia poética, lo solemos llamar “el Higgs”. Como quién dijese “el Litri”.

EL LHC

El Large Hadron Collider (LHC) del CERN es un colisionador de hadrones: partículas constituidas por quarks o por quarks y antiquarks, cuyas interacciones “cromodinámicas” están mediadas por gluones y son fuertes. Protones, neutrones y los núcleos de los átomos son hadrones, $P=(uud)$, $N=(udd)$, siendo u y d los quarks “up” y “down” (como de costumbre, ni *up* ni *down* tienen el sentido que debería ser habitual).

En el LHC se hacen colisionar desde protones hasta núcleos de plomo. Por ahora la energía de los protones es de 3.5 teraelectronvoltios (TeV), unas 3.740 veces su energía en reposo, mc^2 . Lo suficiente como para batir por un factor 7 el record anterior, del colisionador en Fermilab, también cerca de Ginebra, pero Geneva, Illinois. La luminosidad de un colisionador



Foto 1. Una vista parcial de ATLAS, uno de los detectores del LHC, en su subterráneo punto de colisión, durante su ensamblaje. Atlas mide 25 m de alto y 46 de largo y pesa 7.000 toneladas, casi como la torre Eiffel. El detector incluye 3.000 km de cables y tiene 100 millones de canales electrónicos, además de incontables componentes de variadas tecnologías de punta. Fuente: CERN.

(veces la sección eficaz del proceso de colisión) es la cadencia de las colisiones. El LHC progresa rápidamente hacia su luminosidad de diseño, pero de momento funciona solo a la mitad de su energía máxima.

La máquina consta de dos anillos que guían y aceleran partículas en direcciones contrarias y las hacen colisionar en cuatro puntos, véase la Figura 1. Los protones le llegan al LHC parcialmente acelerados en una tortuosa serie de aceleradores “antiguos”. En los puntos de colisión del LHC hay un par de experimentos pequeños (TOTEM y LHCf) y cuatro medianos: ATLAS (Foto 1), CMS, LHCb y ALICE. No

caeré en el error, ya inevitable en el caso del LHC, de llamarlos “grandes”. En realidad estamos siempre proyectando otros mayores.

A la caza del Higgs

La mayoría de las partículas que existen son inestables y, a primera vista, inútiles. Para estudiarlas, primero hay que crearlas. Para ello es necesario producir colisiones de una energía (en el “centro de masa”) superior a la energía en reposo de la partícula en cuestión. A los “particularos” nos resulta más fácil decir estas cosas, puesto que no distinguimos entre energía y masa. Por ejemplo, en la fórmula $E = mc^2 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$, pone-

mos la velocidad de la luz $c=1$, una simple elección de unidades. Si medimos tiempos en nanosegundos y distancias en unidades de “mi pié izquierdo”, $c=1$ puesto que dicho pié (de unos 30 cm) mide precisamente (por definición) lo que la luz en el vacío recorre en un nanosegundo. Por cierto, la consabida $E = mc^2$ es falsa. Es válida para un objeto en reposo, en cuyo caso es casi tautológica.

El LHC es, entre otras cosas, un MSV (Máquina de Sacudir el Vacío) ya que su principal objetivo es encontrar el bosón de Higgs o demostrar que no existe. En general, demostrar que algo no existe es imposible. Este caso es una excepción. Con un Higgs de masa superior a 1 TeV, el modelo estándar violaría la “unitariedad”: predeciría absurdamente procesos con probabilidad superior al 100%. El LHC alcanza para fabricar objetos de masa 1 TeV, y si no encuentra el Higgs, después de algunos años buscándolo, es que no existe. O tiene propiedades significativamente distintas a las previstas, en cuyo caso no es “el” Higgs.

El proceso más probable de producción del Higgs es el de la Figura 2. Curiosamente tendría lugar a través de un “triángulo virtual” de quarks “top”. La razón es que este

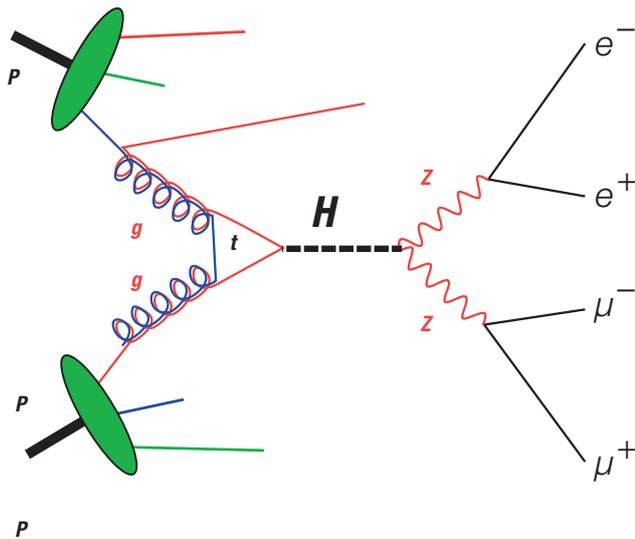
quark es el más masivo y el Higgs se “acopla” a las partículas proporcionalmente a su masa: así es como el campo de Higgs en el vacío genera las masas.

El proceso de desintegración del Higgs que mejor permitiría medir sus propiedades –y saber si su identidad es la que le atribuimos– está también esbozado en la Figura 2. La razón es que electrones o sus “réplicas” inestables de mayor masa, los muones, son las partículas cuya energía y dirección pueden medirse con mayor precisión, permitiendo determinar bien el espín y “acoplamientos” del Higgs.

Colofón

Ha renacido como venganza póstuma la vieja idea de Einstein que él repudió al enterarse de que el universo no era estático: la “constante cosmológica (Λ)”, el único ente estático que puede ejercer una *repulsión* gravitacional. Einstein la introdujo para estabilizar el universo artificialmente contra la atracción gravitacional entre las galaxias, que lo colapsaría. El universo está en expansión *acelerada*. Esto implica que Λ no es nula, como opinábamos hasta hace poco sin saber porqué. Todos los datos concuerdan con la posibilidad de que dicha Λ sea la responsable de la aceleración observada.

/// Figura 2. El proceso dominante de producción de un bosón de Higgs, H, en la colisión de dos protones, P. //



Las líneas delgadas de color son quarks. Las dobles espirales (g) gluones. La t denota un "bucle" (loop) del quark "top". Las dos Z son bosones intermedarios y las líneas negras un electrón, un positrón, un muón y su antipartícula.

Fuente: CERN.

En terminología actual, Λ es la densidad de energía del vacío. Entendemos el modelo estándar lo suficiente como para estimar cuánto el campo de Higgs contribuye a la diferencia de potencial –o densidad de energía– entre el falso vacío inestable (la bola en lo alto del trasero de la botella) y el verdadero vacío (la bola abajo). La gravedad responde directamente a la densidad de energía (e impulso) y no, como las demás fuerzas, solo a diferen-

cias de potencial. La contribución del campo de Higgs a la constante cosmológica debería ser del orden de la diferencia de potencial entre vacíos falso y verdadero. Pero el resultado de esta estimación es unos 54 (cincuenta y cuatro) órdenes de magnitud superior a las observaciones cosmológicas. Tiene su mérito incurrir en tamaña contradicción.

Quizás comprendamos por qué las partículas tienen masa,

pero no por qué tienen los valores de masa que tienen. Hemos visto otros defectos de nuestro entendimiento del vacío y de un campo que supuestamente lo permea. Queremos saber más, de ahí el encono en buscar el Higgs, o algo que se le parezca. O que no se le parezca.

El éxito del experimento de Michelson y Morley fue su fracaso. Asimismo, el máximo éxito del LHC consistiría en demostrar que no existe el Higgs. Esto nos situaría en una tesitura científica prerrevolucionaria, quizás análoga a la que tuvo lugar en el albor del siglo XX. Cedo al amable lector el reto de convencer a las autoridades competentes (con su siempre superior criterio) de que el mayor descubrimiento sería, en este caso, *no* encontrar lo que uno busca.

Apéndice: una labor global

En el CERN trabajan unos 2.300 empleados, 20 de ellos, físicos teóricos con contratos de tres o más años. Hay también unos 7.000 "usuarios", estudiantes, científicos, ingenieros y técnicos de unos 70 países, muchos de ellos, como Suiza y España, multilingües. Un aguerrido lingüista podría detectar centenares de idiomas en las babélicas cafeterías del CERN, o dialectos de países –como Italia o Francia– en los que no son armas el idioma y la poesía. En total,

en los experimentos del LHC, trabajan unos 330 españoles.

El presupuesto del CERN, pagado por los veintipocos países miembros proporcionalmente a su producto interno bruto (con un tope de 20% del presupuesto para Alemania), es de unos mil millones de francos suizos al año, a los que España contribuye aproximadamente con un 7%. Esto significa que los españoles contribuimos cada uno a razón de un euro al año.

Es difícil sobrestimar el impacto de la investigación fundamental en la Economía, Tecnología o Medicina a plazo fijo, relacionado frecuentemente con las próximas elecciones. Me limitaré a dar el ejemplo consuetudinario de la flauta que sonó, aunque no por casualidad. El Hipertext Transfer Protocol (el misterioso "http" de las páginas web) fue inventado en el CERN por Tim Berners-Lee. Es la base de la explosión del uso de Internet. Berners-Lee, con el beneplácito inicialmente escéptico y la indispensable libertad académica que le otorgaban sus jefes, se propuso encontrar un lenguaje universal con el que grupos de físicos pudieran intercambiar datos, independientemente del tipo de ordenadores que empleasen. Y dio en un clavo sin fronteras, como el propio CERN. ■

Glosario de materia y energía

antipartícula. A cada partícula de la naturaleza le corresponde una antipartícula, que posee la misma masa, el mismo espín, pero distinta carga eléctrica. Algunas partículas son idénticas a su antipartícula, como por ejemplo el fotón. Si bien no todas las partículas de carga neutra son idénticas a su antipartícula.

antiquark. Antipartícula que corresponde a un quark. El número de tipos de quarks y antiquarks en la materia es el mismo. Se representan con los mismos símbolos que aquellos, pero con una barra encima de la letra correspondiente, por ejemplo, si un quark se representa con u , un antiquark se escribe \bar{u} .

bosón de Higgs. Partícula elemental que queda por descubrir para cerrar con éxito el denominado modelo estándar de la Física de partículas. El hallazgo de su existencia es clave para entender la forma en que las demás partículas adquieren masa.

bosón. Uno de los dos tipos básicos de partículas elementales, de espín entero (el otro tipo son los fermiones, de espín semientero).

brana. Una palabra inglesa que quiere decir membrana multidimensional, esto es un subespacio de un espacio más grande. Por ejemplo, una 2-brana es una membrana ordinaria (una superficie de dos dimensiones).

campo gauge. Los campos gauge son generalizaciones del electromagnetismo, y describen las interacciones fundamentales. El campo de color (cromodinámica cuántica) cuyas partículas asociadas son los ocho gluones, describe las interacciones fuertes, mientras que el campo electrodébil (cuyas partículas asociadas son los bosones W^+ , W^- , Z^0 y el fotón) describe las interacciones electromagnéticas y las débiles.

campo. Ente básico que describe las partículas elementales y sus interacciones. El campo gravitatorio hace caer la manzana y orbitar la luna. El campo electromagnético

media las fuerzas correspondientes. Los campos "cuánticos" tienen un comportamiento "dual": sus vibraciones son partículas (fotones) y ondas. Un campo cuántico relativista es uno que satisface los postulados de las correspondientes –y altamente comprobadas– teorías.

carga de color. Propiedad de los quarks y los gluones que cuantifica su capacidad de emitir o absorber gluones, mediadores de la interacción fuerte en el contexto de la cromodinámica cuántica (QCD).

constante de acoplamiento. Cantidad que determina la amplitud de una interacción. La carga eléctrica es un ejemplo, en el caso de la interacción de fotones con partículas cargadas.

constante de Plank. Relación entre la cantidad de energía y de frecuencia asociadas a una partícula. Desempeña un papel central en la Mecánica cuántica. Si la anulamos a mano, obtenemos la Mecánica clásica.

corrección cuántica. Hay cantidades que son intrínsecamente cuánticas, como el espín, que no tiene análogo clásico. Pero en otros casos, al calcular el valor de un observable, hay una contribución clásica, a la que hay que añadirle una corrección cuántica proporcional a la constante de Planck.

cromodinámica cuántica. (QCD). Teoría cuántica de campos que describe una de las fuerzas fundamentales, esto es, la interacción fuerte que es la responsable de las fuerzas entre quarks.

clitón. Hipotética partícula que aparece en la teoría de cuerdas.

espín. Es un efecto cuántico que implica que existe un momento angular residual incluso en el sistema de referencia en el que la partícula está en reposo. Si el espín es entero, (0, 1, 2) se dice que la partícula es un bosón, y si es semientero (1/2, 3/2), se dice que es un fermión. El principio de exclusión de Pauli, que afirma

que dos fermiones idénticos no pueden estar en el mismo nivel cuántico, es el que explica la estructura de la tabla periódica de Mendeleev.

fonón. Cuasipartícula o modo cuantizado de vibración que tiene lugar en redes cristalinas, como la red atómica de un sólido.

fotón. Partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Es la partícula que media las fuerzas eléctricas y magnéticas y que constituye todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio.

gluón. Bosón portador de la interacción "cromodinámica" o fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales. No posee masa ni carga eléctrica, pero sí carga de color, por lo que además de transmitir la interacción fuerte también la sufre.

gravitón. Partícula elemental hipotética de tipo bosónico que sería la transmisora de la interacción gravitatoria en la mayoría de los modelos de gravedad cuántica.

leptón. Fermión fundamental sin carga hadrónica o de color. Existen seis leptones y sus correspondientes antipartículas: el electrón, el muón, el tau y tres neutrinos asociados a cada uno de ellos.

modelo estándar de la Física de partículas. Teoría que describe las relaciones e interacciones conocidas entre las partículas elementales que componen la materia. Sin embargo, el modelo estándar no alcanza a ser una teoría completa de las interacciones fundamentales, puesto que no incluye una teoría cuántica de la gravitación, la cuarta interacción fundamental conocida.

principio de incertidumbre de Heisenberg. La naturaleza dual de los "campos" que describen los aspectos "onda" y "partícula" de objetos tales como la radiación electromagnética, impone restricciones en

la capacidad para determinar al mismo tiempo su posición y su impulso, u otros pares de observables "complementarios".

quarks. Partículas fundamentales con carga "fuerte" y carga eléctrica fraccionaria. Dos de ellos (up y $down$) son los constituyentes de protones y neutrones.

simetría. Equivalencia de varias posibilidades. En un espacio vacío, todas las direcciones son equivalentes. Un cubo perfecto tiene una simetría menor (solo giros de 90 grados lo dejan como estaba). Algunas simetrías son "internas" (en "espacios" definidos matemáticamente). Por ejemplo el quark up y el quark $down$ son idénticos, si despreciamos sus diferentes masas y cargas eléctricas. "Apuntan" up o $down$ en un espacio "interno".

supersimetría. Simetría hipotética que relaciona las propiedades de los bosones y los fermiones. Aunque no se ha verificado experimentalmente que se trate de una simetría de la naturaleza, constituye una parte fundamental de muchos modelos teóricos, incluyendo la teoría de supercuerdas. La supersimetría también es conocida por el acrónimo inglés SUSY.

teoría de cuerdas. Modelo de la Física que supone que las partículas no son un "punto" sin estructura interna y de dimensión cero, sino una cuerda minúscula que vibra en un espacio-tiempo de más de cuatro dimensiones. Esta teoría, ampliada con otras como la de las supercuerdas o la Teoría M, pretende alejarse de la concepción del punto-partícula.

teoría M. Hipotética teoría que, partiendo de la teoría de cuerdas, pretende convertirse en una "teoría del todo" capaz de unificar las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Imaginada por Edward Witten, combina las cinco teorías de supercuerdas y supergravedad en once dimensiones.

Teoría M (Cuerdas)

¿De qué están hechas las cosas? Esta es una pregunta tan vieja como el mundo. Todos sabemos que existen las moléculas, que están formadas por átomos, que a su vez contienen electrones y núcleos en los que hay protones y neutrones, constituidos por quarks y gluones, etc. Pero, ¿tiene final esta lista o cada vez que aumentamos nuestra capacidad de percepción aparecerán nuevas capas en esta cebolla cósmica?

Enrique Álvarez

Universidad Autónoma de Madrid

La teoría actual de partículas elementales se conoce con el nombre de *modelo estándar*, lo que indica la quizás excesiva confianza de los físicos. Para futura referencia, es conveniente distinguir entre las partículas que describen la *materia*, como los quarks, y las que describen las *interacciones*, como los fotones. Otro concepto importante es que, debido al principio de incerti-

dumbre de Heisenberg, para explorar experimentalmente distancias cada vez más pequeñas es necesario dotar a las partículas de energías cada vez más grandes, lo que se consigue mediante los grandes aceleradores, como el LHC (*large hadron collider*) en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) en Ginebra, que es en la actualidad el más potente en funcionamiento.

Conocemos cuatro (y solo cuatro) interacciones fundamentales: dos de largo alcance (y, por consiguiente, que se manifiestan macroscópicamente), las *electromagnéticas* y las *gravitatorias*, y dos de corto alcance (del orden del radio de un núcleo, 10^{-13}), las *fuertes* (responsables de la ligadura de los quarks en las partículas elementales) y las *débiles* (responsables de la radiactividad beta). Todas las

El modelo estándar describe con precisión las interacciones fuertes, las electromagnéticas y las débiles



Enrique Álvarez.

Para futura referencia, es conveniente distinguir entre las partículas que describen la materia, como los quarks, y las que describen las interacciones, como los fotones

interacciones son, en principio, reducibles a estas cuatro fundamentales. En particular, la Química (y por consiguiente toda la Biología) es reducible a la interacción electromagnética, al igual que toda

la Física de la materia condensada. Al nivel de las partículas elementales, la gravitación es, con mucho, la más débil y no se espera que sus efectos sean importantes hasta que no se alcance una energía por partícula del orden de la llamada energía de Planck, que es unas 10^{16} veces más grande que la que es posible alcanzar en el LHC.

El *modelo estándar*, al que aludíamos más arriba, describe con precisión las interacciones fuertes, las electromagnéticas y las débiles. Todas las interacciones se describen mediante *teorías gauge*, generalizaciones del electromagnetismo. De la misma forma que el fotón está asociado al campo electromagnético, todos los campos que representan las interacciones fun-

Enrique Álvarez

Doctor en Ciencias Físicas en el año 1975 con el profesor Lluís Bel. Fue investigador visitante en París, Princeton y Harvard, y ha pasado largos periodos en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) en Ginebra.

Su investigación se centra en la teoría cuántica de las partículas elementales, en particular, en la gravedad cuántica y teorías de cuerdas.

En la actualidad trabaja en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid y en el Instituto de Física Teórica UAM/CSIC, situado en el Campus de Cantoblanco.

damentales poseen su propia partícula asociada. Es importante mencionar que todavía falta por encontrar la partícula de Higgs, uno de los principales retos del LHC, y cuya existencia es esencial para explicar las masas de los bosones intermedios W^\pm y Z^0 de las interacciones débiles, por cuyo descubrimiento en el CERN consiguieron el premio Nobel los físicos van der Meer y Rubbia en el año 1984.

Pero ni el modelo estándar ni ninguna de sus extensiones son capaces de incorporar la gravitación. La razón por la que es difícil incorporar la gravitación es que al calcular efectos cuánticos se obtienen resultados que divergen de tal forma que no es posible absorber estas divergencias en un número finito

de parámetros (este fenómeno se conoce como *renormalización*, e implica que las cargas y las masas observadas experimentalmente son la suma de una contribución *libre* y de la contribución de la *interacción*. Ambas son divergentes, pero de modo que su suma es finita y coincide con el dato observado), como sí que sucede con las masas y las cargas en el modelo estándar, que es *renormalizable*, en el sentido anterior. Por otra parte, hay indicaciones de que no es posible tratar la gravitación haciendo abstracción de las otras interacciones fundamentales de la naturaleza. La razón es que la gravitación se acopla *universalmente* (esto es, con la misma intensidad) a todas las formas de materia/energía. Entonces, en el estudio de la resistencia a la propagación de un gravitón, por ejemplo, *todas* las formas de materia tienen exactamente la misma importancia.

Fue en ese contexto en el que se resucitó las *teorías de cuerdas* a principios de los años ochenta del pasado siglo. La base de estas teorías radica en postular que las entidades fundamentales no son partículas, sino objetos extensos que se denotan como *cuerdas*. Decimos resucitar porque realmente las cuerdas se habían propuesto para explicar las interacciones fuertes. Esa

línea se abandonó al descubrirse una explicación mucho más sencilla, la *cromodinámica cuántica* (QCD), por la que Gross y Wilczek consiguieron el premio Nobel en 2004. Además, las cuerdas tenían sus propios problemas de consistencia interna. En particular, no existe para ellas un estado fundamental de mínima energía (hay una excitación de masa imaginaria en su espectro de forma que la energía correspondiente es negativa y, de hecho, carece de cota inferior). Sin embargo los investigadores se dieron cuenta de que cambiando la escala de energía de las interacciones fuertes a la (mucho mayor) correspondiente a las interacciones gravitatorias, esto es, a la equivalente a la masa (energía) de Planck y postulando la existencia de una simetría entre materia e interacción, llamada supersimetría, desaparecía esa excitación de masa imaginaria del espectro y la teoría incorporaba de manera natural la gravitación de Einstein en su límite de muy baja energía. Para que esto fuese consistente había también que postular la presencia de dimensiones adicionales, ya que la teoría necesita 10 dimensiones en vez de las cuatro usuales. Naturalmente, esto solo es posible si estas dimensiones se cierran sobre sí mismas formando círculos de muy pequeño radio, de forma que son inobserva-

Conocemos cuatro (y solo cuatro) interacciones fundamentales: dos de largo alcance, las electromagnéticas y las gravitatorias, y dos de corto alcance, las fuertes (responsables de la ligadura de los quarks en las partículas elementales) y las débiles (responsables de la radiactividad beta)

bles a no ser que se disponga de la energía suficiente como para poder resolver esta escala de distancias (recordemos, una vez más, la relación entre distancia y energía impuesta por el principio de incertidumbre).

Por primera vez se disponía de un modelo que no era obviamente inconsistente para una unificación de la gravitación y la Mecánica cuántica. En el modelo hay cuerdas abiertas con sus extremos libres, y cuerdas cerradas como lazos. Hay dos parámetros en la teoría: la *tensión de la cuerda*, que se suele expresar en función de la *escala de longitudes de la cuerda*, l_s , que indica cuán diferente es una cuerda de un conjunto de campos cuánticos, que son las entidades que describen la dinámica de las partículas elementales (en el límite en el que $l_s = 0$ la cuerda se reduce a un punto, lo que físicamente es equivalente a una partícula). El otro parámetro es la constante de acoplamiento, que está determinada por el valor de un campo llamado *dilatón*, y que indica la probabilidad de que una cuerda abierta se convierta en cerrada. El nombre *dilatón* procede del hecho de que este campo refleja el comportamiento del sistema bajo dilataciones. Nuestra capacidad de extraer predicciones de la teoría depende en gran medida de que

esa *constante* de acoplamiento sea suficientemente pequeña como para poder utilizar una técnica conocida como *teoría de perturbaciones* (que consiste en partir de un resultado conocido, y tratar la interacción como una pequeña modificación del mismo); como hemos visto, ello depende de la intensidad del campo del dilatón.

Las partículas elementales no son, desde este nuevo punto de vista, más que excitaciones cuantizadas de la cuerda, esto es una serie de niveles discretos de energía; algo así como los niveles discretos de un átomo o un núcleo. Después de todo, en Mecánica cuántica existe la dualidad onda/partícula, y en las cuerdas se realiza de una manera natural.

Las excitaciones de las cuerdas abiertas son campos gauge, que, como hemos visto al principio, son los que describen las interacciones fundamentales; entre las excitaciones de las cerradas está el gravitón, el hipotético cuanto de la gravitación, que también se puede considerar como una especie de teoría gauge.

Sin embargo no hay una teoría de cuerdas única, sino cinco, aparentemente muy diferentes. A título meramente taxonómico son: *Tipo I* $SO(32)$, que es la única que contiene cuerdas abiertas y cerradas, y

Sin embargo no hay una teoría de cuerdas única, sino cinco, aparentemente muy diferentes

otras cuatro que solo contienen cuerdas cerradas, a saber *IIA*, *IIB*, *Heterótica E8 × E8* y *Heterótica SO(32)*. Esto resulta un poco embarazoso para una teoría que pretende conseguir una descripción unificada de todas las interacciones. Sin embargo, los investigadores comenzaron a descubrir relaciones entre estas cinco teorías.

Típicamente estas relaciones, llamadas *dualidades*, relacionan una teoría en acoplo débil (es decir, que la constante de acoplo es pequeña y la teoría de perturbaciones es válida) con otra teoría en acoplo fuerte (en la que la constante de acoplo es grande y la teoría de perturbaciones no se puede aplicar). Este mismo fenómeno hace que sea muy difícil verificar explícitamente que esas dualidades son correctas. Hay algunas condiciones necesarias obvias para que las dualidades sean válidas como, por ejemplo, el espectro de niveles de energía ha de ser idéntico en las dos teorías. Todas las condiciones que se han podido estudiar hasta ahora se cumplen correctamente. Por otra parte, pronto apareció la necesidad de introducir *branas* (un neologismo para abreviar la expresión *membranas multidimensionales*), objetos de dos o más dimensiones espaciales (la cuerda tiene una

dimensión espacial) que son defectos topológicos en los que las cuerdas abiertas pueden colocar sus extremos. Por ejemplo, una membrana ordinaria, como la de un tambor, es una 2-brana. Antes dijimos que las cuerdas abiertas tienen extremos libres. Pues bien, resulta que estos extremos, necesariamente tienen que estar situados en una cierta brana de un tipo especial, que se llama D-branas (D es por Dirichlet, un matemático alemán del siglo XIX que estudió este tipo de condiciones de contorno en ecuaciones diferenciales). Lo que tienen de especial las cuerdas (que son 1-branas) respecto del resto de las branas es que es posible estudiar el espectro de energía de sus fluctuaciones cuánticas usando la teoría de perturbaciones, arriba mencionada.

El hecho de que la constante de acoplo venga determinada por el valor del dilatón, que es en sí mismo variable, condujo a la reinterpretación de ese dilatón como el radio de una cierta dimensión adicional; de hecho se demuestra que se puede introducir una teoría sin dilatón en una dimensión más, de tal forma que el radio de esa dimensión adicional esté relacionado con el dilatón (cuanto mayor sea el radio, más fuertemente acoplada está la correspondien-

te teoría de cuerdas): esta es la famosa *teoría M* en once dimensiones. Las dimensiones pueden ser pequeños círculos; entonces las llamamos *compactas*; las tres dimensiones ordinarias, en cambio, son *no compactas*, ya que se extienden indefinidamente. Cuando todas las dimensiones son no compactas esta teoría no tiene constante de acoplo, por lo que no tiene un análisis perturbativo fácil. Parece irónico que no sepamos mucho de nuestro candidato a teoría del todo.

En realidad solo sabemos a qué se parece esta teoría en el límite de gravitación débil, lo que según la relatividad general es equivalente a curvaturas pequeñas; en ese límite se convierte exactamente en una modificación de la relatividad general de Einstein, a saber, la gravedad supersimétrica, en concreto aquella que incorpora toda la supersimetría que es posible tener sin caer en inconsistencias. Contiene, además del gravitón (que recordemos que es la partícula asociada al campo gravitatorio), y de un campo de materia llamado *gravitino*, una brana de tres dimensiones espaciales y otra de cinco, relacionadas ambas mediante una simetría de *dualidad*, de la que hablábamos antes. También se conocen explícitamente ciertos

límites en los que la teoría M se reduce a alguna de las cinco teorías de cuerdas anteriormente mencionadas.

La situación se puede asemejar al mito platónico de la caverna: las únicas sombras que nos son accesibles de la teoría M son precisamente los rincones en los que las cinco diferentes teorías de cuerdas se pueden tratar de forma perturbativa (dilatón pequeño=constante de acoplo pequeña). Ello sucede cuando una de las once dimensiones es un círculo de radio muy pequeño que identificamos con el dilatón y, por consiguiente, con la constante de acoplo de la correspondiente teoría de cuerdas. Estamos muy lejos de entender qué se esconde detrás de esta *teoría M* en el caso general.

Los problemas para contactar con el mundo de baja energía, que en este contexto, quiere decir todo lo que sea mucho más pequeño que la escala de energía de Planck, proceden del hecho de la escala de compactificación; es decir, el *tamaño* de las dimensiones adicionales ha de ser suficientemente pequeño como para que todavía sean inobservables en los aceleradores actuales. La existencia de esta nueva escala de longitudes es inevitable, ya que

Pero ni el modelo estándar ni ninguna de sus extensiones son capaces de incorporar la gravitación

el mundo de baja energía (en el sentido antes indicado) *no* es supersimétrico (no hay una equivalencia entre materia e interacción) ni tiene más de cuatro dimensiones ordinarias (no compactas) visibles. Lo que ocurre a esa escala es un mecanismo que se conoce como *ruptura de simetría*. Para distancias más pequeñas que esa escala las once dimensiones de la teoría M son visibles y la supersimetría es exacta; para distancias mayores que la escala de la que estamos hablando, es decir, a distancias más grandes que la escala de compactificación, la teoría de cuerdas esconde sus peculiaridades *cuerdísticas*, y no resulta fácil observar sus predicciones, ya que aparece como una teoría de campos en cuatro dimensiones con ciertas peculiaridades no específicas de las cuerdas.

En conclusión, cuanto más se exploran diferentes aspectos de la *teoría M*, más misteriosa parece y nuevas avenidas, muchas veces inesperadas, se abren ante nosotros.

Está por ver si somos capaces de entender los principios físicos subyacentes y de efectuar predicciones específicas que podamos comparar con el experimento. El tiempo dirá.

Entretanto, quizá es conveniente destacar que la teoría

M/Cuerdas admite, en ciertas condiciones que no entendemos muy bien, regímenes perturbativos, en los que los acoplos son débiles, y que los cálculos realizables en estos regímenes conducen a la recuperación de resultados previamente conocidos (como la misma relatividad general). Esto es muy importante, ya que nos permite saber el terreno que pisamos. Existe una tendencia, en mi opinión, no justificada, a considerar irrelevante este hecho. Lo que yo creo es que, por el contrario, en todas las revoluciones que ha habido en Física hasta el momento precisamente estaba claro el límite en el que la nueva extensión revolucionaria se reducía a las teorías previamente existentes, acotando de esta forma sus rangos de validez, refiriéndose a las teorías anteriores (bajas velocidades en comparación con la velocidad de la luz en el vacío en el caso de la relatividad especial, o energías por tiempo pequeñas en relación con la constante de Planck en el caso de la Mecánica cuántica). En el caso de cuerdas este papel lo juegan, como hemos indicado, el dilatón y la escala de longitudes l_s . Cuando ambas se anulan se recupera la Mecánica cuántica ordinaria acoplada a la relatividad general y a los campos gauge de los que tanto hemos hablado. ■

03

**... en la exploración del
universo**



La oscuridad del cosmos

La materia ordinaria, por sí sola, es incapaz de formar las galaxias y estrellas tal y como las observamos. Por todo ello, pocos cosmólogos dudan de que la llamada “materia oscura fría”, o algo similar, deba existir. Pero las complicaciones no terminan aquí: además de materia oscura, los datos también parecen indicar que existe una nueva fuente de energía, la llamada energía oscura.

Enrique Gaztañaga

Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)

Se estima que la mayor parte de la materia de la que se compone el universo es oscura, o muy poco luminosa, y que está mayoritariamente compuesta por una sustancia exótica, llamada “materia oscura fría” o CDM (Cold Dark Matter), diferente a la que conocemos en la Física actual. El término “frío” alude a que no interactúa, o lo hace muy débilmente, con las otras formas de materia conocidas, exceptuando la atracción gravitatoria, que se asume universal. ¿Qué evidencias tenemos para afirmar todo esto? Por un lado, hemos calculado que la densidad de materia ordinaria

o bariónica, es decir la formada por las partículas conocidas, las incluidas en el modelo estándar, es de solo un 4% de la densidad de energía crítica, que es aquella derivada de la expansión del cosmos y que equivale a unos 5 protones por metro cúbico. Por otro lado, el movimiento de las galaxias (y de las anisotropías en la radiación cósmica de fondo) nos indica que la densidad total de materia es 6 veces mayor que la de la materia bariónica, de alrededor del 25% del valor crítico. De aquí concluimos que la mayor parte de la materia (el 21% frente al 4%) no está formada de materia ordinaria

y además interactúa débilmente con esta (CDM). Adicionalmente, esta materia exótica resulta imprescindible para poder entender la formación de estrellas y galaxias. La materia ordinaria, por sí sola, es incapaz de formar las galaxias y estrellas tal y como las observamos. Por todo ello, pocos cosmólogos dudan de que CDM, o algo similar, deba existir.

Pero las complicaciones no terminan aquí: además de materia oscura, los datos también parecen indicar que existe una nueva fuente de energía, la llamada energía oscura.

Como es bien sabido, Albert Einstein propuso en 1915 la teoría de la relatividad general (RG o teoría de la gravedad) que ha reemplazado exitosamente la teoría de la gravedad propuesta por Isaac Newton en sus *Principia* (1687). De acuerdo con la RG, la presencia de la Tierra (o cualquier otra forma de materia-energía) produce una curvatura en el espacio-tiempo que altera el movimiento de los cuerpos, dando la apariencia de que los objetos caen debido a la fuerza de la gravedad. Una confirmación espectacular de esta nueva teoría es el llamado “efecto de lente gravitatoria”, por el cual la luz (que



Enrique Gaztañaga.

Enrique Gaztañaga

Astrofísico y doctor en Física por la Universidad de Barcelona (1989). Realizó su formación postdoctoral en NASA/Fermilab Center for Theoretical Astrophysics (Universidad de Chicago) y en el departamento de Astrofísica de la Universidad de Oxford, Reino Unido. Ocupó una cátedra patrimonial en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en México y fue Profesor Titular de Física Teórica en la Universidad de Barcelona.

Actualmente ejerce de Profesor de Investigación del CSIC en el Instituto de Ciencias del Espacio (www.ice.csic.es) y en el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC/CSIC) en Barcelona. Es miembro del comité de dirección y del comité científico de los cartografiados de galaxias DES (Dark Energy Survey, www.darkenergysurvey.org) y PAU (Physics of the Accelerating Universe, www.pausurvey.org). Su investigación se centra en el estudio de la caracterización y el origen de la estructura y contenido a gran escala en el universo.

no tiene masa, pero sí energía) se curva al pasar cerca de un cuerpo masivo. En 1919, Arthur Eddington y Freeman Dyson observaron este desdoblamiento durante un eclipse solar. Por una vez, los titulares de la prensa no recogían solamente noticias de guerra o de fútbol, sino que afirmaban: “La luz no va en línea recta”, “El espacio es curvo”, “La teoría de Newton es incorrecta”.

Si aplicamos la RG a todo el cosmos, vemos que la presencia de materia (o energía) en él debe producir el movimiento de sus partes. Dicho de otra manera: el estudio del movimiento cósmico revela el contenido cósmico. Las ecuaciones que rigen esta relación se denominan ecuaciones de Friedman (1922). Estas deri-

van directamente de la RG y se reducen a las ecuaciones de Newton que todavía estudiamos en la escuela. Se trata de las ecuaciones de conservación de la energía y del movimiento que surgen de aplicar sencillos criterios de simetría: las leyes de la Física son iguales en todo momento y lugar del cosmos. Estas ecuaciones relacionan las medidas del movimiento cósmico con las medidas de su contenido y de su curvatura.

La gran sorpresa fue ver que, dada la densidad de materia en el cosmos, el ritmo de expansión cósmico observado (ley de Hubble) era, aproximadamente, el que predicen estas ecuaciones. Ello animó a los cosmólogos a tomar medidas cada vez más precisas.

En la última década, las mediciones de la curvatura del cosmos, realizadas con los mapas de la radiación cósmica (WMAP), los cartografiados de galaxias (SDSS) y las distancias a supernovas, apuntan a que nuestro universo es plano (geometría de Euclides). Es decir, globalmente, se puede afirmar que el cosmos no tiene curvatura alguna, con una precisión (y exactitud) mejor que el 1%. Ello implica, de acuerdo con las ecuaciones de la RG, que debe haber una cancelación casi perfecta entre la densidad de energía, debida a la expansión, y la densidad de energía-materia del contenido del cosmos. En otras palabras, la densidad de energía del cosmos debe tener justamente el valor crítico mencionado antes. Las medidas so-

bre materia oscura indican que solo hay un 25% del valor crítico de energía en forma de materia. Esto se acerca bastante al valor crítico, pero no lo alcanza. La precisión en las medidas no deja lugar a dudas: falta un 75% para poder cuadrar las ecuaciones de la RG. Esta es la denominada energía oscura. La conclusión es robusta y parece inevitable: o bien la teoría de la gravedad (RG) es incorrecta a escalas cósmicas o bien debe existir una nueva forma de energía.

Pero, ¿qué diferencia la energía oscura de la materia oscura? Podríamos decir que la primera acelera el cosmos mientras que la segunda lo desacelera. Esto es fácil de entender. La densidad de materia oscura se diluye al expandirse el cosmos, lo que implica que la energía de expansión disminuye, resultando en una desaceleración, al tiempo que la densidad de energía oscura permanece constante, lo que resulta en aceleración.

El que la materia y energía oscuras proporcionen contribuciones similares en orden de magnitud (del 21% y del 75%) al ritmo de expansión se conoce como el “problema de la coincidencia cósmica”. Es una coincidencia porque en el pasado, debido a la expansión cósmica, la densidad de materia oscura era muy superior a

la densidad de energía oscura. ¿Por qué coinciden aproximadamente sus valores hoy en día? ¿Es esta una indicación sobre su naturaleza? ¿Podrían ambas estar relacionadas?

Hay un candidato obvio que opta al título de “energía oscura”. Se trata simplemente de la densidad de energía del vacío o del estado fundamental de la materia. Su valor no cambia las otras interacciones de la materia (fuerzas electromagnéticas y nucleares), que solo dependen de la diferencia entre distintos estados de excitación pero no de su valor absoluto. El problema con esta idea es que la densidad de energía oscura medida es extremadamente baja: corresponde a unos pocos protones por unidad de metro cúbico. Por tanto, su valor no coincide con las densidades de energías típicas en el modelo estándar de partículas, que son, al menos de un protón por unidad de volumen nuclear (el radio característico de un núcleo atómico es una milbillónésima parte del metro, es decir un metro dividido en $1.000.000.000.000.000 = 10^{15}$). Hay una diferencia de 45 ordenes de magnitud (10^{45}) respecto al valor de la energía oscura. Se podría argumentar que, puesto que la materia oscura interacciona muy débilmente, su energía de vacío puede ser mucho menor. Pero en tal caso deberíamos de

La Astrofísica cuenta con dos técnicas observacionales: la fotometría y la espectroscopia. La primera consiste en tomar imágenes del cielo. En la segunda, se dispersa un haz de luz en sus diferentes colores o longitudes de onda

explicar por qué solo importa la energía del vacío de la materia oscura y por qué debemos ignorar la contribución a la energía del vacío que viene de la materia ordinaria. Y, lo que es peor, de acuerdo con la Física cuántica el vacío está poblado por fluctuaciones de energía que siguen el llamado “principio de incertidumbre de Heisenberg” (1927): la densidad de energía cuántica característica de la gravedad (la llamada energía de Planck) es 10^{120} veces mayor que la de la energía oscura. ¿Supone esto un conflicto entre la RG y la Física cuántica?

En la RG, la energía del vacío también puede interpretarse como una constante fundamental, llamada constante cosmológica. Su existencia podría simplemente postularse como la solución al problema de la energía oscura. Pero los datos no permiten todavía asegurar que sea una constante (aunque el margen es de solo un 5% de variación). Otro candidato popular para el título de energía oscura es la llamada “quintaesencia”, o posibilidad de que existan más dimensiones espaciales (más allá de las tres conocidas). Existen múltiples variaciones de estas ideas. A diferencia del caso de la constante cosmológica, en estos otros modelos el valor de la densidad de energía oscura no se man-

tiene constante y varía ligeramente al evolucionar el cosmos. Si consiguiéramos medir una variación en la densidad de energía oscura, podríamos ser capaces de diferenciar los diferentes modelos.

Nos encontramos en un punto de inflexión: o bien introducimos estas componentes oscuras, que nos recuerdan a las obsoletas teorías del éter que se introdujeron a finales del siglo XIX para conjuntar el electromagnetismo y la dinámica de Newton, o bien tenemos que cambiar las leyes fundamentales de la Física y de la RG, en particular. ¿Cuál es la forma de avanzar? Seguramente, con más observaciones: haciendo mapas más grandes (y por tanto más antiguos) del cosmos.

Existe una forma sencilla para distinguir si realmente debemos modificar la RG o admitir la existencia de energía oscura. Se trata de comparar la historia de la expansión del universo con la historia de su crecimiento. Además del estudio de la expansión cósmica, la Cosmología describe el crecimiento de estructuras. Empezando por una distribución homogénea de radiación y partículas elementales, intenta explicar cómo se forman las estrellas y galaxias que dan lugar a nuestra presente existencia. Dada una historia de la expansión a par-

tir de observaciones, las ecuaciones de la RG predicen una única historia para el crecimiento. ¿Cómo podemos medir este crecimiento?

La Astrofísica cuenta con dos técnicas observacionales: la fotometría y la espectroscopia. La primera consiste en tomar imágenes del cielo. En la segunda, se dispersa un haz de luz en sus diferentes colores o longitudes de onda. El medio dispersor actúa igual que un simple prisma, que refracta la luz de diferentes colores en ángulos distintos, resultando en un arcoiris o *espectro*. El espectro identifica la composición química, abundancia relativa y estado físico del material/objeto que emite la luz. Hemos reunido espectros de más de un millón de galaxias y contamos también con la fotometría (en diversos colores) de decenas de millones de galaxias.

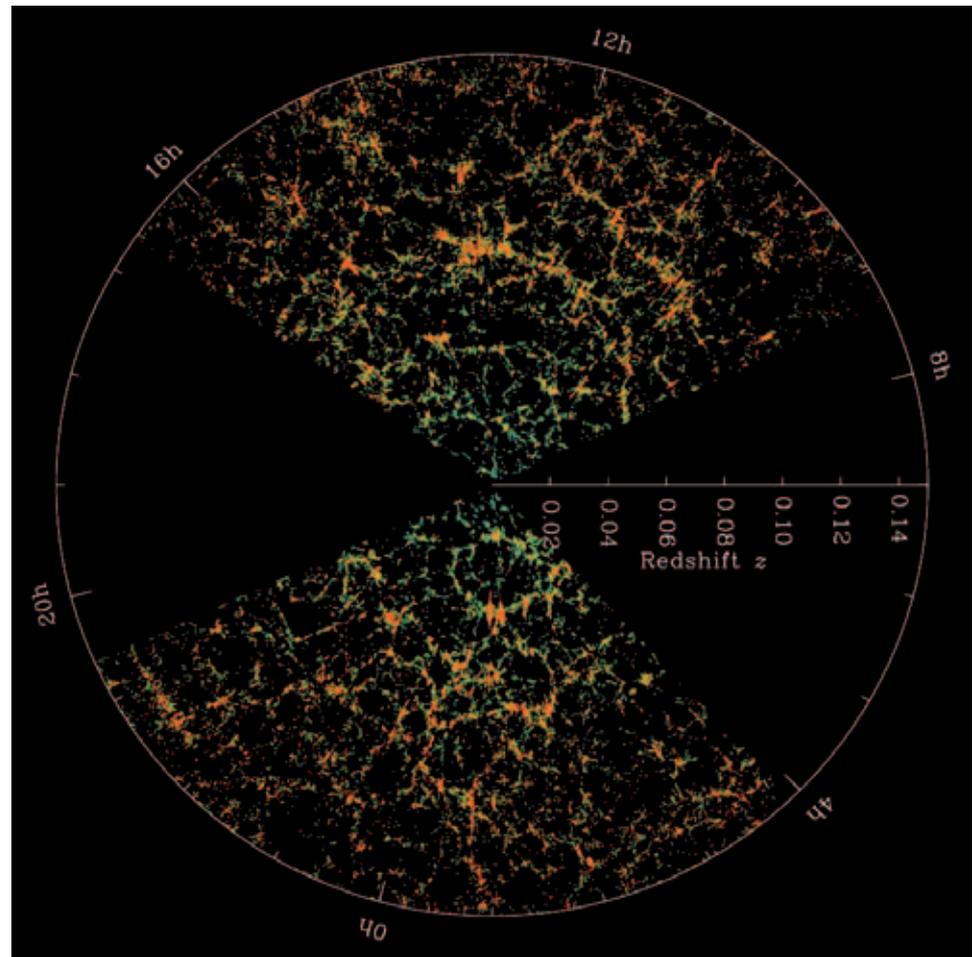
¿Para qué tantos espectros? Buscamos hacer un censo del universo, con las posiciones de galaxias en un radio de miles de millones de *años-luz*, la distancia que recorre la luz en un año. Estos enormes mapas trazan también la historia del cosmos, a modo de libro, donde la luz que se recoge con mayor retraso procede de los puntos más distantes. Se llegan a medir retrasos de miles de millones de años para los objetos más alejados, cuando

ni la Tierra ni el Sol todavía habían nacido. Una máquina del tiempo que nos permite literalmente ver cómo nacen y envejecen las galaxias.

La distancia a la que se encuentran las galaxias de nuestro mapa se infiere al analizar los espectros de cada galaxia. El resultado es una distribución

tridimensional (3D) de las galaxias a nuestro alrededor. Un ejemplo del mapa resultante se muestra en la Figura 1. La Vía Láctea es un minúsculo punto

/// Figura 1. Distribución de galaxias en el cosmos



Se muestra un corte en rodaja a través del ecuador (de inclinación de +/-1.25 grados). La Tierra está en el centro de la imagen y la dirección radial en la figura es el redshift z (distancia-tiempo cósmico). El color de las galaxias corresponde a la edad de sus estrellas (que conocemos por su espectro): cuanto más rojas, más viejas en edad. Las zonas más densas (cúmulos) son más viejas y, si nos fijamos con detalle, se alargan en la dirección del observador debido a las altas velocidades peculiares de las galaxias. Fuente: www.sdss.org

en el centro de esta figura. Las galaxias se distribuyen en grandes paredes y filamentos que intersectan en enormes cúmulos de galaxias y definen zonas relativamente vacías.

A simple vista, el lector quizás pueda apreciar en el mapa de la Figura 1 cómo el contraste (y por tanto la amplitud promedio) de las estructuras tiende a disminuir a medida que nos alejamos del centro. Los mapas nos indican la evolución del crecimiento con el tiempo (recordemos que distancia también es tiempo). Adicionalmente, las correlaciones entre galaxias nos proporcionan una forma de calibrar distancias en el cosmos que se traducen en medidas de la aceleración o de la historia de la expansión. De esta manera, los mapas de galaxias pueden poner a prueba la RG: podemos medir el ritmo de expansión y con ello predecir el ritmo de crecimiento. ¿Coincide esta predicción con el ritmo observado?

A día de hoy, las medidas no son suficientemente precisas o profundas como para poder hacer este tipo de pruebas de forma concluyente. Por ello se están preparando nuevos cartografiados de galaxias más profundos y precisos. Los nuevos mapas pretenden alcanzar distancias de 5 a 10 veces más lejanas que las de la Figura 1 y se dividen en dos ti-

En España, estamos liderando un nuevo cartografiado, llamado PAU (Physics of the Accelerating Universe, financiado en parte por el Programa Consolider Ingenio 2010 del MICINN) que utiliza una nueva tecnología mixta, a camino entre la espectroscopia y la fotometría

pos: espectroscópicos y fotométricos. Los primeros (como SDSS-III, GAMMA, GigggleZ) son parecidos al mapa de la Figura 1, en 3D, pero utilizan más recursos o seleccionan solo ciertos objetos para poder aumentar la distancia. Los segundos (como Pan-STARRS, DES o LSST) son mapas angulares (2D) donde el *redshift* (o distancia radial) solo se conoce de forma aproximada (con un error de un 10%) usando medidas de varios colores. La pérdida de resolución radial se compensa con el área, la profundidad o la gran cantidad de galaxias muestreadas.

En España, estamos liderando un nuevo cartografiado, llamado PAU (Physics of the Accelerating Universe, www.pausurvey.org/, financiado en parte por el Programa Consolider Ingenio 2010 del Ministerio de Ciencia e Innovación MICINN) que utiliza una nueva tecnología mixta, a camino entre la espectroscopia y la fotometría. El propósito es la confección de un mapa fotométrico mediante el uso de 40 filtros de colores distintos de manera que en cada imagen del mapa tengamos también un espectro de baja resolución. Para ello estamos ya construyendo en nuestros laboratorios la cámara PAUCam, que permitirá implementar esta nueva tecnología. El mapa resultante tendrá resolución es-

pecial óptima para el estudio del cosmos oscuro. Nuestro plan es instalar la PAUCam a finales del 2012 en el Telescopio WHT de La Palma (www.ing.iac.es). Los nuevos cartografiados requieren más precisión y mejor control de los errores sistemáticos y de los detalles de los modelos teóricos. Por ello estamos trabajando también en un nuevo sistema de procesamiento de datos adaptado a PAU y en simulaciones más extensas y detalladas (véase www.ice.cat/mice). El Cartografiado PAU será único en su combinación de resolución, profundidad y densidad de muestreo. Todo ello nos permitirá explotar nuevas técnicas, además de los métodos ya mencionados. PAU podrá medir directamente (casi en 3D) el ritmo de crecimiento de la materia oscura usando el efecto de lente gravitatoria. También tendrá suficiente resolución para medir de forma estadística los movimientos peculiares de las galaxias (ver Figura 1). La combinación de estas medidas permitirá que se pueda acotar simultáneamente, y de forma muy precisa, el valor de la aceleración cósmica y del ritmo de evolución del crecimiento de estructuras. La precisión final dependerá del tamaño del cartografiado PAU, pero no hay duda de que, si lo gramos que funcione, en muy pocos años PAU podrá ayudar a resolver los misterios de este cosmos oscuro. ■

Impulsamos proyectos que crean oportunidades

Un año más, en la Obra Social "la Caixa", abrimos las convocatorias para acceder al programa de ayudas a iniciativas sociales.

Por ello, si conoces alguna organización local sin ánimo de lucro que quiera hacer realidad un proyecto para dar respuesta a las necesidades emergentes de la sociedad, por favor, hazle llegar la información sobre las nuevas convocatorias. Entre todos, podremos crear oportunidades que mejoren la calidad de vida de los que más lo necesitan.



Obra Social
Fundación "la Caixa"



En la Obra Social "la Caixa" colaboramos con organizaciones sin ánimo de lucro que, como nosotros, trabajan para conseguir una sociedad con más oportunidades para todos. Es por eso que favorecemos proyectos que inciden directamente en aquellas problemáticas que son emergentes en nuestra sociedad, y damos apoyo a iniciativas

En la Obra Social "la Caixa" colaboramos con organizaciones sin ánimo de lucro que, como nosotros, trabajan para conseguir una sociedad con más oportunidades para todos. Es por eso que favorecemos proyectos que inciden directamente en aquellas problemáticas que son emergentes en nuestra sociedad, y damos apoyo a iniciativas innovadoras que no están cubiertas a través de otras subvenciones. Consideramos que en una sociedad igualitaria todas las personas tienen que tener derecho a la cobertura de las necesidades básicas, como son la vivienda, la salud, la alimentación...

En la Obra Social "la Caixa" colaboramos con organizaciones sin ánimo de lucro que, como nosotros, trabajan para conseguir una sociedad con más oportunidades para todos. Es por eso que favorecemos proyectos que inciden directamente en aquellas problemáticas que son emergentes en nuestra sociedad, y damos apoyo a iniciativas innovadoras que no están cubiertas a través de otras subvenciones. Consideramos que en una sociedad igualitaria todas las personas tienen que tener derecho a la cobertura de las necesidades básicas, como son la vivienda, la salud, la alimentación... En la Obra Social "la Caixa" colaboramos con organizaciones sin ánimo de lucro que, como nosotros, trabajan para conseguir una sociedad con más oportunidades para todos. Es por eso que favorecemos proyectos que inciden directamente en aquellas problemáticas que son emergentes en nuestra sociedad, y damos apoyo a iniciativas innovadoras que no

En la Obra Social "la Caixa" colaboramos con organizaciones sin ánimo de lucro que, como nosotros, trabajan para conseguir una sociedad con más oportunidades para todos. Es por eso que favorecemos proyectos

PROGRAMA DE AYUDAS A PROYECTOS QUE DIBUJAN SONRISAS

El bestiario exoplanetario

El antropocentrismo, la noción de que el hombre está en el centro del universo, ha estado presente de manera permanente en la Ciencia y en la Filosofía. Una y otra vez, la realidad nos devuelve a donde pertenecemos, un minúsculo planeta en algún lugar de una galaxia cualquiera.

David Barrado-Navascués

Centro Astronómico Hispano-Alemán (MPG-CSIC) y Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)

Después de centurias especulando sobre si existían otros planetas fuera del Sistema Solar, si la Tierra y el Sistema Solar eran especiales, los años 90 han visto una verdadera revolución en el campo de la búsqueda de exoplanetas. Primero, con los hallazgos, y en los últimos años, con la caracterización (propiedades globales e incluso de sus atmósferas).

El verdadero pistoletazo de salida lo dio un grupo suizo, liderado por el Michael Mayor, en 1995, mediante el uso de una técnica basada en los cambios de la velocidad radial de la estrella central, minúsculas variaciones inducidas por la presencia de un planeta, de masa mucho más reducida que aquel. Desde entonces han sido más de 500 exoplanetas, incluyendo alrededor de 100 sistemas planetarios (una

estrella que posee al menos dos planetas).

Varios factores han influido en esta eclosión de descubrimientos: desde la variedad de técnicas desarrolladas hasta la sofisticación de los modelos teóricos aplicados, pasando por el uso de una instrumentación en la frontera del desarrollo tecnológico.

En lo que respecta a las técnicas usadas, además de la ve-

locidad radial (basada en el efecto Doppler, o el cambio de frecuencia de una onda, tal como la luz o el sonido, cuando emisor y receptor se mueven uno respecto al otro), los tránsitos planetarios (análogos a los eclipses de Sol) empiezan a dominar el escenario, dado que nos permiten derivar las propiedades genéricas del sistema estrella-planeta (radios, masas –si se combina el estudio con las velocidades radiales–, den-

¿QUÉ ES UN PLANETA?

La Unión Astronómica Internacional (IAU, por sus siglas en inglés), en su asamblea plenaria celebrada en Praga en agosto del año 2006, estableció una definición del término planeta, al menos en lo referente al Sistema Solar. Así, un planeta es un cuerpo celeste que: (a) orbita alrededor del Sol, (b) posee suficiente masa como para que su propia gravedad domine las fuerzas presentes como cuerpo rígido, lo que implica una forma aproximadamente redondeada determinada por el equilibrio hidrostático, (c) es el objeto claramente dominante en su vecindad, habiendo limpiado su órbita de cuerpos similares a él.

Según esta definición, Plutón deja de ser un planeta, para pasar a ser el prototipo de un nuevo tipo de objetos, los planetas enanos. Por tanto, el Sistema Solar se queda con ocho planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte (denominados rocosos o telúricos), y Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno (los gigantes gaseosos).

Plutón deja de ser un planeta, para pasar a ser el prototipo de un nuevo tipo de objetos, los planetas enanos



Saturno, observado por la misión Cassini-Huygens (NASA/ESA/ASI), con el Sol oculto por el eclipse debido a la superficie del planeta. Aunque existe una cierta cantidad de material alrededor de este gigante gaseoso, en forma de numerosos satélites y los múltiples anillos, Saturno domina todo el conjunto. Fuente: NASA.



David Barrado-Navascués.

DAVID BARRADO-NAVASCUÉS

Doctor en Física por la Universidad Complutense, aunque terminó su investigación en el Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica en Cambridge (EE UU). Investigador postdoctoral en diferentes instituciones de Estados Unidos, Alemania y España. Trabajó en el Centro Europeo de Astronomía Espacial (ESAC) como miembro del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Dentro del equipo del INTA, ha sido el investigador principal de MIRI, el instrumento para el infrarrojo medio que volará en el próximo telescopio espacial, el JWST. Posteriormente, se incorporó al Centro de Astrobiología (CAB), instituto mixto constituido por la agencia espacial española (INTA) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Desde comienzos del año 2010 es el director del Centro Astronómico Hispano-Alemán, Observatorio de Calar Alto.

Sus intereses como investigador se centran en la búsqueda y caracterización de objetos subestelares, así como en las propiedades de las estrellas de los cúmulos abiertos. Ha producido más de cien artículos en revistas científicas de prestigio.

TIPOS DE PLANETAS

Gaseosos

Los planetas gaseosos son aquellos constituidos principalmente por gases, en particular hidrógeno y helio. En nuestro Sistema Solar pertenecen a esta categoría Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, aunque en estos últimos el hielo es un componente sustancial en su composición. Los planetas gaseosos, dependiendo de sus mecanismos de formación, no tienen por qué poseer un núcleo sólido rocoso, sino que pueden consistir en un continuo de gases paulatinamente más densos que adquieren finalmente las propiedades de un fluido cuando se encuentra a alta presión. En el caso de Júpiter y Saturno el hidrógeno gaseoso en estado molecular da paso a un estado conocido como “hidrógeno metálico”, con unas propiedades particulares. La inmensa mayoría de los planetas extrasolares descubiertos son gaseosos debido, al menos en parte, a que los actuales métodos de detección discriminan mejor planetas de mayor masa.

Rocosos

Los planetas rocosos, también llamados telúricos, son los formados principalmente por silicatos y poseen atmósferas influidas por la actividad geológica y, en el caso de la Tierra, por actividad biológica. En el Sistema Solar existen cuatro planetas rocosos: Mercurio, Venus, Tierra y Marte. Curiosamente, los primeros planetas descubiertos más allá de nuestro sistema eran de tipo rocoso, aunque solo pudieron detectarse gracias a que orbitaban en torno a un pulsar, un tipo peculiar de estrella. Solo a partir de 1995 se consiguió afinar los métodos de detección de planetas extrasolares para encontrarlos. La búsqueda y caracterización de planetas similares al nuestro se han convertido en el eje de algunas misiones de exploración espacial.

Además de nuestro propio sistema planetario, llamado Sistema Solar, en los últimos 15 años se han descubierto más de 500 planetas alrededor de otras estrellas (exoplanetas)



Tetis, un satélite de Saturno con un tamaño de unos 1.071 kilómetros, visto por la misión Cassini-Huygens. Los datos indican que esencialmente está compuesto de agua helada. La imagen (en realidad un mosaico formado por cuatro fotografías) muestra el cráter Odysseus, que tiene un diámetro de unos 450 kilómetros.

Fuente: NASA/JPL/Space Science Institute.

sidades, temperaturas superficiales), e incluso la obtención de información sobre la composición química de la atmósfera del planeta. Eso sí, sin detalles excesivos. Incluso en unos pocos casos hemos podido obtener imágenes directas de los exoplanetas, a pesar de la extraordinaria diferencia de brillo con la estrella central.

¿Qué es un sistema planetario?

Es el conjunto formado por una estrella (o un sistema estelar binario) y todos los pla-

Dentro del Sistema Solar se aprecia una clara dicotomía en las propiedades de los ocho planetas: aquellos que se asemejan a la Tierra, pequeños y densos; y los gigantes que se encuentran en la región más exterior, con densidades próximas a la del agua

netas y cuerpos menores que orbitan a su alrededor. Además de nuestro propio sistema planetario, llamado Sistema Solar, en los últimos 15 años se han descubierto cientos de planetas alrededor de otras estrellas (exoplanetas), gracias a varias técnicas de observación entre las que destacan la espectroscopia de alta resolución (velocidades radiales basadas en el efecto Doppler) y la fotometría de alta precisión (tránsitos planetarios, entre otras). Algunos de estos exoplanetas se encuentran en verdaderos sistemas planetarios, que contienen una estrella central y dos o más planetas. Con anterioridad a la identificación del primer exoplaneta, por métodos espectroscópicos en 1995, se habían

EXOPLANETA O PLANETA EXTRASOLAR

La Unión Astronómica Internacional (IAU) definió de manera provisional el concepto de exoplaneta en el año 2003. Según la misma, los planetas fuera del Sistema Solar deben orbitar alrededor de una estrella o remanente de estrella (enana blanca o estrella de neutrones) y tener una masa inferior a 14 masas de Júpiter. Debido a su reducida masa, no alcanzan temperaturas y densidades en sus interiores lo suficientemente altas como para fusionar deuterio, un isótopo del hidrógeno compuesto por un protón y un neutrón, o cualquier otro elemento químico. Por tanto, no producen energía a partir de este tipo de fuente.

Según la misma resolución de la IAU, los objetos subestelares, con masas superiores a los anteriores, pero que no fusionan hidrógeno, se deben denominar enanas marrones. Por otra parte, los objetos aislados de masa planetaria, con masa por debajo del límite de las 14 masas de Júpiter, se deben denominar sub-enanas marrones o con cualquier otro nombre que sea apropiado, salvo planeta. Por supuesto, estas definiciones podrán modificarse según nuestro conocimiento avance.

descubiertos discos circunestelares alrededor de estrellas, tanto de acrecimiento (restos de la formación de la propia estrella) como aquéllos formados por el material usado para generar los planetas (denominados discos de *debris*). Lo que es más sorprendente es que incluso se han detectado sistemas planetarios que también incluyen discos circunestelares y que por tanto se encontrarían en una etapa evolutiva temprana, en la cual los exoplanetas todavía estarían en proceso de formación o habrían terminado recientemente de hacerlo.

La diversidad planetaria

Dentro del Sistema Solar se aprecia una clara dicotomía en las propiedades de los ocho planetas: aquellos que se asemejan a la Tierra, pequeños y densos; y los gigantes que se encuentran en la región más exterior, con densidades próximas a la del agua. Estos, a su vez, se diferencian en gigantes gaseosos (Júpiter y Saturno, formados por hidrógeno y helio, al igual que el Sol, y que son los dos elementos atómicos más ligeros) y gigantes de hielo (más pequeños y que contienen cantidades significativas de otros elementos ligeros, como carbono y oxígeno, en forma de hielos).

Durante años se suponía que, de existir algún sistema planetario alrededor de otra estrella,

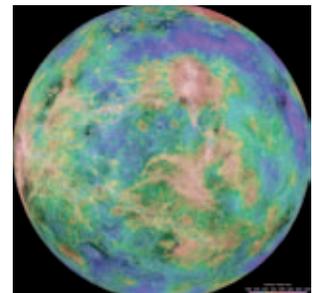
esta sería muy similar al Sol, y tanto la jerarquía como las masas y propiedades de sus planetas serían semejantes a las que encontramos en el Sistema Solar, con planetas de tipo terrestre (esencialmente rocosos) y otros similares a Júpiter (mucho más masivos y gaseosos). Sin embargo, con el descubrimiento de, a día de hoy, 555 planetas, se puede decir que una palabra describe las propiedades básicas: diversidad. De entre ellos, 134 muestras tránsitos (sin contar con los más de mil candidatos descubiertos por el observatorio espacial Kepler, de NASA), y es posible en muchos casos derivar propiedades tales como su masa y el radio, lo que permite una comparación directa con los hermanos de la Tierra. Así, los exoplanetas, por analogía y comparación con modelos teóricos, se pueden agrupar en los mismos tipos que los planetas del Sistema Solar. En cualquier caso, la diversidad persiste, y dentro de ella están los extremos, los planetas que se salen de toda norma, que van mucho más allá de lo que la imaginación podría sugerir.

¿Cuál es la norma y qué es lo excepcional? Aunque los científicos dedicamos gran parte de nuestro tiempo a la clasificación, no suele estar siempre claro. En el caso de los planetas extrasolares, la situación es, verdaderamente, confusa.

Y dentro de esa extraordinaria variedad, están los extremos, los planetas que se salen de toda norma, que van mucho más allá de lo que la imaginación podría sugerir



La Luna, vista desde la sonda Galileo (7 de diciembre de 1992) durante las complejas maniobras realizadas para poder alcanzar la órbita de Júpiter. La nave estuvo estudiando el sistema joviano durante los años 1995-1997, pero esta fotografía (composición de varias tomadas a diferentes longitudes de onda, desde el violeta hasta el infrarrojo muy cercano) de muy alta resolución nos muestra claramente la diferencia entre diferentes regiones de nuestro satélite: el cráter de impacto Tycho (abajo, región brillante), Oceanus Procellarum (izquierda), Mare Imbrium (centro izquierda), Mare Serenitatis y Mare Tranquillitatis (centro) y Mare Crisium (cercano al borde de la derecha). La Luna se caracteriza por su bajísimo contenido en agua. Fuente: NASA/JPL/USGS.



La superficie de Venus. Esta imagen es el resultado de años de observaciones realizadas con la sonda Magellan y su radar, dado que la densa atmósfera de este planeta impide contemplar su geografía. Los huecos dejados por esta nave han sido completados con diferentes instrumentos, incluyendo Arecibo, Venera y Pioneer Venus. Fuente: NASA/JPL/USGS.

En realidad la situación no es tan compleja. Si miramos a los componentes del Sistema Solar e incluimos también a los planetas enanos y a los satélites, nos percatamos que muchos de esos extremos están cerca, son nuestros vecinos: incluso habitamos en uno de ellos. Por supuesto, también están nuestros sesgos observacionales, ya que conocemos mucho mejor nuestro Sistema Solar que lo que está más allá de los mares interestelares. Veamos algunos ejemplos de extremos:

I) *Por sus propiedades físicas:*

- CoRoT-Exo-1 b, el planeta de mayor tamaño.
- PSR 1257+12 b, el planeta de menor masa. O Mercurio, dentro del Sistema Solar y de masa comparable a aquel. En el extremo opuesto, los dos planetas (o enanas marrones) detectados alrededor de la estrella un Oph, algo más de 20 veces la masa de Júpiter (cada uno).
- La Tierra por la alta densidad. Dentro de los

muy densos se encuentra XO-3 b.

- Saturno y Marte por su forma.
- Por su composición química, destacan Júpiter, Mercurio, HD 149026 b. Dentro de este grupo se encuentran satélites de la Tierra y Saturno. La Luna, por su carencia de agua, y Tetis, por la gran cantidad de este compuesto químico.

- Por su temperatura superficial, HD 149026 b, unos 2.000 kelvin. En el extremo opuesto, Neptuno con unos 50 K.

II) *Por sus propiedades dinámicas:*

- Por su órbita, Neptuno, OGLE-TR-56 by HD 80606 b.
- Por su rotación, Júpiter y Venus (muy rápida y lenta, respectivamente).

III) *Por la configuración del sistema planetario:*

- Complejidad del sistema planetario. Después del Sistema Solar, el correspondiente a 55 Cnc, con 5 exoplanetas.
- El planeta enano Plutón, junto con su satélite Caron-

Aquellos que se asemejan a la Tierra, pequeños y densos; y los gigantes que se encuentran en la región más exterior, con densidades próximas a la del agua

te, por ser prácticamente gemelos, de masa equiparable.

- Por el entorno, PSR B1620-26 (una estrella de neutrones) localizado en un viejísimo cúmulo globular (NGC6121) con miles de estrellas a distancias muy cortas.
- 2M1207 b, por la diferencia de masa entre la componente central (una enana marrón) y el planeta, veinte masas jovianas frente a cinco. Además, el planeta orbita a 46 unidades astronómicas.

Por supuesto, los records se batían con facilidad. Solo hay que seguir intentándolo. De hecho, la tasa de descubrimientos es tan alta que, según se escriben estas líneas, van quedando obsoletos. ■



Visión artística de un planeta orbitando alrededor de un pulsar, como el descubierto alrededor de B1257+12 en 1992. Los pulsares son estrellas de neutrones que, rotan muy rápidamente, tienen intensísimos campos magnéticos y emiten radiación electromagnética de muy alta energía. Son el resultado de la muerte de las estrellas de alta masa, después de estallar como supernovas. Probablemente el planeta, detectado por métodos indirectos, se formó a partir del material expulsado en la explosión. Fuente: NASA.

Grandes instalaciones en Astronomía: Astrofísica a lo grande

El primer telescopio fue el ojo humano. En el siglo XVII, Galileo construyó el primer telescopio óptico. Desde entonces, los telescopios fueron ampliando su superficie colectora de manera que aumentaron su capacidad de detectar objetos cada vez menos luminosos (lo que técnicamente se conoce como sensibilidad). Los grandes avances en la Astronomía han ido unidos a importantes desarrollos instrumentales y tecnológicos. Y las grandes instalaciones disponibles o de futuro surgen como resultado de la necesidad de dar respuesta a los interrogantes científicos.

Antxon Alberdi

Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)

La Astronomía, como también sucede con otras ramas de la ciencia, ha acompañado al ser humano a lo largo de toda su existencia. Desde hechos tan básicos y conocidos como la influencia del Sol y de la inclinación del eje de la Tierra en las estaciones y en el

clima, hasta su aplicación en otras cuestiones prácticas tales como la navegación (antiguamente basada en el reconocimiento de las posiciones de las estrellas en el cielo y actualmente en el sistema GPS), la Astronomía constituye una compañía permanente para el hombre. Ha tenido también

un impacto esencial en nuestra cultura. No podemos olvidar que la Astronomía aborda cuestiones tan relevantes y atractivas para el hombre como el origen del universo, de nuestra galaxia y de sus estrellas, de nuestro Sistema Solar, de la Tierra e incluso de la vida misma. Todo ello ha lleva-

do a un interés enorme y a un desarrollo muy rápido de esta rama de la ciencia; así como a enfrentarse a los interrogantes relacionados con la Astrofísica con un enfoque multidisciplinar (en ello han participado físicos, químicos, ingenieros, matemáticos, biólogos y geólogos) y con una combinación



Antxon Alberdi.

Antxon Alberdi

Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Zaragoza y doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada. Ha desarrollado su labor investigadora en el Max Planck Institut für Radioastronomie (Bonn, Alemania) y en el LAEFF-INTA (Laboratorio de Astrofísica Espacial y Física Fundamental). Actualmente es profesor de investigación del CSIC en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC).

Asimismo, es miembro de la Comisión de Área de "Ciencias y Tecnologías Físicas" del CSIC. Ha sido vicedirector del IAA-CSIC y secretario de la Comisión Nacional de Astronomía. Ha formado parte del Comité Científico Internacional (CCI) de los Observatorios de Canarias, de la misión IRSI-DARWIN de la Agencia Espacial Europea (ESA), de la "European Initiative for Interferometry (EII)" y del equipo de trabajo sobre "The future of the European VLBI Network" auspiciado por la red RADIONET dentro del FP7.

Su investigación se centra en el estudio de las regiones centrales de los núcleos activos de galaxias, utilizando técnicas radioastronómicas. Asimismo, emplea estas técnicas para el estudio de las regiones nucleares de las galaxias con brotes de formación estelar, así como para el estudio de la expansión angular de radiosupernovas jóvenes. Actualmente está realizando observaciones interferométricas en el infrarrojo cercano para el estudio de la estructura de las estrellas en la vecindad del centro galáctico y la determinación de órbitas de sistemas estelares múltiples.

única de observaciones, simulaciones y modelado teórico.

La luz y el telescopio

Los astrónomos disponemos de un elemento de trabajo: la luz que emiten los objetos astronómicos. Y, en nuestra investigación, captamos la emisión de los astros en todo el rango de energías, a lo ancho de todo el espectro electromagnético. De hecho, la Astronomía del siglo XXI está basada en un análisis multifrecuencia; es decir, para conocer la física de un objeto celeste, necesitamos saber la luz que emite a lo ancho de todo el espectro. Y ello es así porque los diferentes constituyentes (gas, polvo, estrellas...) de un objeto astronómico emiten luz por un mecanismo de radiación

diferente y lo hacen a una frecuencia muy característica. El tipo de luz, de radiación electromagnética que emite un objeto astronómico, depende de su temperatura. Así, emiten en rayos gamma objetos muy calientes, con temperaturas $T > 10^8$ K, como los estallidos de rayos gamma; al contrario, emiten en longitudes de radio –el denominado universo frío (temperaturas de 1-10 K)– las regiones de formación estelar o las regiones frías y densas del medio interestelar. Refiriéndonos a las estrellas: aquellas más calientes (temperaturas de 10^4 - 10^6 K) tienen el pico de su emisión en el rango ultravioleta, mientras que las estrellas más frías ($T < 1000$ K) concentran su emisión en el infrarrojo. Por lo tanto, resulta

La Astronomía del siglo XXI está basada en un análisis multifrecuencia; es decir, para conocer la física de un objeto celeste, necesitamos saber la luz que emite a lo ancho de todo el espectro

fundamental disponer del instrumento adecuado para captar esa radiación.

El primer telescopio fue el ojo humano. En el siglo XVII, Galileo construyó el primer telescopio óptico. Desde entonces, los telescopios fueron ampliando su superficie colectora de manera que aumentaron su capacidad de detectar objetos cada vez menos luminosos (lo que técnicamente se conoce como sensibilidad). El problema con el que se encontraron los astrónomos es que la atmósfera dificulta las observaciones astronómicas debido fundamentalmente a tres razones: i) impide el paso a la radiación emitida en ciertas longitudes de onda; ii) distorsiona la imagen del objeto astronómico, empeorando la ni-

tidez con la que se observan; iii) incluso, en el visible, absorbe hasta un 20% de la luz. A partir de 1970, la tecnología espacial permitió enviar telescopios al espacio, lo que permitió observar en otros rangos del espectro, distinto del óptico y radio, y al límite de difracción, con la mejor capacidad de detalle posible (lo que técnicamente se conoce como resolución angular). En los setenta, surgieron también los interferómetros en longitudes de onda de radio, lo que permitió obtener resoluciones angulares del orden de la milésima de segundo de arco. En los ochenta, aparecieron los telescopios segmentados que han permitido la construcción de telescopios gigantes de hasta 10 metros de diámetro como GTC (Gran Telescopio de Canarias) o incluso el proyecto de futuro de 30 metros EELT (European Extremely Large Telescope), que será construido por el Observatorio Europeo Austral (ESO) en Cerro Armazones, en Chile. Muchos de los instrumentos que los equipan van acompañados con óptica adaptativa, lo que permite eliminar el efecto de emborronamiento de la imagen producido por la atmósfera, y observar con la mejor nitidez posible.

El universo multi-rango

Desde el punto de vista de la Astronomía observacional, el

Los grandes avances en la Astronomía han ido unidos a importantes desarrollos instrumentales y tecnológicos

experimento ideal sería aquel en el que se dispusiera de i) un cubrimiento espectral infinito (desde los rayos gamma de muy alta energía hasta las ondas de radio más largas), ii) una resolución espectral infinita (obteniendo el mejor detalle en el análisis de las líneas espectrales), iii) la mejor resolución angular (estudiando los objetos astronómicos con la mayor nitidez posible; para ello se utilizan la óptica adaptativa y las técnicas interferométricas), iv) la mejor sensibilidad en las observaciones (para ello, es necesario aumentar la superficie colectora), v) información polarimétrica a partir de los cuatro parámetros de Stokes y vi) el mejor cubrimiento y la mejor resolución temporal. Esta es la senda de la Astronomía, y en este camino el desarrollo de la misma ha ido ligado a los grandes avances en tecnología e instrumentación.

La Astronomía multifrecuencia es ya una realidad. En el espacio se dispone del telescopio espacial Hubble (HST) en el espectro óptico y el ultravioleta, del Spitzer en el infrarrojo, del XMM-Newton y Chandra en rayos X, del Fermi en rayos gamma, del Herschel en el infrarrojo lejano y en las longitudes de onda submilimétricas, entre otros. Adicionalmente, hay misiones espaciales dedicadas a un objetivo científico muy concreto, como COROT,

Swift, Kepler, etc. Hay otras misiones en desarrollo, como el James Webb Telescope, que observará en el infrarrojo. Hay misiones dedicadas a la exploración del Sistema Solar, como Cassini-Huygens, orbitando alrededor de Saturno, y Rosetta en su camino hacia el cometa Chiriumov-Gerasimenko, etc.

En la Tierra, disponemos de telescopios gigantes con diámetros de 8-10 metros, como GTC (Gran Telescopio de Canarias), VLT (Very Large Telescope), perteneciente a ESO, Keck, Gemini o Subaru, muchos de ellos incluyendo óptica adaptativa para observar al límite de difracción y con un arsenal de instrumentos disponibles de altísimas prestaciones. Algunos de ellos pueden ser unidos interferométricamente, como es el caso del VLTI. Muchos telescopios de la clase de 2-4 metros se están dedicando a cartografiados profundos del cielo y, de hecho, su futuro estará asociado a proyectos de legado que permitirán la realización de muestreos sistemáticos de fuentes astronómicas. En radiación gamma se dispone de los telescopios: HESS, situado en Namibia, y MAGIC, situado en el Roque de los Muchachos (La Palma, Islas Canarias). En ondas de radio disponemos del VLA (Very Large Array), del eMERLIN (electronic MERLIN), del LOFAR (Low Frequency

Array), de las redes de interferometría de muy larga base, etc. Resulta impresionante constatar el avance espectacular de la Astronomía en ondas de radio durante los últimos años. En términos de sensibilidad, desde las observaciones pioneras de Karl Jansky realizadas en 1930 hasta la situación actual se ha producido una mejora de doce órdenes de magnitud! De forma idéntica, la resolución angular, con la utilización sistemática de los radiointerferómetros, ha mejorado en varios órdenes de magnitud. Hoy en día, con interferometría de muy larga base a 3 mm se alcanza una resolución angular de decenas de microsegundos de arco!, con una precisión astrométrica incluso mejor. Y ya entrando en funcionamiento está ALMA (Atacama Large Millimeter Array), que trabajará a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas. Y, previsto para el futuro, SKA (Square Kilometer Array), el gran radiointerferómetro centimétrico con una superficie colectora de un kilómetro cuadrado, y sus misiones precursoras como SKAP y MeerKAT.

Los grandes interrogantes de la Astronomía

Como hemos indicado anteriormente, los grandes avances en la Astronomía han ido unidos a importantes desarrollos instrumentales y tecnológicos. Y las grandes instalaciones disponibles o de futuro

surgen como resultado de la necesidad de dar respuesta a los interrogantes científicos. ¿Cuáles son estas grandes cuestiones? A modo de ejemplo, mostramos las cuestiones científicas clave que fueron establecidas por los comités de expertos de ASTRONET –iniciativa creada por distintos organismos de financiación europeos, como el Observatorio Europeo Austral y la Agencia Espacial Europea, para definir la hoja de ruta de la Astronomía en la región en los próximos 15-20 años y mantener el liderazgo– cuando definieron el “Plan Estratégico de la Astronomía Europea para el siglo XXI”. Se establecieron cuatro grandes áreas de trabajo y para cada una de ellas se plantearon las preguntas abiertas que deberían abordarse durante ese periodo, así como las infraestructuras astronómicas necesarias para responder a ellas:

- ¿Comprendemos las situaciones extremas del universo?

¿Cómo comenzó el universo? ¿Cuáles son sus constituyentes básicos? ¿Qué son la materia y la energía oscura? ¿Podemos observar la gravedad extrema en acción? ¿Qué mecanismos explican las explosiones de supernovas y los estallidos de rayos gamma? ¿Cómo se interrelacionan los discos de acrecimiento, los chorros relativistas, los obje-

En términos de sensibilidad, desde las observaciones pioneras de Karl Jansky realizadas en 1930 hasta la situación actual se ha producido una mejora de doce órdenes de magnitud!

tos centrales supermasivos y los campos magnéticos en los grandes aceleradores cósmicos? ¿Qué aprendemos del universo a través de la radiación a altas energías y a través de los rayos cósmicos?

- ¿Cómo se formaron y evolucionaron las galaxias?

¿Cómo emergió el universo de las épocas oscuras? ¿Cómo ha evolucionado la estructura del universo? ¿Y cómo ha sido la evolución química del universo? ¿Cómo se retroalimentan entre sí el gas, las estrellas y el polvo en las galaxias? ¿Y cómo se formó nuestra galaxia, la Vía Láctea?

- ¿Cuál es el origen y cómo evolucionan las estrellas y los sistemas planetarios?

¿Cómo se forman las estrellas y los sistemas estelares? ¿Es universal la función inicial de masas (el número de estrellas que nacen por unidad de masa)? ¿Cuál es la retroalimentación entre el medio interestelar y las estrellas? ¿Cómo se forman y evolucionan los sistemas planetarios? ¿Cuál es la “demografía” de los planetas en nuestra galaxia? ¿Hay indicios de vida en los exoplanetas?

- El Sistema Solar. ¿Cómo nos ubicamos en el universo?

¿Entendemos en detalle los procesos físicos fundamentales del Sol? ¿Cuál es la historia dinámica del Sistema Solar? ¿Qué podemos aprender acerca de la formación y evolución del Sistema Solar a partir de la exploración *in situ*? ¿Dónde debemos buscar “vida” en el Sistema Solar?

Algunas de las grandes instalaciones

Resulta imposible hacer un inventario de todas las grandes instalaciones astronómicas. En este artículo detallamos algunas de ellas que funcionan en diferentes rangos del espectro electromagnético y que son accesibles para la comunidad astronómica española a través de la evaluación de pro-

puestas de observación por mérito científico.

El Gran Telescopio de Canarias (GTC)

Es un telescopio de espejo primario segmentado de 10,4 metros de diámetro instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos (Foto 1). Este telescopio es una iniciativa española, liderada por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y cuenta con la participación de México y Estados Unidos. Sus objetivos científicos son variados y ambiciosos, basados todos ellos en la enorme sensibilidad del telescopio. El primer instrumento que ha entrado en funcionamiento es OSIRIS, que tiene capacidad de imagen

y de análisis espectroscópico multiobjeto en el rango visible. Se han publicado ya los primeros resultados científicos que, combinados con datos provenientes de otros telescopios, han permitido los estudios de magnetares, la caracterización de las atmósferas planetarias de exoplanetas, la determinación precisa de la masa de un agujero negro estelar (5 masas solares) en un sistema estelar binario de rayos X, la caracterización de la reactivación de un cuásar como resultado de un encuentro o choque entre galaxias, el estudio de la rotura de la fotosfera de una estrella a través de su evolución espectral y su transformación en el espectro de una supernova, entre otros. El segundo instrumento, CANARICAM (una cámara y espectrógrafo, con capacidades de polarimetría y coronografía, en el infrarrojo térmico) estará disponible en los próximos meses.

Very Large Telescope (VLT)

VLT es el mayor instrumento de la Astronomía europea (Foto 2). Está situado en Cerro Paranal, a una altura de 2.400 metros. Pertenece al Observatorio Europeo Austral (ESO), del cual nuestro país forma parte. Está formado por cuatro telescopios de 8,2 metros de diámetro junto a otros cuatro telescopios auxiliares de 1,8 metros. Además, los telescopios pueden

VLT es el mayor instrumento de la Astronomía europea. Está situado en Cerro Paranal, a una altura de 2.400 metros. Pertenece al Observatorio Europeo Austral



Foto 1. Imagen del Gran Telescopio Canarias (GTC), situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos. Dispone de un espejo primario segmentado con un diámetro de 10,4 metros. Fuente: material gráfico cedido por el autor.

unirse interferométricamente alcanzando resoluciones de decenas de milisegundos de arco. Los telescopios de 8,2 metros disponen de la mejor instrumentación disponible, incluyendo cámaras de gran campo, cámaras con óptica adaptativa, espectrógrafos y espectrógrafos multiobjeto de alta resolución. Cubren un rango amplio del espectro electromagnético, desde el ultravioleta profundo (longitud de onda de 300 nanómetros) hasta el infrarrojo medio (24 micras).

EL VLT ha tenido un impacto enorme en la Astronomía observacional. Ha producido, resultados espectaculares como el estudio detallado de las órbitas de las estrellas en la vecindad del agujero negro ubicado en el centro galáctico, la primera imagen directa de un planeta extrapolar, la determinación de la expansión del universo basándose en el estudio de las supernovas tipo (Ia), la detección de las estrellas más viejas del universo (con una edad de 13.200 millones de años) o la confirmación del colapso de una hipernova, estrellas extremadamente masivas, como origen de los estallidos de rayos gamma.

Atacama Large Millimeter Array (ALMA)

ALMA es un interferómetro que, cuando esté en pleno funcionamiento hacia el año 2013, estará formado por 66 antenas, de



Foto 2. Imagen aérea del Observatorio VLT (Very Large Telescope) del Observatorio Europeo Austral (ESO), situado en Cerro Paranal (Chile). Pueden distinguirse los cuatro telescopios de 8,2 metros junto con los telescopios auxiliares de 1,8 metros. Disponen de instrumentación en el óptico e infrarrojo y pueden funcionar interferométricamente. Fuente: material gráfico cedido por el autor.

las cuales 54 tendrán 12 metros de diámetro y las 12 restantes tendrán 7 metros cada una (Foto 3). Trabaja en longitudes de onda submilimétricas (de 0,3 a 9,6 milímetros) que son aquellas en las que el gas y el polvo emiten la radiación. Está instalado en el desierto de Atacama (Chile), a 5.000 metros de altura, por sus excelentes condiciones de transparencia y estabilidad atmosféricas. Actualmente se encuentra en fase de comisionado, y producirá su primera ciencia a final de 2011. ALMA proporcionará una combinación única de sensibilidad, resolución angular, resolución espectral y calidad de imagen. Será el instrumento adecuado para obtener imágenes sobre la

El Gran Telescopio de Canarias (GTC) es un telescopio de espejo primario segmentado de 10,4 metros de diámetro instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos

formación de galaxias, estrellas y planetas, tanto en el continuo como en líneas de emisión. Se piensa que en el universo temprano existía esencialmente gas (fundamentalmente hidrógeno), a partir del cual se formaron las primeras estrellas en los primeros cien millones de años. Y se piensa también que estas estrellas eran muy masivas y luminosas, con un tiempo de vida muy corto, y que tras explotar como supernovas enriquecieron el medio interestelar con elementos químicos muy pesados. ALMA permitirá obtener información de estas primeras estrellas a partir de la emisión del polvo formado en sus envolturas. Por otro lado, ALMA tendrá la capacidad de penetrar

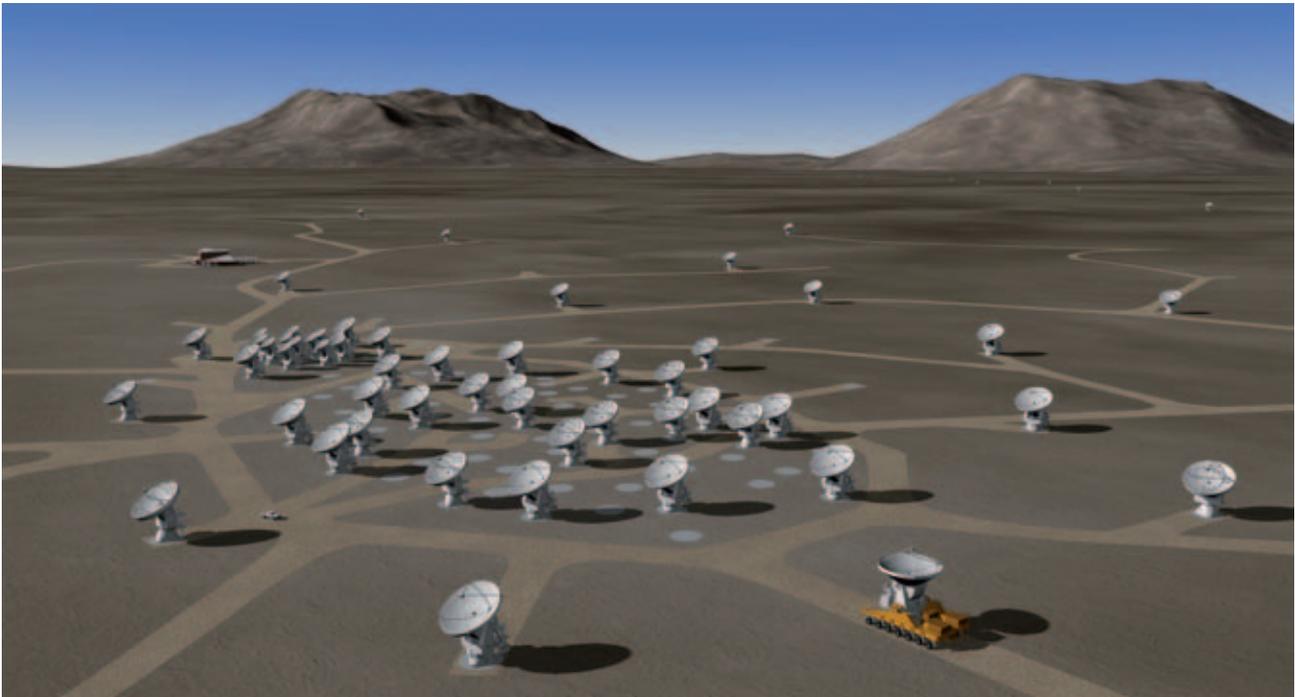


Foto 3. Imagen figurada de cómo quedará ubicado el interferómetro ALMA (Atacama Large Millimeter Array), situado en el desierto de Atacama (Chile). Trabaja a longitudes de onda (sub-)milimétricas. Actualmente se encuentra en la fase de comisionado, si bien la primera llamada para propuestas de observación en tiempo abierto ha sido realizada durante la primavera de 2011. Fuente: material gráfico cedido por el autor.

en las nubes moleculares donde se están formando nuevas estrellas y cartografiar las primeras etapas de su formación, los discos protoplanetarios e incluso los planetas jóvenes. Proporcionará además información exquisita sobre la química compleja del medio interestelar.

El futuro

Estos no son más que algunas de las infraestructuras de las que dispondremos los astrónomos en los próximos años. A ellas habrá que añadir

el telescopio espacial James Webb (JWST), sucesor natural del telescopio espacial Hubble, que trabajará en el infrarrojo y tendrá objetivos muy complementarios a los de ALMA. Habrá nuevos satélites en rayos X (IXO, Internacional X-Ray Observatory, todavía pendiente de una resolución final), que sucederán a XMM-Newton y CHANDRA. Existen incluso proyectos de interferómetros en rayos X como MAXIM. Será también el tiempo de los telescopios gigan-

tes en el óptico. En particular, ESO construirá el EELT (European Extremely Large Telescope), con un diámetro de 30 metros. En longitudes de onda de radio, SKA (Square Kilometer Array) es el futuro. Su enorme sensibilidad, gran campo de visión y resolución angular aportarán un avance científico en campos tan dispares como la formación de las primeras galaxias, el magnetismo cósmico, la gravedad extrema, o los sistemas binarios pulsar-agujero negro es-

telar, que serán fuentes únicas de ondas gravitacionales.

El futuro está aquí. Los astrónomos españoles tendremos la oportunidad de participar activamente en él y acceder de forma competitiva a la mayoría de las grandes infraestructuras científicas. Confiemos también en que podamos unirnos a aquellas, como SKA, en las que nuestro país no ha tomado hasta el momento una decisión sobre su participación. ■

CONTROLA TUS DERECHOS DE AUTOR

AUMENTA EL

CALIDAD VISIBILIDAD

DIFUSIÓN **IMPACTO**

PRESERVACIÓN **DE TU**

CIENCIA ACCESIBLE

INVESTIGACIÓN

ESTADÍSTICAS DE USO

ACCESO
ABIERTO



DIGITAL.CSIC

CIENCIA EN ABIERTO

<http://digital.csic.es>

04

**... en zonas
limítrofes**



Presente y futuro de la Biología Sintética

Podemos entender la Biología Sintética como el diseño y fabricación de componentes y sistemas biológicos que no existen en la naturaleza, así como las técnicas que permiten introducir modificaciones en los diseños de los sistemas biológicos ya existentes. El objetivo final es la creación de nuevos organismos capaces de responder a determinados estímulos de una forma programada, controlada y fiable.

Javier Macía y Ricard Solé

Universitat Pompeu Fabra

Si en lugar a dudas, el siglo XX será recordado como el siglo de la Física, mientras que el actual siglo XXI posiblemente pasará a la historia como el siglo de la Biología. A lo largo de las últimas décadas, el crecimiento acelerado de recursos y esfuerzos técnico-científicos, así como el impacto de los últimos descubrimientos y sus implicaciones socio-económicas, colocan a la Biología en una posición dominante

en el ámbito de las ciencias. Los avances en el estudio del cáncer o el cerebro prometen modificar muchas de nuestras ideas y acercarnos al origen y tratamiento de enfermedades hasta ahora invencibles. Muchos de estos avances son el resultado de mejores técnicas experimentales, pero también del desarrollo de modelos teóricos y de simulación por ordenador. Gracias a la colaboración entre investigadores, procedentes de distin-

tas disciplinas, ha sido posible que la Biología adopte una visión cuantitativa más cercana a la Física. Este encuentro entre disciplinas antes alejadas ha llevado al desarrollo de la llamada Biología de Sistemas, una disciplina en la que se considera la complejidad biológica en términos de sistemas en interacción, alejándose así del paradigma reduccionista dominante durante el siglo XX, dominado por la visión molecular de lo vivo.

En el terreno experimental, el desarrollo de la ingeniería genética y la posibilidad de manipular no ya reacciones o elementos concretos, sino células o procesos celulares complejos, han abierto la puerta a otra disciplina que cambiará sin duda nuestro conocimiento de lo vivo y sus límites: la Biología Sintética. Podemos entender esta como el diseño y fabricación de componentes y sistemas biológicos que no existen en la naturaleza, así



Javier Maciá.

Javier Maciá

Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad de Barcelona. Actualmente ejerce de Profesor en el Departamento de Ciencias Experimentales y de la Salud de la Universitat Pompeu Fabra (Barcelona) y trabaja en el laboratorio de Sistemas Complejos, dirigido por el doctor Ricard Solé.

Pese a que los ámbitos de investigación en los que participa son diversos pueden enmarcarse en el campo de la Biología de Sintética y de Sistemas. Más específicamente su investigación se centra en sistemas de computación no convencionales, y concretamente en sistemas vivos desde un punto de vista tanto teórico como de implementación experimental. Asimismo, trabaja en el estudio de comportamientos colectivos inducidos sintéticamente en bacterias mediante modificaciones genéticas. En los últimos años ha participado en proyectos europeos dedicados a los desarrollos de la primera protocélula sintética (PACE Project) y de circuitos computacionales formados por células modificadas genéticamente.

como las técnicas que permiten introducir modificaciones en los diseños de los sistemas biológicos ya existentes. El objetivo final es la creación de nuevos organismos capaces de responder a determinados estímulos de una forma programada, controlada y fiable. Esto es posible mediante la introducción de secuencias de ADN que codifican nuevos genes, muy a menudo procedentes de otras especies distintas de aquella sobre la que se actúa. Así, ocurre a menudo que una célula bacteriana es modificada genéticamente añadiendo genes extraños, ya sean estos procedentes de virus, otras bacterias o humanos. Estos nuevos genes y las nuevas regulaciones genéticas asociadas a ellos son capaces de inducir nuevos comportamientos (funciones) en las células que los reciben, permitiendo su *reprogramación*.

Sin lugar a dudas la biomedicina será una de las áreas que más se beneficiarán de estos avances en campos como la terapia génica o la regeneración de tejidos. Puede incluso permitir la obtención de los denominados fármacos inteligentes, formados por una envuelta sintética que contiene una molécula diagnóstica capaz de detectar indicadores patológicos y tomar la decisión de liberar o no el fármaco. No obstante, el campo de posibles aplicaciones es tan grande como la capacidad para imaginarlo. En la Tabla I, se muestra una lista de algunas de las potenciales aplicaciones de la Biología Sintética en las que se está trabajando actualmente. Logros como la producción de biocombustibles (hidrógeno o etanol), la conversión eficiente de residuos en bioenergía o el empleo de bacterias y hongos

Los avances en el estudio del cáncer o el cerebro prometen modificar muchas de nuestras ideas y acercarnos al origen y tratamiento de enfermedades hasta ahora invencibles

modificados capaces de eliminar compuestos tóxicos y descontaminar los ecosistemas, son ya una realidad.

El impresionante avance en el campo de la Biología Sintética durante la última década ha sido en gran medida consecuencia de aplicar una visión propia de la ingeniería en un contexto diferente como es un sistema biológico. Concebir los circuitos genéticos como circuitos de interruptores que activan o desactivan la expresión de un gen ha permitido desarrollar dispositivos como circuitos biestables (que pueden encontrarse en dos posibles estados, como una bombilla encendida o apagada) o circuitos osciladores que *a priori* parecen más propios de la Electrónica que de la Biología. En la actualidad, se ha llegado a crear circuitos capaces de tomar decisiones no triviales en función de las señales que reciben del entorno de acuerdo con un programa preestablecido, algo que sin lugar a dudas podemos definir como computación. La Tabla II muestra una lista de algunos de los avances más significativos de la última década. Buena parte de estos circuitos se han inspirado en los diseños propios de la Electrónica, pese a utilizar componentes celulares, como genes o proteínas, en lugar de transistores. Aunque esta inspiración en la



Ricard Solé.

Ricard Solé

Doctor en Física por la Universidad Politècnica de Catalunya. Profesor de la Universitat Pompeu Fabra (UPF), donde dirige el Laboratorio de Sistemas Complejos. Sus investigaciones en este campo abarcan desde la ecología teórica hasta el estudio de las redes sociales, las redes del lenguaje o las relacionadas con sistemas tan complejos como el tráfico o Internet. Es profesor externo del Santa Fe Institute, miembro senior del Center of Astrobiology, asociado a la NASA y consejero de la European Complex Systems Society.

En 2003, sus investigaciones ,en colaboración con Ramon Ferre, le valieron el premio Ciutat de Barcelona de Investigación Científica, por su trabajo «Least effort and the origins of scaling in human language», publicado en 2003 en la revista estadounidense *Proceedings of the national academy of sciences*.

Electrónica ha permitido rápidos y grandes avances puede también convertirse en el cuello de botella que limite el incremento en la complejidad de los dispositivos biológicos.

Los sistemas vivos presentan unas características propias que no aparecen en los sistemas electrónicos y que fuerzan a replantear las metodologías destinadas a crear biodispositivos. Varios son los factores que en la actualidad limitan el desarrollo de dispositivos más complejos, entre los que podemos destacar i) el desconocimiento sobre muchas de las piezas (genes, proteínas, etc.) que se usan, ii) el hecho de que al introducir estas piezas que forman los circuitos dentro de una célula hace que el comportamiento de estas partes sea impredecible debido, por ejemplo, a la existencia de interacciones no controladas con otras partes de la célula, iii) las posibles incompati-

bilidades entre distintas piezas que pueden proceder de especies diferentes, o finalmente, iv) el problema de conectar estas piezas entre sí. Precisamente este último de los problemas representa uno de los mayores retos a resolver. Mientras que en los circuitos electrónicos cada cable está físicamente separado del resto, en el entorno celular todo

está entremezclado y, por tanto, cada “conexión” debe realizarse mediante un elemento bioquímico distinto, lo que limita enormemente el tamaño de los circuitos que se pueden construir. Con el objetivo de resolver estas dificultades, varios grupos de investigación han planteado diferentes aproximaciones al problema de incrementar la complejidad

de los circuitos creados sin aumentar el resto de problemas asociados. La distribución de distintas partes de los circuitos entre distintos tipos celulares que coexisten parece ser una de las alternativas más prometedoras. De este modo, los circuitos biológicos no se localizarían en un único tipo celular sino que estarían distribuidos entre varios tipos celulares tales que por separado no son capaces de realizar la tarea prevista, pero que cuando se juntan pasan a actuar como un todo, logrando el objetivo deseado. Esta distribución de las tareas ente distintos tipos celulares permite reducir la manipulación genética necesaria en cada célula, minimizando así los problemas anteriormente citados y abriendo la puerta a la construcción de circuitos más complejos.

/// Tabla I. Potenciales aplicaciones de la Biología Sintética //////////////////////////////////////

Campo de aplicación	Descripción
Fármacos inteligentes	Un fármaco inteligente está formado por un envoltorio que contiene un fármaco y un mecanismo molecular de detección de patología. Cuando la patología es detectada el fármaco se libera al organismo. Un ejemplo de esta tecnología puede ser el diseño de microorganismos que detecten cambios en la concentración de hormonas, y respondan secretando ciertas moléculas o sintetizando determinadas proteínas.
Terapia genética	Consiste en el diseño de circuitos biológicos que detecten cambios fisiológicos anormales en las células y den lugar a una respuesta para corregir dicha anomalía o inducir a la eliminación de las células anormales, siendo el cáncer la aplicación más inmediata.
Reparación y regeneración de tejidos	Esta aplicación se basa en el diseño de sistemas formados por sensores capaces de reconocer la existencia de daños en determinados tejidos, unido a un grupo de enzimas capaces de reparar el daño
Biorremediación	Se basa en el empleo de bacterias y hongos modificados genéticamente capaces de eliminar compuestos tóxicos y descontaminar los ecosistemas.
Biosensores	Son dispositivos de análisis que se componen de un elemento capaz de reconocer e interactuar con sustancias o microorganismos de interés y de un sistema electrónico que permite procesar la señal producida por esa interacción.
Energía	Existen tres campos de investigación principal en cuanto a producción de bioenergía mediante el uso de microorganismos modificados genéticamente, capaces de producir hidrógeno o etanol, convertir residuos en energía o energía solar en hidrógeno.

/// **Tabla II. Algunos de los avances más relevantes de la última década** //////////////////////////////////////

Dispositivo	Año	Publicación
Dispositivo biestable: actúa como un elemento de memoria capaz de almacenar dos estados diferentes.	2000	"Construction of a genetic toggle switch in <i>Escherichia coli</i> ". Gardner et al. <i>Nature</i> 403, 339-342
Oscilador: genera una señal de salida (síntesis de una proteína) cuya concentración cambia de modo oscilante a lo largo del tiempo.	2000	"A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators". Elowitz et al. <i>Nature</i> 403, 335-338
Control de población: circuito que regula el número de bacterias creciendo en un cultivo. Cuando este número supera un umbral determinado se induce la muerte de las células excedentes hasta recuperar el nivel adecuado.	2004	"Programmed population control by cell-cell communication".. You et al. <i>Nature</i> 428, 868-871
Circuito pasa-banda: es un sistema formado por una población de bacterias modificadas capaz de detectar la presencia de una determinada molécula si su concentración se encuentra entre dos niveles (alto y bajo) previamente establecido.	2005	"A synthetic multicellular system for programmed pattern formation". Basu et al. <i>Nature</i> 434, 1130-1134
Circuito computacional binario: este circuito responde de forma programada a diferentes combinaciones de señales externas expresando o no una determinada proteína. Se trata de un circuito computacional conceptualmente idéntico a los circuitos electrónicos presentes en los ordenadores.	2007	"A universal RNAi-based logic evaluator that operates in mammalian cells".. Rinaudo et al. <i>Nature Biotechnology</i> 25, 795 - 801
Circuito computacional binario distribuido: se trata de circuitos capaces de implementar funciones binarias complejas, donde el circuito está distribuido entre distintos tipos celulares.	2011	"Distributed biological computation with multicellular engineered Networks". Regot et al. <i>Nature</i> 469, 207-211 "Robust multicellular computing using genetically encoded NOR gates and chemical 'wires'". Tamsir et al. <i>Nature</i> 469, 212-21

Posiblemente la combinación de nuevos principios de diseño y de los esfuerzos que se están realizando en la estandarización de piezas biocompatibles permitirán superar en un futuro próximo las actuales limitaciones. En este contexto cabe hacer una mención especial a la iniciativa del Massachusetts Institute of Technology (MIT) conocida como *Registry of Parts*. Se trata de una colección de cientos de piezas biológicas que pueden ser ensambladas siguiendo un procedimiento estándar para la creación de nuevos dispositivos. Multitud de grupos investigadores de todo el mundo utilizan esta colección de piezas en sus investigacio-

nes, a la que a su vez contribuyen con nuevas aportaciones, en un ejemplo de cooperación científica internacional.

Sin embargo, más allá de los actuales limitaciones científico-técnicas y de la necesidad de nuevos enfoques no inspirados en la tecnología electrónica actual queda latente la cuestión de hasta dónde será posible llegar en este nuevo campo, cuánto de lo que hoy se especula podrá ser una realidad mañana. La respuesta a esta pregunta sigue siendo una incógnita. El físico Freeman Dyson ha apuntado correctamente que la emergencia de la Biología Sintética marca el

final de la evolución darwiniana tal y como la conocíamos. Mediante una intervención en los mecanismos reguladores naturales, podemos acceder a todo un universo de posibilidades, muchas de las cuales jamás habrían sido alcanzadas por la evolución natural. Por ese mismo motivo, tal vez, seremos capaces de resolver problemas hasta ahora inabordables.

Posiblemente todavía es demasiado pronto para poder intuir en su totalidad el potencial de esta nueva disciplina. Mirando de nuevo al campo de la Electrónica como referente histórico cercano no podemos olvidar que desde el

desarrollo del primer transistor en 1948 hasta la creación de los primeros dispositivos microelectrónicos comerciales a principios de los años setenta fue necesario esperar más de veinte años. Es muy probable que debamos esperar 10 o 15 años para que la Biología Sintética llegue a un nivel de desarrollo suficiente para su aplicación directa en campos como la Biomedicina o las aplicaciones de biorremediación medioambiental. De lo que no cabe duda es de que estamos asistiendo y participando activamente en una de las revoluciones científicas y tecnológicas que decidirán el curso del conocimiento futuro. ■

Información cuántica

El artículo de Antonio Acín nos introduce en la Teoría de la Información Cuántica. Una teoría que abre nuevos caminos en el modo en el que procesamos información. Sus resultados más relevantes nos llevan a ordenadores y simuladores más potentes o a esquemas de criptografía seguros.

Antonio Acín

Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)

La sociedad actual es a menudo bautizada como la sociedad de la comunicación, debido a la importancia que los medios de comunicación desempeñan en nuestra realidad. Hoy en día, y a través de nuestro ordenador y hasta del teléfono móvil, podemos acceder a cualquier punto del planeta y obtener información detallada de cualquier tema, lo que era inimaginable hace unos años. Ahora bien, ¿cuáles son las reglas que gobiernan los protocolos de información que utilizamos? Por ejemplo, supongamos que queremos comprimir una imagen para enviársela a un amigo. Todos entendemos que la imagen podrá ser tanto más comprimida, cuanto menor sea su complejidad: la fotografía de un cielo azul se

puede comprimir más que una imagen de una ciudad en un día de tráfico. Pero del mismo modo, entendemos que para cualquier imagen, habrá un límite en su compresión, que no podrá ser arbitrario. ¿Podemos determinar ese límite? Más en general, ¿existe alguna teoría que describa los procesos de transmisión y procesamiento de información y, por ejemplo, establezca cuántos bits son necesarios para comprimir una imagen dada? La respuesta a esta pregunta es afirmativa y se trata de la Teoría de la Información.

Las bases de la teoría fueron establecidas por Claude Shannon, poco antes de 1950. En una serie de trabajos pioneros, introdujo la llamada “entropía de Shannon”

y demostró cómo la información podía ser enviada por canales ruidosos, calculando la tasa de transmisión de información óptima para cada canal. A partir de entonces, la teoría fue creciendo y su desarrollo corrió en paralelo a la consolidación de nuestra sociedad de la comunicación. Una de las grandes virtudes de la teoría es su abstracción matemática. Tomemos la unidad de información, el bit. La manera de realizarlo es a través de un sistema que pueda tomar dos niveles. Por ejemplo, supongamos una moneda: se puede asociar el 0 binario con la cara y el 1 con la cruz. Decimos entonces que la moneda proporciona el soporte físico para el bit de información o, también, que el bit se ha codificado a través de la mone-

da. Dejando de lado las claras desventajas prácticas, toda la comunicación se podría llevar a cabo de manera equivalente a como se hace hoy en día por medio de monedas. Y, por supuesto, el mismo razonamiento es válido para cualquier otro modo de codificar información que se nos ocurra: desde el punto de vista de la información y las aplicaciones que con ella se lleven a cabo, el soporte físico en el que se almacene no juega ningún papel.

A principios de 1980, sin embargo, una serie de investigadores interesados en la Teoría de la Información se plantearon el siguiente escenario: de seguir adelante el avance tecnológico en miniaturización de los dispositivos que utilizamos para la transmisión y el proce-

samiento de la información, seremos capaces en un futuro próximo de codificar, o almacenar, información en partículas atómicas, a una escala microscópica. Sin embargo, es bien conocido que las leyes que rigen el mundo a nuestra escala, el mundo macroscópico, no son las mismas que en el microscópico. La Física newtoniana, basada en las ecuaciones de movimiento de Newton, refleja sin problemas lo que pasa y vemos a nuestro alrededor. Sin embargo es incapaz de predecir los fenómenos que se dan a una escala microscópica entre, por ejemplo, átomos y fotones. Fue de hecho este fracaso de la Física newtoniana a la hora de describir una serie de experimentos a finales del siglo XIX el que llevó al nacimiento de una nueva teoría física, la Física cuántica, que podía dar una explicación satisfactoria a todas estas situaciones. La pregunta que se planteó entonces, hacia 1980, era: ¿supondrá el hecho de codificar información en partículas que se rigen por leyes físicas distintas un cambio en el modo en el que transmitimos y procesamos información?, ¿pueden las leyes cuánticas, que supusieron una revolución en nuestra comprensión de la naturaleza a escala microscópica, cambiar también la Teoría de la Información? A primera vista, esperaríamos que la res-



Antonio Acín.

puesta a esta pregunta fuera negativa: la Teoría de la Información es una formulación abstracta y matemática, donde la Física tiene poco, o nada, que decir. Sin embargo, esta primera intuición se revela falsa: sorprendentemente, al codificar información en partículas cuánticas, se abren nuevas posibilidades y aplicaciones que no encuentran análogo en la Teoría de la Información que hasta entonces se había desarrollado. Las leyes cuánticas abren un nuevo abanico a explorar, y ese es precisamente el objetivo de la nueva teoría: proporcionar los principios que gobiernan el procesamiento y transmisión de información cuando esta se codifica en partículas cuánticas.

¿Por qué entonces?

Como se ha mencionado, la Teoría de la Información

Antonio Acín

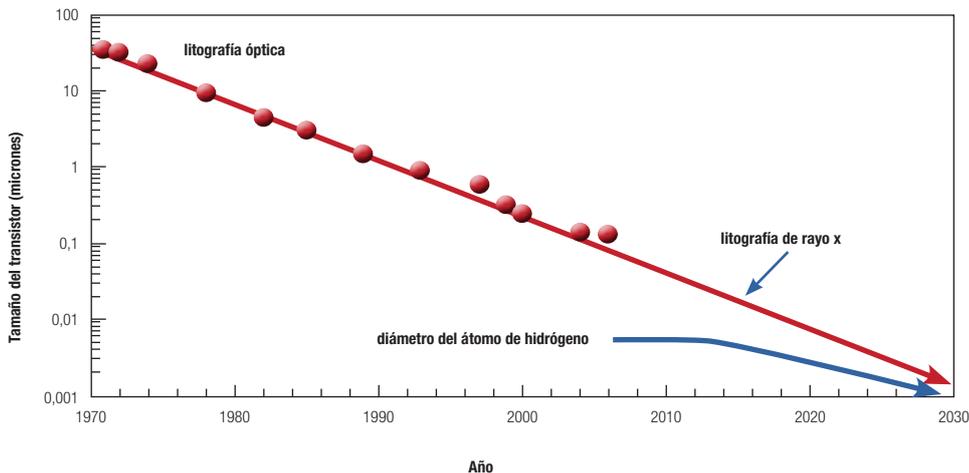
Ingeniero Superior de Telecomunicaciones por la Universitat Politècnica de Catalunya, licenciado en Ciencias Físicas por la Universitat de Barcelona, y doctor en Física por la misma universidad. Su formación post-doctoral consiste de una primera estancia en el Grupo de Física Aplicada de la Universidad de Ginebra y una segunda en el ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas.

En la actualidad, es Profesor ICREA en el ICFO, donde dirige el grupo de Teoría de la Información Cuántica. En 2008 fue galardonado con una beca Starting Grant del European Research Council (ERC) y en 2010 ganó, junto a Stefano Pirronio y Serge Massar de la Universidad Libre de Bruselas, el premio de la revista francesa *La Recherche* al mejor trabajo del año con participación de una entidad francófona. Su investigación se centra sobre todo en la Teoría de la Información Cuántica, disciplina que estudia cómo los fenómenos cuánticos pueden utilizarse para diseñar nuevas maneras de procesar y transmitir la información. Además, cubre aspectos de Fundamentos de Física Cuántica, Óptica Cuántica, Física Estadística y Física Condensada.

Cuántica ha supuesto un cambio de paradigma en el modo en el que concebimos la información: las leyes físicas de los dispositivos que utilizamos para su almacenamiento y procesamiento influyen, de manera crítica, en las tareas que se pueden llevar a cabo. Sin embargo, ¿por qué este escenario empezó a plantearse hacia los 80 y no pocos años después de los trabajos de Shannon en los 50? De hecho, la Física cuántica ya estaba entonces en su total apogeo y había sido formalizada de manera rigurosa por los trabajos de John von Neumann. Si los ingredientes para combinar información y Física cuántica ya estaban allí, ¿por qué no se planteó en aquel entonces la aplicación del formalismo cuántico para la comunicación y transmisión de información?

La respuesta a esta pregunta viene de la tecnología. Todos vemos en nuestra realidad cotidiana como el avance tecnológico en miniaturización de los dispositivos de información es impresionante e imparable. Con un pequeño portátil, podemos llevar a cabo todo aquello para lo que necesitábamos un gran ordenador hace un par de años. Por no hablar de la capacidad de memoria de los lápices de USB o los móviles de última generación. La manera más gráfica de representar esta evolución es por medio de la Ley de Moore (véase Figura 1). En realidad, no se trata de ninguna ley, sino más bien de una observación realizada por Gordon Moore, uno de los fundadores de Intel. Al estudiar la evolución de los dispositivos de información con el paso de tiempo, Moore notó

/// Figura 1. La ley de Moore



La gráfica muestra la evolución del tamaño de los transistores utilizados para procesar información con el paso del tiempo. Asumiendo que la tecnología será capaz de mantener esta evolución como hasta ahora, se estará pronto en condiciones de almacenar información en partículas atómicas. A esta escala, el comportamiento de las partículas viene descrito por la Física cuántica

Fuente: imagen cedida por el autor.

que el tamaño de los mismos disminuía de manera exponencial con el tiempo: se reducía a la mitad cada 18 meses. De seguir adelante esta mejora exponencial, tendencia que por ahora se ha mantenido a pesar de pequeñas correcciones, estaremos pronto codificando información en partículas atómicas. Esta predicción de futuro fue la motivación principal que llevó a estos investigadores a plantearse un escenario cuántico para transmitir y procesar información y, por tanto, al nacimiento de la Teoría de la Información Cuántica.

Resultados obtenidos

A partir de su nacimiento en los años 80, la Teoría de la Información Cuántica se ha ido consolidando como un campo científico emergente, de un gran carácter interdisciplinar que atrae el interés de muy distintas comunidades, desde matemáticos y físicos teóricos hasta experimentales e ingenieros. Muchos resultados han aparecido en estos años y es complicado trazar aquí un resumen detallado de todos ellos. Sin embargo, existe seguramente un consenso generalizado en la comunidad acerca de las aplicaciones más

relevantes que el campo nos ha proporcionado hasta hoy en día: la computación cuántica, la simulación cuántica y la criptografía cuántica.

Uno de los resultados fundamentales es la posibilidad de que un ordenador cuántico tenga una capacidad de cálculo mucho mayor que la de un ordenador clásico. Y es importante señalar que nos referimos, en la anterior frase, a una diferencia impresionante (exponencial): existen problemas para cuya solución un ordenador basado en la Física clásica tardaría años, mientras que

para uno cuántico se trataría de horas. De un modo quizás demasiado simplista, podríamos decir que un ordenador cuántico sería el equivalente, en un entorno cuántico, de un ordenador como los de hoy en día: se trata de un dispositivo que es capaz de preparar un estado arbitrario, realizar operaciones sobre él y leer el resultado obtenido. Es decir, como un ordenador actual, si bien todo en un soporte cuántico, constituido, por ejemplo, por una serie de átomos sobre los que se pueden realizar operaciones de manera controlada. A día de hoy, no está claro en qué situaciones un ordenador cuántico proporciona una ventaja significativa sobre el equivalente clásico. Entender qué problemas son sencillos y cuáles complejos para un ordenador cuántico, y cómo estos resultados se comparan con el clásico, son uno de los objetivos primordiales de la computación cuántica, subdisciplina de la Teoría de la Información Cuántica.

El segundo resultado que queremos destacar es el de la simulación cuántica. Un problema frecuente para muchos estudios científicos, no necesariamente en Física, es que la simulación de sistemas cuánticos de muchas partículas requiere de una gran potencia de cálculo. Es bien sabido que una gran parte de la actividad investigadora en cualquier dis-

ciplina consiste en simulaciones en ordenadores: se tiene un modelo teórico que se sospecha que pueda reproducir unos resultados experimentales, y se simula en un ordenador clásico para confirmar si estas sospechas son correctas. Sin embargo, y debido a la ubicuidad de la Física cuántica en cualquier campo de la ciencia, existen muchos problemas que requieren la simulación de sistemas cuánticos de muchas partículas, lo que es extremadamente complejo en los ordenadores basados en la Física clásica. La idea del simulador cuántico pasa por construir un sistema cuántico *ad hoc* que se pueda controlar, de cara a poder simular

otros sistemas cuánticos desconocidos. En este caso, las aplicaciones están más enfocadas hacia la ciencia, ya que disponer de un buen simulador de sistemas cuánticos supondría un paso fundamental en campos como, por ejemplo, la Física de la materia condensada o la Química cuántica. Pero además, está claro que las aplicaciones prácticas *a posteriori* de los resultados científicos obtenidos, consecuencia de la simulación de sistemas cuánticos complejos, serían muy relevantes.

El último resultado consiste en la criptografía cuántica: utilizando información codificada en estados cuánticos, dos

partes honestas pueden enviarse información de manera totalmente segura. De hecho, se puede demostrar que cualquier intento de leer la información por parte de un adversario será detectado y la comunicación, ahora insegura, abortada. La criptografía cuántica es una de las ideas más potentes del campo y que de un modo cristalino ejemplifica las virtudes y el cambio de paradigma que en él se ha realizado. Es bien conocido el Principio de Incertidumbre de Heisenberg, que demuestra que un observador, al intentar medir el estado de una partícula cuántica, lo modifica. En general, este resultado se presenta como una de las indeseables consecuencias de la teoría cuántica. La criptografía cuántica revierte este punto de vista. Aceptémoslo, está demostrado por cualquiera de los experimentos que se realizan en cualquier laboratorio del mundo que la Física cuántica es correcta y que, por tanto, también lo es el Principio de Incertidumbre. Entonces, ¡aprovechémoslo para encriptar información de un modo seguro! La criptografía cuántica no hace más que explotar este principio: si un adversario intenta leer la información codificada en el estado cuántico, su intervención será detectada. Lo que hasta hace poco era visto con un halo negativo es ahora el factor clave para una aplicación de claro interés práctico.

Uno de los resultados fundamentales es la posibilidad de que un ordenador cuántico tenga una capacidad de cálculo mucho mayor que la de un ordenador clásico

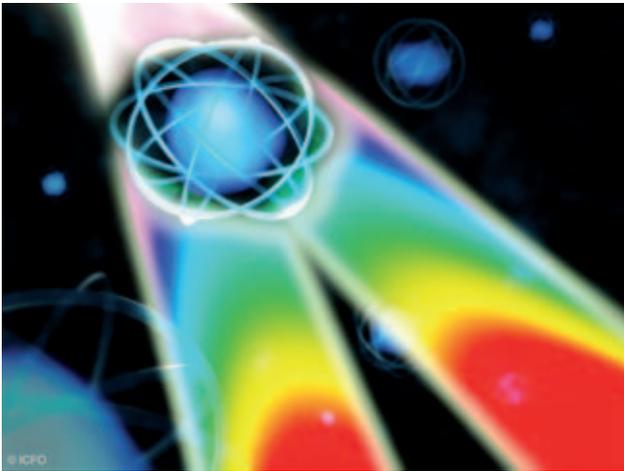


Foto 1. Información en partículas atómicas. El objetivo principal de la Teoría de la Información Cuántica es entender cómo se puede manipular y procesar información almacenada en partículas cuánticas. Nuevas aplicaciones son posibles gracias a las especiales propiedades de estas partículas, que no tienen análogo en nuestro mundo macroscópico descrito por la Física newtoniana. Fuente: ICFO.

Dificultades encontradas

Llegados a este punto, la pregunta natural que surge es que, si bien todos estos resultados son tan prometedores, ¿por qué no disponemos ya de dispositivos basados en estas ideas? ¿Por qué no tenemos un ordenador cuántico? El inconveniente que se encuentra es de tipo tecnológico: gran parte de las aplicaciones que se han descrito requieren un conocimiento de esta índole muy exigente, ahora mismo solo en las manos de algunos de los mejores laboratorios de Física experimental del mundo. El motivo radica en que se requiere la manipulación de muchas partículas atómicas de manera altamente controlada para que: (i) las partículas puedan interactuar en-

tre ellas, pero (ii) no lo hagan con el entorno. De hecho, la interacción no controlada con el entorno, también conocida como “decoherencia”, es el gran enemigo práctico de las aplicaciones de la Teoría de la Información Cuántica. Estas interacciones destruyen las propiedades cuánticas de las partículas, por lo que es imposible obtener resultados que vayan más allá de lo que es posible utilizando la Física clásica. Es precisamente la decoherencia la razón por la que nuestro mundo no es cuántico: todos los fenómenos cuánticos, a menudo tan sorprendentes, no aparecen en nuestra realidad dado que se requeriría para ello controlar de manera muy precisa todas las posibles interacciones con el entorno.



Foto 2. Comunicaciones cuánticas por satélite. Diversas universidades y centros de investigación europeos trabajan junto a la Agencia Espacial Europea en un proyecto para la realización de comunicación cuántica por satélite. El objetivo es colocar una fuente de pares de fotones a un satélite, lo que permitiría realizar protocolos de criptografía cuántica a grandes distancias. Fuente: ICFO.

Estas consideraciones tienen un papel muy importante en el caso de un ordenador cuántico: el grado de control experimental de partículas microscópicas para la realización de este ordenador es impensable a día de hoy, y seguramente se tardará algunos años en lograrlo. La simulación cuántica, sin embargo, y sin entrar en detalles, es menos exigente a este respecto. Es probable que en los próximos años se tengan los primeros simuladores, basados, por ejemplo, en átomos atrapados en retículos ópticos, que sean capaces de simular sistemas que no puedan ser representados ni con el mejor de los superordenadores actuales o futuros. Si esto sucediera, nos encontraríamos, sin lugar a dudas, ante un resultado revolucionario. Finalmente, la criptografía cuántica es, con diferencia, la aplicación menos exigente desde el punto de vista tecnológico: ¡ya está en el mercado! Existen en la actualidad empresas que comercializan dispositivos de criptografía cuántica. Se trata, por tanto, de una tecnología mucho más madura. De hecho, también existe una colaboración entre distintas universidades y centros de investigación europeos, junto a la Agencia Espacial Europea (ESA), para poner una fuente de fotones en uno de los

módulos de la aeronave Columbus. Esta fuente permitiría realizar protocolos de criptografía cuántica entre dos partes honestas situadas a gran distancia por satélite (véase Foto 2).

Conclusiones

En este artículo, se ha presentado una introducción a la Teoría de la Información Cuántica. Una teoría que abre nuevos caminos en el modo en el que procesamos información: ordenadores y simuladores más potentes o esquemas de criptografía seguros son los resultados más relevantes. Antes de concluir, valdría la pena considerar las siguientes reflexiones. Primero, más allá de si el ordenador cuántico pueda o no construirse, el campo ha supuesto una revolución en nuestro modo de entender la información. La información tiene una naturaleza física, ya que, como se ha mencionado, las leyes físicas tienen mucho que decir al respecto de cómo esta puede manipularse. La segunda reflexión es que, tarde o temprano, las tecnologías de la información llegarán al mundo microscópico y deberemos plantearnos cómo las leyes cuánticas pueden ser utilizadas en el nuevo escenario. ¿Por qué no hacerlo ahora? ¿O es que alguien duda de que esto vaya a pasar pronto? ■

www.fundacionareces.tv



Un canal de conocimiento

fundacionareces.es



Cuando la Economía se encontró con la Fisiología

¿Cómo tomamos decisiones los seres vivos? Una pregunta interesante, sobre todo si la referimos a los seres humanos. Diferentes disciplinas han abordado la cuestión, buscando qué nos diferencia a unos de otros para que, ante situaciones muy similares las respuestas sean tan variadas. Tradicionalmente, dichas diferencias se han investigado desde una perspectiva psicológica o sociocultural, no atendiendo a las diferencias biológicas entre individuos.

Enrique Turiégano

Universidad Autónoma de Madrid (UAM)

En los cinco últimos años se han recabado interesantes resultados, considerando las diferencias biológicas entre las personas. En ellos se describe cómo algunas diferencias fisiológicas entre individuos afectan a la toma de decisiones complejas. La idea no es nueva, hace tiempo que se conocen variables fisiológicas (como los niveles hormonales) que influyen en nuestro comportamiento. Pero en general, este es un conocimiento fundado

en correlaciones, que sustentan muy débilmente relaciones de causalidad entre la variable y el comportamiento. La realización de experimentos en condiciones estandarizadas no garantiza, pero hace más plausible, identificar relaciones causales.

La Economía experimental proporciona los métodos experimentales adecuados para realizar esta clase de estudios: una serie de juegos estratégicos sencillos y muy bien estu-

diados por los economistas. Estos juegos son simplificaciones de situaciones sociales comunes, reproducidas en laboratorio, en las que los beneficios materiales que los sujetos obtienen de su decisión dependen también de las decisiones que otros toman. Así se consiguen resultados fácilmente cuantificables y, además, replicables. El más popular de ellos es el dilema del prisionero. En este juego se pone de manifiesto la tendencia de los individuos a coope-

rar, entendiéndola como tomar una decisión que maximiza el bienestar colectivo pero no necesariamente el bienestar propio. En el dilema del prisionero participan dos jugadores que han de decidir sin coordinarse (sin comunicarse) si cooperar o no el uno con el otro. El pago que cada uno de ellos recibe depende de su decisión y de la que tome el contrario. La teoría económica predice que ninguno de los jugadores cooperará, aunque la recompensa individual de cada uno sería



Enrique Turiégano.

mayor si cooperasen. Sin embargo en los experimentos los humanos cooperamos más de lo esperado.

La investigación en esta área ha empleado además otros tres juegos: el juego del dictador, el del ultimátum y el *Trust Game*. El primero es muy sencillo: se entrega a un jugador una suma de dinero y se le da la posibilidad de compartirla con una segunda persona desconocida, sin ninguna clase de respuesta por parte de este segundo participante. Es un modo directo de medir el altruismo.

El juego del ultimátum es parecido, pero el segundo individuo (el “receptor”) puede decidir aceptar el reparto que el

primero propone o rechazarlo. Y, en caso de rechazarlo, ninguno de los dos individuos implicados recibe nada. Este juego permite medir la tendencia del segundo jugador a castigar una oferta que considere injusta (a costa de su beneficio). La conducta racional es aceptar cualquier cantidad positiva. Pero los seres humanos, al contrario que otros animales como los chimpancés, solemos rechazar ofertas por debajo del 20% de la cantidad inicial.

En el *Trust Game* hay dos personas, A y B. A la persona A se le entrega una cantidad inicial de dinero. De esta cantidad inicial, A decide si le da algo a B (pago α). Esta cantidad se triplica antes de ser entregada a B. De este dinero, B

Enrique Turiégano

Doctor en Biología por la Universidad Autónoma de Madrid. Realizó su tesis doctoral en el laboratorio de la doctora Inmaculada Canal, investigando la toma de decisiones ligada a la selección sexual en *D. melanogaster*. Adquirió formación postdoctoral en el Departamento de Economía de la Universidad de Edimburgo bajo la tutela del Dr. Santiago Sánchez-Pages. Su investigación se centra en analizar en qué medida diferentes variables con base fisiológica, como los niveles actuales y pretéritos de diferentes hormonas o la simetría, se asocian al modo en que los individuos se comportan en diferentes juegos económicos. En la actualidad es profesor ayudante doctor en el Departamento de Biología de la UAM.

puede decidir “devolver” algo a A (pago β). El pago α refleja la confianza (de A en B) y el pago β refleja la honradez de B.

Veamos ahora algunos ejemplos de los resultados obtenidos al emplear protocolos de la Economía experimental para estudiar los efectos de algunas variables fisiológicas sobre nuestro comportamiento. O, visto de otro modo, ejemplos de los resultados obtenidos al emplear la Fisiología para explicar las discrepancias con la predicción teórica que encuentra la Economía experimental. Estas nuevas respuestas surgen de emplear las herramientas habituales en una disciplina para tratar de responder preguntas que, en principio, le son ajenas.

La oxitocina y la vasopresina

La oxitocina y la vasopresina son hormonas implicadas en la regulación del parto y la diuresis, respectivamente. Además, recientemente se les ha implicado en el establecimien-

En los mamíferos, la oxitocina se asocia a la reducción del estrés social, facilitando así el acercamiento entre individuos. Por su parte, la vasopresina está implicada en la aparición en machos de comportamientos de protección de la pareja y la prole

to de relaciones de fidelidad y concordia entre individuos. En los mamíferos, la oxitocina se asocia a la reducción del estrés social, facilitando así el acercamiento entre individuos. Por su parte, la vasopresina está implicada en la aparición en machos de comportamientos de protección de la pareja y la prole.

Estas funciones quedaron bien demostradas en experimentos realizados con especies de topillos americanos (género *Microtus*), algunos monógamos y otros polígamos. Las hembras de la especie monógama a las que se les suministra oxitocina establecen fuertes vínculos con machos desconocidos. Asimismo, al facilitar vasopresina a machos monógamos estos desarrollan su típico comportamiento protector masculino con hembras desconocidas. Aún más sorprendente es que reproducir el patrón de expresión del receptor de la vasopresina del topillo monógamo (*M. ochrogaster*) en un topillo polígamo macho (*M. montanus*) transforma a estos individuos polígamos en monógamos. Por tanto, el patrón de expresión del receptor en el cerebro parece determinar este comportamiento tan complejo. Lo que nos lleva a la siguiente pregunta: ¿explicaría este patrón las diferencias entre individuos?

Administrar oxitocina aumenta la cantidad de dinero que se ofrece al individuo receptor en el juego del ultimátum pero no lo hace en el juego del dictador, donde no hay respuesta posible y, por tanto, los participantes no han de intentar considerar qué sentimientos provoca su oferta en el segundo individuo

Parece que sí. Existen de forma natural individuos con diferente patrón de expresión. Distintos alelos del gen del receptor V1a (uno de los receptores de la vasopresina) hacen que su portador presente diferentes patrones de expresión que afectan a su comportamiento. Respecto al tema que nos ocupa, los individuos que

presentan alguno de estos alelos tienden a ser menos altruistas que el resto de la población en el juego del dictador.

También se han puesto a prueba los efectos directos de estos neuropéptidos sobre el comportamiento humano, suministrándolos por vía nasal a los sujetos experimentales. Los resultados obtenidos con la oxitocina son los más interesantes. En el *Trust Game* las personas que participando en el rol A recibieron oxitocina mostraron más confianza en el posible inversor (persona B), proporcionándole una mayor cantidad de dinero. Lo más curioso es que ese incremento no se producía si se les decía que el retorno monetario no lo decidiría una persona, sino que sería al azar. Es decir, que el efecto de la hormona es específico para interacciones sociales. Esto mismo se comprobó empleando, simultáneamente, el juego del ultimátum y el juego del dictador. Administrar oxitocina aumenta la cantidad de dinero que se ofrece al individuo receptor en el juego del ultimátum pero no lo hace en el juego del dictador, donde no hay respuesta posible y, por tanto, los participantes no han de intentar considerar qué sentimientos provoca su oferta en el segundo individuo. Parece que la oxitocina aumenta la empatía que los participantes sienten ha-

cia la otra persona. Este sentimiento empático también causa que en el *Trust Game* se produzca un incremento endógeno de oxitocina en el individuo B cuando el individuo A ha confiado en él (lo que correlaciona con un mayor pago β , es decir, B da una respuesta más honrada).

La testosterona

La testosterona es una hormona esteroide que, además de múltiples efectos en el desarrollo y la Fisiología reproductora, promueve en los hombres diversos comportamientos enfocados a mejorar su estatus. Los niveles de testosterona se relacionan en las especies estudiadas con índices de bienestar general, capacidad física y éxito reproductivo.

El efecto más popular y extendido de la testosterona sobre el comportamiento tiene que ver con altos niveles de agresión. Esta idea, no errónea pero incompleta, se basa en resultados empíricos obtenidos tanto con roedores como con personas. Por un lado, a partir de experimentos realizados con ratas y ratones a los que se les suministraba la hormona, se observa que la agresión directa es el único modo que tiene el macho de imponerse a otros, al no ser estas especies sociales. Por otro, se advierten fuertes correlaciones entre niveles de agresión

y de testosterona en diferentes poblaciones humanas (internados, prisiones). Aunque en estos contextos la agresión también podría ser el único mecanismo para mejorar el estatus. En contraste, hay otras evidencias que no sustentan la relación unívoca entre testosterona y agresividad. Por ejemplo, la administración de la hormona a seres humanos no siempre provoca mayor agresividad ni competitividad (y sí, por el contrario, lo provoca la creencia de haber recibido la hormona). Esto sustenta la idea alternativa de que la testosterona fomenta comportamientos enfocados a mejorar el estatus en el individuo. En ocasiones esto consiste en competir directamente, pero a veces también sirve a ese fin dar muestras de filantropía (incurrir en pérdidas para beneficiar a otros).

El efecto de la testosterona sobre el comportamiento se ha analizado en numerosas ocasiones en ambos roles del juego del ultimátum. En este juego los hombres que rechazan ofertas bajas tienden a presentar mayores niveles de testosterona. Es decir, castigan económicamente a quien hizo una oferta considerada injusta a costa de sus propios beneficios (ver Figura 1). Respecto al efecto sobre la oferta, los experimentos realizados suministrando la hormona

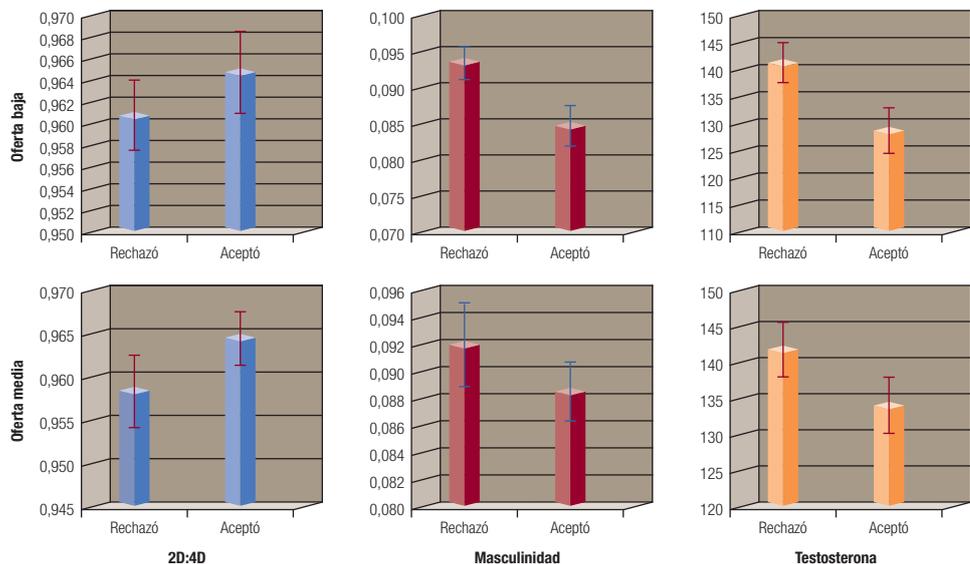
a los participantes han generado resultados contradictorios. En algunos casos los hombres a los que se les suministró la hormona hacen mayores ofertas. Pero en otros casos estas son inferiores o, incluso, administrar la hormona no tuvo efecto. Esta ausencia de efecto de la testosterona se ha detectado en ocasiones en los otros tres juegos (juego del dictador, *Trust Game* y dilema del prisionero). Suministrar testosterona produce resultados tan variados porque no se ha tenido en cuenta la regula-

ción adaptativa de los niveles de la hormona (la denominada *challenge hypothesis*, descrita hace mucho tiempo en las aves). Esta regulación hace que una situación potencialmente competitiva puede implicar o no un incremento de la hormona dependiendo, entre otras cuestiones, del estatus percibido en el adversario. Es decir, que los niveles de testosterona solo aumentarán cuando se prevé una interacción que, de resolverse favorablemente, conlleva una mejora de estatus. La interacción,

claro, puede o no ser agresiva. Esta hipótesis se ve apoyada por resultados que explicaremos más adelante.

La testosterona es imprescindible en el desarrollo de los hombres, siendo responsable de masculinizarlos en el proceso embrionario y la adolescencia. Además de los efectos que todos conocemos, los niveles de testosterona en estos periodos afectan a la configuración del sistema nervioso de los individuos y, consecuentemente, a su comportamien-

/// Figura 1 //////////////////////////////////////



En la imagen se muestran los niveles de diferentes variables relacionadas con la testosterona en función de la respuesta dada (aceptación o rechazo) a ofertas bajas (15% de la cantidad inicial) y medias (30% de la cantidad inicial) hechas a hombres en el juego del ultimátum.

Fuente: material gráfico cedido por el autor.

LOS JUEGOS

Dilema del prisionero. En este juego participan dos jugadores que han de decidir sin coordinarse (sin comunicarse) si cooperar o no el uno con el otro. El pago que cada uno de ellos recibe depende de su decisión y de la que tome el contrario. La teoría económica predice que ninguno de los jugadores cooperará, aunque la recompensa individual de cada uno sería mayor si cooperasen. Sin embargo en los experimentos los humanos cooperamos más de lo esperado.

Juego del dictador. Se entrega a un jugador una suma de dinero y se le da la posibilidad de compartirla con una segunda persona desconocida, sin ninguna clase de respuesta por parte de este segundo participante. Es un modo directo de medir el altruismo.

Ultimátum. El juego del ultimátum es parecido al juego del dictador, pero en este, el segundo individuo (el “receptor”) puede decidir aceptar el reparto que el primero propone o rechazarlo. Y, en caso de rechazarlo, ninguno de los dos individuos implicados recibe nada. Este juego permite medir la tendencia del segundo jugador a castigar una oferta que considere injusta (a costa de su beneficio).

Trust Game. En este juego hay dos personas, **A** y **B**. A la persona **A** se le entrega una cantidad inicial de dinero. De esta cantidad inicial, **A** decide si le da algo a **B** (pago α). Esta cantidad se triplica antes de ser entregada a **B**. De este dinero, **B** puede decidir “devolver” algo a **A** (pago β). El pago α refleja la confianza (de **A** en **B**) y el pago β refleja la honradez de **B**.

to cuando llegan a adultos. El problema es que difícilmente (salvo con un estudio longitudinal muy a largo plazo) se pueden relacionar medidas reales de testosterona en neonatos o adolescentes con su comportamiento adulto. Lo que sí está al alcance del investigador es estudiar dicho efecto a través de variables que correlacionan con los niveles de testosterona en ambos periodos. Estas variables son el cociente entre el segundo y el cuarto dedo de la mano (2D:4D) y la masculinidad facial. El cociente 2D:4D co-

rrelacionó en un estudio en madres gestantes con la cantidad relativa de testosterona a la que el feto estaba expuesto. El cociente 2D:4D es mayor en las mujeres y un valor bajo en hombres correlaciona con rasgos típicamente masculinos, como una mayor capacidad espacial o mayor competitividad. El grado de masculinidad facial lo determina en la adolescencia el nivel de testosterona que secreta el propio individuo. Esto también tiene efecto sobre la conducta: los individuos de rostro más masculino asumen más riesgos.

Los resultados obtenidos en juegos estratégicos con estas variables corroboran lo descrito para la concentración de testosterona. Por ejemplo, en el juego del ultimátum los hombres más masculinos (tanto en el 2D:4D como en el rostro) tienden a rechazar las ofertas más bajas (ver Figura 1). Pero, además, los resultados obtenidos con estas variables apoyan las dos novedosas predicciones antes expuestas acerca del efecto de la testosterona en humanos. Primera, que la testosterona no desencadena nece-

sariamente una competencia agresiva, sino que puede relacionarse con la mejora del estatus empleando la filantropía. Individuos más masculinos en el 2D:4D en el juego del dictador son más generosos en sus ofertas y en juegos cooperativos (tipo dilema del prisionero) tienden a ser más cooperativos que competitivos. Segunda, que el efecto de la hormona se adapta al contexto, variando el comportamiento según este. Por ejemplo, hemos mencionado que los individuos de bajo 2D:4D son más altruistas en el juego del dictador, pero si antes se les expone a un contexto violento el efecto se invierte (las ofertas que hacen son menores que la media). En el juego del ultimátum, hombres con bajo 2D:4D tienden a rechazar ofertas injustas en un contexto neutral, pero es más probable que las acepten en un contexto de estimulación sexual.

La asimetría

La asimetría es otra variable morfométrica que ha cobrado mucho interés en tiempos recientes. Es una propiedad que refleja la capacidad de los organismos de mantener un desarrollo estable frente a factores externos. La asimetría que refleja la inestabilidad del desarrollo de cada individuo es la llamada *fluctuating asymmetry* (FA), que es distinta de cierta

asimetría normal en la población (la denominada asimetría direccional). Valores bajos de FA indican un desarrollo estable frente a las potenciales perturbaciones externas.

La FA correlaciona inversamente con variables que indican aptitud en los organismos, como la longevidad y el éxito reproductivo. En la misma línea, presentar baja FA en los seres humanos implica mayor éxito en diferentes factores (ingresos, atractivo, número de parejas...). La FA se ha relacionado con la conducta humana en muchas formas diferentes, pues es esperable que la calidad fenotípica del individuo afecte a su modo de comportarse.

Los individuos poco filántropos (menos cooperadores, menos altruistas, menos confiados) suelen presentar baja FA. En principio su mayor calidad fenotípica aumenta su probabilidad de ganar recursos por sí mismos y, por tanto, reduce su necesidad de establecer alianzas. Esta menor filantropía se ha demostrado tanto en el dilema del prisionero, donde los individuos con baja FA (más simétricos) son menos cooperadores, como en el juego del ultimátum, donde son menos generosos en sus ofertas.

En humanos, además, la simetría es considerada un rasgo atractivo. La belleza es in-

dudablemente una variable compleja, pero está demostrado que la FA la determina en buena parte. La belleza afecta a cómo se nos considera y, por tanto, al comportamiento y las atenciones que recibimos. Esto se ha analizado mediante correlaciones a muchos niveles (sueldo medio, tendencia a recibir beneficios penitenciarios, etc.) y, de un modo controlado y cuantitativo, a través de juegos estratégicos. En el *Trust Game* la gente confía más en la gente atractiva y en el juego del ultimátum se hacen ofertas mayores a las personas consideradas atractivas (que resultaron ser, además, más simétricas). Es decir que, aún en un contex-

to social, las personas simétricas (atractivas) tienen más facilidades para obtener recursos. Esto puede explicar por qué las personas consideradas bellas presentan comportamientos distintos. Tanto en el dilema del prisionero como en el juego del ultimátum y el juego del dictador las personas guapas tienden a ser menos filántropas (a no cooperar y a ser menos generosas). E, inversamente, las personas que no actuaron filántrópicamente fueron *a posteriori* considerados más guapos (ver Foto 1). Aunque resultar atractivo no siempre implica presentar comportamientos poco sociales. En el *Trust Game* los hombres atractivos jugando en el rol B devuelven mayor cantidad de dinero (son más honestos). Esto se explica porque aunque en algunos juegos su mayor capacidad de obtener recursos no les empuja a ser filántropos, tampoco necesitan actuar injustamente.

Resumiendo, el conjunto de datos obtenidos al utilizar una aproximación mixta, fisiológica y económica, para analizar cómo tomamos decisiones está ayudando a comprender sus bases biológicas. Y, en un contexto más amplio, pone de relieve la ventaja que supone aplicar herramientas y conocimientos de una rama del conocimiento a preguntas aparentemente ajenas a la misma. ■



Foto 1. En la imagen se presentan dos caras medias construidas con las fotos de los participantes que en un juego del dilema del prisionero cooperaron (derecha) y no cooperaron (izquierda). Los individuos que no cooperaron eran más simétricos y fueron considerados más atractivos, tal y como le ocurre a la media generada con sus rostros. Fuente: material gráfico cedido por el autor.

Los problemas del milenio

Analizar y señalar cuáles son los desafíos que tiene una disciplina es siempre un ejercicio apasionante y que ha motivado a los científicos a lo largo de la historia. Los matemáticos son quizás los más dados a estos ejercicios de prospectiva y la razón es que han tenido muy buenos antecedentes.

Manuel de León

Instituto de Ciencias Matemáticas (CSIC)

El reto de David Hilbert

Hace ahora algo más de un siglo, el matemático David Hilbert (1862-1942) realizó un auténtico *tour de force* intelectual con ocasión del Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en París. A las 9 de la mañana del miércoles del 8 de agosto de 1900, en el anfiteatro de la Facultad de Ciencias de la Sorbonne, David Hilbert se dirigió a la expectante audiencia con estas palabras:

¿Quién no estaría feliz si pudiera levantar el velo que nos oculta el porvenir para echar un vistazo al progreso de nuestra ciencia y los secretos de sus desarrollos posteriores en los siglos futuros? En el campo tan fecundo y vasto de las Ciencias Matemáticas, ¿cuáles

serán los objetivos que intentarán alcanzar los guías del pensamiento matemático de los tiempos futuros? ¿Cuáles serán en este campo las novedades y los nuevos métodos en el siglo que comienza?

La conferencia de Hilbert incluyó un largo preámbulo en el que discutió la naturaleza de las Matemáticas y su papel en el avance de otras ciencias. Aunque la lista contenía 23 problemas, solo presentó 10 debido a los límites de tiempo.

En esa época, Hilbert, profesor en la Universidad de Göttingen, era considerado como el matemático alemán más prestigioso. En la invitación que recibió para impartir la conferencia inaugural en París,

Hilbert aseguraba que en Matemáticas no hay ignorabimus. Todo puede ser fundamentado y explicado de manera lógica; si hay un problema, sabremos encontrar su solución

su colega Hermann Minkowski (1864-1909), le pedía que hiciera esa ojeada al futuro. Pero Hilbert terminó su preparación en el último minuto, dudó una y otra vez sobre el título, y no llegó a tiempo para el programa, de manera que su conferencia se celebró finalmente en el tercer día del congreso.

El intento de Hilbert iba en consonancia con una visión de los matemáticos del siglo XIX tratando de generar rigor y certeza en el edificio de las Matemáticas. De hecho, en su conferencia Hilbert hizo una referencia explícita a la naturaleza de los problemas en Matemáticas y su papel en las ciencias. Hilbert aseguraba que en Matemáticas no hay *ignorabimus*. Todo puede ser

fundamentado y explicado de manera lógica; si hay un problema, sabremos encontrar su solución. En París, Hilbert se enfrentaba a una visión diferente, la de otro de los héroes de la época, el matemático francés Henri Poincaré, más partidario de la intuición (Poincaré se refería a la teoría de conjuntos de Cantor como “una enfermedad de la que las Matemáticas terminarán recuperándose con el tiempo”).

En cualquier caso, nadie quería ser expulsado del paraíso de la teoría de conjuntos que había creado Georg Cantor (1845-1918) y su maravillosa concepción de los diferentes infinitos. Años más tarde, el 8 de septiembre de 1930 en Königsberg, con ocasión del Congreso de la Asociación de Científicos y Médicos de Alemania, David Hilbert dictó una conferencia de la que un extracto de 4 minutos fue transmitido por radio. Hilbert terminaba con su alegato: “En oposición al *ignorabimus*, ofrecemos nuestro eslogan: debemos saber, llegaremos a saber”.

Un referente de esta historia es el matemático italiano Giuseppe Peano (1858-1932), que establecía los fundamentos de la Aritmética con una colección de axiomas y reglas. Pero la cuestión que se planteó tras el congreso de París era muy simple pero demoleadora: ¿es este sistema com-

Desgraciadamente, no existe en la actualidad un matemático capaz de dominar todas las áreas de las Matemáticas como hizo Hilbert en su tiempo. No porque no haya matemáticos de esa altura sino por el increíble desarrollo que la disciplina ha experimentado en el último siglo

pleto y consistente? La paradoja del barbero de Bertrand Russel (1872-1970) lo ponía en cuestión: en una ciudad hay un barbero que afeita solo a todos los hombres de la ciudad que no se afeitan a sí mismos, ¿quién afeita al barbero?

La paradoja está conectada con la idea del conjunto de todos los conjuntos que no son miembros de sí mismos. Un conjunto tal, si es que existe, será un miembro de sí mismo, si, y solamente si, no es un miembro de sí mismo. Se había abierto una brecha en la aparente solidez del edificio matemático, ya que ninguna demostración podía ser confiable si estaba basada en esta lógica. Comenzaba uno de los periodos más apasionantes en la historia de la disciplina.

El llamado Programa de Hilbert, que perseguía la creación de un sistema formal para las Matemáticas que contuviera una demostración de la consistencia (no conduce a contradicciones), completo (toda verdad se puede demostrar) y decidible (una fórmula debe poder deducirse de los axiomas mediante la aplicación de los algoritmos adecuados), quedó truncado casi simultáneamente con su grito de guerra de 1930. Otro genio matemático, Kurt Gödel (1906-1970) probó que cualquier sistema axiomático con-



Kurt Gödel.

sistente para la Aritmética era necesariamente incompleto, es decir, habrá propiedades verdaderas que nunca podrán ser demostradas. John von Neumann (1903-1957) afirmó tras la presentación de Gödel de su resultado: “Se acabó”.

Así y todo, no se había acabado, y tras aquellos hechos dramáticos, otros héroes matemáticos como el mismo von Neumann y Alan Turing (1912-1954) se basaron en esta nueva lógica para desarrollar los ordenadores y la computación científica tal cual hoy los conocemos.

100 años después

Desde esta famosa lista de David Hilbert, hubo varios intentos de actualizarla. Desgraciadamente, no existe en la actualidad un matemático capaz de dominar todas las áreas de las Matemáticas como hizo Hilbert en su tiempo. No porque no haya matemáticos de esa altu-



David Hilbert.

ra, sino por el increíble desarrollo que la disciplina ha experimentado en el último siglo.

En 1992, la Unión Matemática Internacional (IMU en sus siglas inglesas), en la denominada Declaración de Río de Janeiro, decidió recordar el mítico Congreso Internacional de Matemáticos de París en 1900, y propuso, un siglo después, que los matemáticos de todo el mundo pusieran en marcha actividades a lo largo de todo ese año. La Declaración proponía tres grandes objetivos:

- Identificar los grandes desafíos matemáticos del siglo XXI.
- Proclamar a las Matemáticas como clave para el desarrollo.
- Mejorar la imagen de las Matemáticas mediante divulgación de calidad.

La UNESCO se unió también a esta Declaración de IMU, y en

su reunión plenaria del 11 de noviembre de 1997, la Conferencia General de la UNESCO siguió las recomendaciones de la Comisión III y aprobó la resolución 29 C/DR126 en relación con el World Mathematical Year 2000 (WMY 2000), haciendo énfasis en los aspectos educativos de las Matemáticas.

La celebración del 2000 tuvo como consecuencia la organización de numerosos eventos en todo el mundo, desarrollados por comités nacionales, pero también motivó varias iniciativas en la dirección de identificar los desafíos matemáticos del siglo XXI.

Una de esas iniciativas corales es el libro de Björn Engquist, Wilfried Schmid: *Mathematics Unlimited-2001 and Beyond*. Springer-Verlag, Berlin, 2001, 1238 + XVI páginas, en el que cerca de 90 matemáticos de todo el mundo aportan -en 58 artículos y cinco entrevistas- sus conocimientos en sus áreas respectivas. No es una enciclopedia ni tampoco un trabajo de síntesis, pero evidentemente su lectura es un repaso general al estado de la disciplina en esos momentos.

Otro intento extraordinario, más próximo a los objetivos del WMY 2000, fue de V. I. Arnold: *Mathematics: Frontiers and Perspectives*. American Mathematical Society,

2000, 459 páginas. El libro se editó bajo los auspicios de IMU y formó parte de las actividades del World Mathematical Year 2000. El texto consta de 30 artículos escritos por algunos de los matemáticos más influyentes; de hecho, 15 de ellos son escritos por varios medallistas Fields, desde K. F. Roth (Medalla Fields en 1958) a W. T. Gowers (Medalla Fields en 1998). Determinados artículos identifican algunos de los problemas más relevantes para los matemáticos de este siglo XXI, otros revisan varios de los problemas enunciados por Hilbert y algunos son artículos que entran en las motivaciones de los matemáticos de ese momento.

Los problemas del milenio

Pero sin duda alguna, la iniciativa de más calado en la opinión pública -y que está comenzando a tener sus efectos en la propia comunidad matemática- la constituye los llamados problemas del milenio.

Esta iniciativa tiene su origen en el Clay Mathematics Institute (CMI), que es una fundación privada, sin ánimo de lucro, cuyos cuarteles generales están en Cambridge, Massachusetts. El CMI fue creado en 1998 por la iniciativa del hombre de negocios de Boston, Landon T. Clay, y su esposa, Lavinia D. Clay. El instituto tiene como objetivos:

- Incrementar y diseminar el conocimiento matemático.
- Educar a los matemáticos y otros científicos sobre los nuevos descubrimientos en Matemáticas.
- Animar a los estudiantes mejor dotados para que sigan carreras Matemáticas.
- Reconocer los avances más extraordinarios en la investigación Matemática.

El primer presidente del CMI fue Arthur Jaffe, prestigioso matemático de la Universidad de Harvard. El instituto organiza numerosas actividades: congresos, conferencias para el público general y seminarios.

El Instituto quiso celebrar las Matemáticas del nuevo milenio estableciendo los siete Premios del Milenio. El objetivo era identificar los problemas más difíciles que estaban sin resolver con la intención adicional de poner de manifiesto que las Matemáticas son algo vivo, con fronteras todavía abiertas, y señalar la importancia de trabajar buscando soluciones a problemas profundos y de relevancia histórica. Estos siete problemas fueron elegidos por el Comité Científico del Instituto tras un arduo trabajo. Cada uno de estos problemas recibirá un premio de un millón de dólares.

Los problemas del milenio se presentaron en París, el 24 de mayo de 2000, en el Collège de France, con conferencias a cargo de Timothy Gowers, Michael Atiyah y John Tate.

Esta es la lista:

La conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer

Uno de los problemas matemáticos más conocidos por todos es la búsqueda de soluciones enteras a ecuaciones como esta

$$x^2 + y^2 = z^2$$

La resolución de ecuaciones similares puede ser muy difícil, y se ha probado que no existe un método general para resolver tales ecuaciones en los números enteros (ese era el problema décimo de Hilbert). Sí hay soluciones parciales, y la conjetura de Birch y Swinnerton-Dyer asegura que en el reino de las variedades algebraicas el tamaño del grupo de puntos racionales está relacionado con el comportamiento de una función zeta $\zeta(s)$ cerca del punto $s=1$.

La conjetura de Hodge

Los matemáticos estudian objetos complicados aproximándolos con bloques geométricos más sencillos que uno va pegando adecuadamente, y así se pueden clasificar, lo que es una de las tareas tradicionales de la disciplina. La conjetura de Hodge asegura que para los obje-



Manuel de León.

tos matemáticos que se denominan variedades proyectivas algebraicas, las piezas que se llaman ciclos de Hodge son de hecho combinaciones lineales de objetos geométricos simples llamados ciclos algebraicos.

La ecuación de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes datan del siglo XIX, y todos las “sentimos” cuando volamos en un avión, especialmente si nos encontramos con turbulencias en nuestro vuelo. Los matemáticos quieren entenderlas para lo que se necesita saber más sobre sus soluciones. Pero a pesar de los ingentes esfuerzos de décadas, es todavía muy poco lo que sabemos sobre las mismas.

El problema P versus NP

Uno de los problemas más importantes en computa-

Manuel de León

Profesor de Investigación en el CSIC y director del Instituto de Ciencias Matemáticas. Es académico correspondiente de la Real Academia de Ciencias.

Su investigación se centra en la geometría diferencial y en sus aplicaciones a la Mecánica, habiendo publicado más de 200 artículos y 3 monografías. Perteneció a varios comités editoriales de revistas científicas. Fundador y director de *Journal of Geometric Mechanics*. Desarrolla también una amplia actividad de divulgación.

Ha sido refundador y vicepresidente de la Real Sociedad Matemática Española (RSME), fundador y director de *La Gaceta* de la RSME, y refundador y presidente del Comité Español de Matemáticas. Presidió el Congreso Internacional de Matemáticos ICM-Madrid 2006 y es miembro del Comité Ejecutivo de la Unión Matemática Internacional.

Ha sido coordinador de Matemáticas de la ANEP, vocal de Ciencias Experimentales de la Comisión Asesora de Evaluación y Prospectiva, y miembro de la Comisión de Área de Ciencias y Tecnologías Físicas del CSIC. Actualmente es miembro del Core Group de PESC (Fundación Europea de la Ciencia).

ción es determinar si existen cuestiones cuya respuesta se pueda comprobar fácilmente, pero que requerirían un tiempo tan grande que haría imposible el método para resolver la cuestión por algún procedimiento directo (algorítmico). Los problemas P son aquellos cuya solución es fácil de encontrar, y en los problemas NP es fácil comprobar si una potencial solución particular lo es de verdad. Este problema fue formulado independientemente por Stephen Cook y Leonid Levin en 1971.

La conjetura de Poincaré

Una cinta de goma en la superficie de una esfera se puede hacer cada vez más pequeña y reducirla a un punto. Pero si lo hacemos en la superficie de un donut (lo que en Matemáticas se conoce co-

mo un toro) y la cinta se coloca en la dirección adecuada, será imposible hacerlo. Este es el nacimiento de la topología algebraica, que asocia objetos algebraicos a objetos topológicos y permite su estudio y clasificación. La esfera es simplemente conexa y el toro no. Poincaré se preguntó hace un siglo (1904) si esto que él sabía demostrar en dos dimensiones era válido en dimensiones superiores, y especialmente en dimensión 3. La solución tardó 100 años en llegar, y fue Grigoriy Perelman, en dos artículos en 2002 y 2003, quién anunció haber encontrado la respuesta usando el trabajo pionero de Richard Hamilton con su teoría del flujo de Ricci. En realidad, Perelman probó un resultado que contenía la conjetura de Poincaré como caso particular, la llamada conjetura de geometrización

de William Thurston, y consiguió resolver así uno de los siete problemas del milenio. Por su logro extraordinario, a Perelman le fue concedida la medalla Fields en el ICM de Madrid en 2006, aunque como es sabido ni aceptó la medalla ni el cheque del millón de dólares.

La hipótesis de Riemann

Los números primos pueden considerarse como los ladrillos básicos con los que se construyen todos los demás números enteros. Euclides ya probó que eran infinitos, pero un problema sin resolver es el saber cómo están distribuidos. Fue Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) quien observó que esta frecuencia estaba relacionada con la llamada función zeta de Riemann

$$\zeta(s) = 1 + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s + \dots$$

Lo que afirma la hipótesis de Riemann es que las soluciones de la ecuación

$$\zeta(s) = 0$$

(los ceros de la función) se encuentran en una cierta recta vertical. Este es sin duda el más difícil objeto de deseo de los matemáticos en la actualidad.

El problema de la masa en la teoría de Yang-Mills

Las partículas elementales de la Física se describen geoméricamente mediante



Henri Poincaré.

la teoría de Chen-Ning Yang y Robert L. Mills. A diferencia de lo que ocurre con las fuerzas electromagnéticas, los campos de las interacciones nucleares tienen que tener masa, lo que se expresa diciendo que existe un salto de masa. Pero en la teoría clásica de Yang-Mills, las partículas no la tienen. Así que el problema consiste en demostrar de un modo matemáticamente riguroso la teoría de Yang-Mills cuántica y la existencia del salto de masa. Lograrlo requerirá sin duda alguna la introducción de nuevas ideas fundamentales en Física y Matemáticas.

España y las fronteras de las Matemáticas

En los tiempos de David Hilbert, la investigación matemática española era casi inexistente a pesar de algunos esfuerzos individuales y de haber contado con brillantes

matemáticos árabes y judíos durante la dominación musulmana, o haber sido pioneros en la creación de la Real Academia Mathematica en 1582 por impulso de Felipe II.

El empuje regeneracionista de principios del siglo XX llevó a la puesta en marcha en 1915 del Laboratorio Seminario Matemático en el seno de la Junta de Ampliación de Estudios, dando lugar a una primavera matemática, truncada por la Guerra Civil. Basta decir que en 1980 el número de artículos en revistas ISI de matemáticos españoles representaba el 0,3% del total frente al 5% actual. En efecto, en los últimos años las Matemáticas españolas han alcanzado un desarrollo espectacular, simbolizado por la celebración en Madrid



Georg Friedrich Bernhard Riemann.

por primera vez en la historia de un ICM en 2006.

Si en los libros citados anteriormente no solo no había ningún español firmante, sino que hasta el número de autores en las referencias de los mismos era muy reducido, ahora la situación sería diferente, y podemos asociar nombres españoles a problemas como el de los conjuntos de Sidon generalizados (Javier Cilleruelo y Carlos Vinuesa), el de Nash (Javier Fernández de Bobadilla y María Pe) o el de Arnold (Alberto Enciso y Daniel Peralta Salas), por citar los más recientes.

Afirmamos, por tanto, que ya no solo somos capaces de entender los problemas del milenio, sino de trabajar en ellos, y eso significa un cambio cualitativo de enorme trascendencia.

Otras fronteras

Los problemas que hemos comentado en este artículo se refieren en su mayor parte a las fronteras internas de las Matemáticas, pero son muchos los desafíos que la disciplina encara en este siglo, provenientes de otras ciencias, de la industria y, del desarrollo tecnológico.

Un paradigma que ha surgido de manera incuestionable en las últimas décadas es la posi-

LOS 23 PROBLEMAS DE DAVID HILBERT

1. Problema de Cantor sobre el cardinal del continuo. ¿Cuál es el cardinal del continuo?
2. La compatibilidad de los axiomas de la Aritmética. ¿Son compatibles los axiomas de la Aritmética?
3. La igualdad de los volúmenes de dos tetraedros de igual base e igual altura.
4. El problema de la distancia más corta entre dos puntos. ¿Es la línea recta la distancia más corta entre dos puntos, sobre cualquier superficie, en cualquier geometría?
5. Establecer el concepto de grupo de Lie, o grupo continuo de transformaciones, sin asumir la diferenciabilidad de las funciones que definen el grupo.
6. Axiomatización de la Física. ¿Es posible crear un cuerpo axiomático para la Física?
7. La irracionalidad y trascendencia de ciertos números.
8. El problema de la distribución de los números primos.
9. Demostración de la ley más general de reciprocidad en un cuerpo de números cualesquiera.
10. Establecer métodos efectivos de resolución de ecuaciones diofánticas.
11. Formas cuadráticas con coeficientes algebraicos cualesquiera.
12. La extensión del teorema de Kronecker sobre cuerpos abelianos a cualquier dominio de racionalidad algebraica.
13. Imposibilidad de resolver la ecuación general de séptimo grado por medio de funciones de solo dos argumentos.
14. Prueba de la condición finita de ciertos sistemas completos de funciones.
15. Fundamentación rigurosa del cálculo enumerativo de Schubert o geometría algebraica.
16. Problema de la topología de curvas algebraicas y de superficies.
17. La expresión de formas definidas por sumas de cuadrados.
18. Construcción del espacio de los poliedros congruentes.
19. Las soluciones de los problemas regulares del cálculo de variaciones, ¿son siempre analíticas?
20. El problema general de condiciones de contorno de Dirichlet.
21. Demostración de la existencia de ecuaciones diferenciales lineales de clase fuchsiana, conocidos sus puntos singulares y grupo monodrómico.
22. Uniformidad de las relaciones analíticas por medio de funciones automórficas: siempre es posible uniformizar cualquier relación algebraica entre dos variables por medio de funciones automorfas de una variable.
23. Extensión de los métodos del cálculo de variaciones.

bilidad de manejar gran cantidad de datos al haber aumentado la capacidad de cálculo de los nuevos ordenadores de una manera exponencial. Identificar patrones entre las miríadas de datos que proporcionan la Astronomía, la Sismología, la Genética y los experimentos

en el LHC, requiere usar instrumentos matemáticos y, probablemente, algunos nuevos y más potentes. Por otra parte, la construcción de modelos matemáticos cada vez más elaborados es clave para tratar de resolver los grandes problemas que afronta nuestra socie-

dad como el desarrollo sostenible o el cambio climático.

Las Matemáticas parecen un constructo abstracto que podría existir fuera del mundo físico. Sin embargo, sus fronteras van a veces por delante de sus potenciales apli-

caciones, a veces las acompañan y otras van detrás, pero sin esta disciplina no podríamos entender este universo que está escrito en lenguaje matemático, tal y como aseguraba Galileo Galilei. Esta dualidad es la que les da su grandeza y su atractivo. ■

05

**... en los estudios sobre
la sociedad y la cultura**



La investigación *de frontera* en Humanidades y Ciencias Sociales

El Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS) del CSIC, en Madrid, reúne a siete institutos de investigación diferentes en su mayor parte provenientes de las Humanidades. Inaugurado hace dos años, el Centro se erige en el concierto europeo como una apuesta de futuro en torno a la investigación de calidad, cooperativa en sus medios y ambiciosa en sus objetivos. Con más de veinte líneas de investigación, muchos de sus equipos trabajan claramente en la frontera del conocimiento, con altísimos niveles de internacionalización y resultados tangibles en todos los indicadores de excelencia.

Javier Moscoso

Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

La Coordinación del Área de Humanidades y Ciencias Sociales consideró durante algún tiempo plantear a sus grupos de investigadores una sencilla pregunta que, de manera similar a co-

mo se hace en otras áreas del CSIC, permitiera identificar los cinco o seis temas que, a juicio de los investigadores, hubieran supuesto un avance considerable del conocimiento durante los últimos quince

o veinte años. Lo mismo podríamos haber hecho en relación a los cinco o seis autores. O los cinco o seis libros. La dificultad no dependía de la falta de ideas, sino de la necesidad de elegir algunas lí-

neas de investigación antes que otras, tal vez contribuyendo más al desconcierto propio que a la admiración ajena. Sin embargo, a ningún investigador del área se le oculta que también en esta se pro-



Javier Moscoso.

Javier Moscoso

Profesor de investigación de Historia y Filosofía de las Ciencias en el Instituto de Filosofía del Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Doctor en Filosofía por la Universidad Autónoma de Madrid, completó estudios en el Centre Alexandre Koyré de París, en el Instituto Wellcome de Historia de la Medicina de Londres, donde fue investigador invitado durante cuatro años, así como en el Departamento de Historia de la Ciencia de la Universidad de Harvard, donde permaneció otros dos.

En 1997, fue contratado por el Instituto Max-Planck de Historia de la Ciencia en Berlín. En la actualidad, es coordinador del Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC.

Como investigador, ha trabajado sobre tres ámbitos. La historia de las ciencias de la vida, la historia de las singularidades y el desarrollo de una ciencia teratológica, así como la historia del dolor. De estos últimos proyectos, junto con varias monografías en solitario, compilaciones y publicaciones en revistas especializadas en distintos idiomas, ha realizado varias exposiciones.

Su último libro, *Una historia cultural del dolor*, será publicado, en inglés, por la editorial Macmillan-Palgrave a finales de este año y, en castellano, por la editorial Taurus.

Habría que dejar claro desde el principio que no toda ciencia excelente es “de frontera” ni toda investigación “de frontera” es, por ese motivo exclusivamente, buena ciencia

ducen modificaciones y variaciones metodológicas, cambios en las aproximaciones a viejos temas e, incluso, surgimiento de nuevos problemas y tratamientos, bien sea por la demanda social o por la propia presión interna. Los denominados “giro lingüístico”, “giro visual” o “giro afectivo” son buenos ejemplos de cambios metodológicos auspiciados en ocasiones por grupos enteros de investigación cuyos efectos se han dejado sentir mucho más allá de los reducidos límites geográficos y disciplinarios en los que fueron concebidos.

Por su propia naturaleza, la pregunta que plantea la Fun-

dación General CSIC a través de esta revista, sobre la denominada “Investigación de Frontera” en las Humanidades y Ciencias Sociales, conlleva una dificultad similar a la que la Coordinación del CSIC planteaba a sus investigadores, al menos en tanto que requiere partir de una clarificación inicial: la que atañe a lo que se quiera significar inicialmente por una expresión “investigación de frontera” que se debate entre dos o tres sentidos no necesariamente excluyentes. Para muchos científicos, la investigación “de frontera” es la que tiene lugar en los bordes del conocimiento, la que cuestiona o bien la metodología o bien el cono-

cimiento previo a través, por ejemplo, de la formulación de hipótesis arriesgadas que, caso de resultar corroboradas en algún grado, resultarían sorprendentes por su baja probabilidad inicial. Desde este punto de vista, la investigación de frontera se asemeja a la búsqueda de hipótesis improbables, pues lo contrario –la confirmación trivial de ideas ya muy aseveradas– no conducirá nunca a ningún descubrimiento espectacular. Para otros muchos científicos, sin embargo, la palabra “frontera” no remite por necesidad a lo que está en el límite de lo probable de acuerdo con nuestro conocimiento previo, sino a la investigación

que transita en el borde de sus formas disciplinarias, sus marcos teóricos aprendidos y sus departamentos e instituciones sociales. Las formas de especialización del conocimiento científico, el surgimiento histórico de muchas disciplinas, se deben en parte a estos maridajes inter-territoriales, por los que unas ciencias (junto con los científicos que las practican, los laboratorios que las hacen posibles y las partidas presupuestarias que las financian) se sirven de otras, cooperan con otras o explotan los resultados de otras en su propio beneficio. Por último, pero no menos importante, para muchos responsables de políticas públicas de la ciencia, la investigación de frontera es sinónimo de investigación de calidad; es decir: sinónimo de excelencia científica. En este último sentido, también hay en ocasiones importantes malentendidos puesto que sucede con frecuencia que la forma de medir la excelencia (a través por ejemplo de los índices de impacto) se confunde con la finalidad de la investigación, o que la relevancia social (a través, por ejemplo, de los mecanismos de transferencia) se entiende de manera unitaria y mal dimensionada, como cuando se considera que la única transferencia posibles es tecnológica y se expresa a través del número de patentes.

Como ha explicado la filósofa Martha Nusbaum, tan solo regímenes totalitarios carecen de Humanidades. Y al contrario, la investigación crítica en estas áreas, su salud institucional, es una medida de la calidad democrática de los países en los que se desarrolla

En el caso de las Humanidades y de las Ciencias Sociales, la investigación puede ser “de frontera” en los tres sentidos descritos, aun cuando habría que dejar claro desde el principio que no toda ciencia excelente es “de frontera” ni toda investigación “de frontera” es, por ese motivo exclusivamente, buena ciencia. Aun cuando en general la mejor ciencia trabaja en la frontera, solo un argumento falaz de afirmación del consecuente concluiría que por el solo hecho de trabajar en la frontera la ciencia ya es excelente. En un abanico tan grande (y tan artificial) como el conjunto de saberes y prácticas que caen bajo la denominación genérica de las Humanidades y Ciencias Sociales –y que abarca desde ciencias experimentales (como la Psicología, la Arqueología o la Lingüística), cuantitativas (como la Sociología, la Demografía o la Geografía), pero también otras con metodologías cualitativas (como la Historia, la teoría de la Literatura o del Arte)– también se producen, por supuesto, movimientos relacionados con la aparición de nuevos objetos de estudio, con la introducción de nuevas técnicas de investigación o con la adopción de nuevos valores epistémicos. Al mismo tiempo, algunas de esas líneas de investigación “de frontera” también lo son porque involucran una

colaboración entre disciplinas y campos diferentes. No es extraño, por ejemplo, encontrar grupos de investigación compuestos por personas de distinta procedencia académica que colaboran en la resolución de problemas comunes. En ocasiones, estos grupos adquieren formas más institucionalizadas, como departamentos interuniversitarios o incluso desembocan, como el recientemente creado Instituto de Ciencias del Patrimonio del CSIC en Santiago de Compostela (INICIPIT), en centros de investigación. Aun cuando en algunas de estas sinergias entre nichos disciplinarios participan también investigadores provenientes de otras áreas de investigación consideradas por muchas personas como “más científicas”, como la Química orgánica, la Matemática, la Física o la Computación, la investigación no es “más” o “menos” de frontera por estar asociada a metodologías o valores epistémicos propios de las ciencias experimentales. De manera inversa, las investigaciones en cambio global que incluyen entre sus miembros a expertos en Arqueobotánica o en Prehistoria tampoco son ni mejores ni peores por eso. La calidad de la investigación viene determinada, siempre, por la calidad e impacto de sus resultados. Y aquí conviene hacer alguna precisión, porque el lego sue-

le pensar con frecuencia que, puesto que los criterios de evaluación de la investigación en Humanidades y Ciencias Sociales son menos rígidos o más difícilmente objetivables que aquellos que rigen en las otras ciencias, su aportación a la investigación de calidad será más cuestionable. Como veremos a continuación, nada más lejos de la realidad.

Evaluación de investigación de frontera en Humanidades y Ciencias Sociales

Durante los años 2005 y 2006, la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) llevó a cabo un estudio sobre la coincidencia en los resultados de evaluación de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (ANEP) y de los paneles de expertos del propio MEC en relación a los proyectos del Plan Nacional. Al contrario de lo que podría pensarse, el grado de acuerdo entre ambos grupos de evaluadores, que utilizan además metodologías diferentes dentro de lo que son los procedimientos internacionalmente aceptados, superaba cualquier expectativa y arrojaba una conclusión más que interesante: ningún instrumento mecánico de evaluación sustituye la calidad de los evaluadores quienes, mucho tiempo antes de disponer de índices de im-

pacto o de otras medidas biométricas, ya sabían qué era un buen resultado de investigación, como demuestra la Historia de la Ciencia.

Lo que los filósofos llaman “el mito de la objetividad mecánica” se ha dejado sentir en el contexto de la investigación en Humanidades y Ciencias Sociales, afectando también a la forma y el contenido de su investigación interdisciplinaria. Por un lado, se extiende el prejuicio de que la forma más adecuada de investigación en esta área depende de su cooperación con otras ciencias de metodologías cuantitativas o experimentales (lo que ya es rigurosamente falso, puesto que también en el contexto de las ciencias humanas hay investigación experimental, como ponen de manifiesto la Arqueología, la Lingüística o la Psicología). Por el otro, crece la sospecha de que, ante la ausencia de procedimientos y métodos cuantitativos –que también es rigurosamente falso– tal vez no pueda reivindicarse en este campo nada que corresponda ni a la investigación interdisciplinaria ni a la que moviliza hipótesis “improbables”. Ambas conclusiones no solo están equivocadas, sino que constituyen la materialización de una idea preconcebida más general sobre el papel de las Humanidades y las Ciencias

Durante los últimos diez o quince años, las Humanidades y Ciencias Sociales también se han posicionado en torno a nuevos temas de investigación que, de manera inevitable, les ha conducido a encontrar nuevas formas de cooperación interdisciplinaria

Sociales en el contexto de las políticas estatales de investigación. Como con otros casos similares, este prejuicio también vive en el tejido social y se alimenta en la ignorancia de la Historia y la Filosofía de las ciencias, es decir: en la ausencia de los mismos conocimientos que algunas ramas de las Humanidades estarían y están en condiciones de proporcionar.

Montados en el vehículo del progreso, hay quien solo se interesa de los costes energéticos del viaje o por las leyes del movimiento que afectan al vehículo, sin pararse a pensar el sentido de la dirección, el número y procedencia de los ocupantes, así como el destino de la marcha. Como ha explicado la filósofa Martha Nussbaum, tan solo regímenes totalitarios carecen de Humanidades. Y al contrario, la investigación crítica en estas áreas, su salud institucional, es una medida de la calidad democrática de los países en los que se desarrolla. Pero no hace falta ser una reputada filósofa política para llegar a una conclusión que se desprende tan solo de la lectura atenta de un periódico. Aquí como en otros contextos, la paradoja de la ignorancia es que quien la practica se empeña en desconocer aquello que justamente podría convertirse en su remedio y en su cura.

Investigación de calidad

Durante los últimos diez o quince años, las Humanidades y Ciencias Sociales también se han posicionado en torno a nuevos temas de investigación que, de manera inevitable, les ha conducido a encontrar nuevas formas de cooperación interdisciplinar. En algunas ocasiones, como en el caso del Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS) del CSIC, en Madrid, estos movimientos han contado con apoyo institucional. Para los promotores de este proyecto, que ha reunido a siete institutos de investigación diferentes en su mayor parte provenientes de las Humanidades, el Centro, inaugurado hace ahora un par de años, se erige en el concierto europeo como una apuesta de futuro en torno a la investigación de calidad, cooperativa en sus medios y ambiciosa en sus objetivos. La atomización y la fragmentación de los grupos de investigación, que siempre fue, junto con la financiación irregular y exigua, uno de los grandes obstáculos de la ciencia española, ha encontrado aquí su refutación más reciente, pero de ninguna manera la única. Con más de veinte líneas de investigación, muchos de sus equipos trabajan claramente en la frontera del conocimiento, con altísimos niveles de internacionalización y resultados tangibles en todos los indicadores de excelencia:

Por su propia naturaleza, la investigación “de frontera” en cualquiera de los sentidos descritos, no tiene garantizado el éxito de cada inversión, aunque sí el éxito global en su conjunto

ya sea el impacto de las publicaciones, las fuentes y cuantías de su financiación o la transferencia de sus resultados. En algunos casos, las investigaciones giran en torno a problemas de enorme trascendencia social y creciente interés político, como el envejecimiento o el cambio global. Algunas otras se realizan en cooperación con instituciones similares –como el Programa Convivencia: una iniciativa CSIC– Max Planck relativa al estudio de la Historia de la formas de integración cultural en la Baja Edad Media. En otros casos, como los estudios de Arqueología y procesos sociales, los grupos de investigación incluyen a investigadores provenientes de la Historia, pero también de la Filología o del Arte, los resultados suman a su excelencia científica su enorme impacto social.

En el CCHS, como en otras muchas universidades y centros de investigación de España y de fuera de España, la investigación de frontera en Humanidades y Ciencias Sociales está ligada al estudio de nuevos objetos –como el creciente interés en los procesos cognitivos– que normalmente incluyen colaboraciones entre psicólogos, lingüistas y filósofos de la mente. O como los estudios emocionales, que movilizan a historiadores culturales, pero también a teóricos del Arte, expertos en

cultura visual, sociólogos y antropólogos.

Por su propia naturaleza, la investigación “de frontera” en cualquiera de los sentidos descritos, no tiene garantizado el éxito de cada inversión, aunque sí el éxito global en su conjunto. Esto quiere decir que, al contrario de lo que ocurre con las formas de investigación más conservadoras, en donde los resultados son previsibles e incluso intrascendentes, la investigación de frontera debe aceptar el fracaso parcial como parte imprescindible de su quehacer diario. En este sentido, la presión que reciben los grupos de investigación españoles, y no españoles, para hacer ciencia de calidad, ambiciosa en sus objetivos y certera en sus resultados, no se corresponde con los medios que dedican las administraciones públicas a la promoción del conocimiento y de la ciencia. Por el contrario, la Historia de las ciencias muestra una y otra vez que la inversión pública o privada en la investigación solo se recupera en el medio y en el largo plazo, después de intentos fallidos y pasos sinuosos. La búsqueda de la rentabilidad inmediata en el ámbito de la investigación, no ha producido a lo largo de la historia más que estancamiento intelectual y paralización económica. ■

El lenguaje: aprendizaje y uso

Nùria Sebastián estructura su artículo en torno a diversas cuestiones actuales sobre el estudio de la adquisición y procesamiento del lenguaje: las capacidades iniciales y los orígenes del lenguaje, el aprender dos lenguas y el lenguaje como herramienta social. Asimismo, desmonta algunos mitos del conocimiento popular e indica futuras líneas de investigación.

Nùria Sebastián

Universitat Pompeu Fabra

Las fronteras del conocimiento suelen abordar problemas que los seres humanos encuentran extraordinariamente difíciles de alcanzar. A primera vista resulta pues sorprendente que algo que hasta un niño pequeño puede hacer sea un tema de investigación de frontera. El problema de cómo conseguimos hablar es extraordinariamente difícil de comprender. El lenguaje es un problema particularmente arduo porque, a diferencia de otros muchos aspectos sobre la cognición, como la percepción visual o auditiva, la memoria, etc., no existen animales que sean ca-

paces de aprender y utilizar un sistema parecido. Por cuestiones éticas, su investigación queda limitada al uso de métodos no invasivos. Además, los investigadores de este campo nos enfrentamos con el problema adicional de que todo el mundo parece saber mucho sobre el tema, aunque la ignorancia del conocimiento científico sea, casi siempre, abrumadora.

Las capacidades iniciales: los orígenes del lenguaje

A menudo se ha considerado inútil hablar a los bebés en los primeros meses de vida porque no entienden y hasta que

su cerebro no haya madurado suficiente no podrán “absorber” el lenguaje. Nada más lejos de la realidad. Los bebés al nacer ya son capaces de distinguir algunas lenguas de otras, como por ejemplo el inglés del español, o el holandés del japonés (no pueden distinguir hasta los 4-5 meses el italiano del español o el inglés del holandés). Pueden hacerlo incluso si modificamos las frases de manera que contengan los mismos fonemas (sonidos). De esta manera nos aseguramos de que los bebés no utilizan información como la aparición de un sonido especialmente llama-

tivo y que solo se registra en una de las lenguas (como, por ejemplo, el sonido que corresponde a la letra J en español). Sin embargo, no pueden hacerlo si les “damos la vuelta” a las frases y las reproducimos del revés. Los bebés al nacer también pueden distinguir los fonemas de todas las lenguas del mundo, aunque nunca los hayan oído porque sus padres no los produzcan (por ejemplo, los neonatos japoneses pueden distinguir la /r/ de la /l/). Estas capacidades son compartidas con otras especies, esto es, los monos títis y las ratas pueden discriminar el holandés del japonés exacta-



Núria Sebastián.

Núria Sebastián

Doctora en Psicología Experimental por la Universitat de Barcelona en 1986. Llevó a cabo su formación post-doctoral en el Instituto Max Planck, el Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) y en el London School of Counselling Psychotherapy (LSCP). Fue profesora asociada en la Facultad de Psicología (Universitat de Barcelona) en 1988 y, posteriormente, profesora titular en 2002. En 2009 se traslada a la Universitat Pompeu Fabra. Recibió el premio James S. McDonnell Foundation ("Bridging Mind, Brain and Behavior" Program) en 2001 y en 2009 fue galardonada con el Premio ICREA. Miembro del grupo asesor de "Cerebro y Aprendizaje", iniciativa de la OCDE desde 2002 a 2006. Actualmente dirige el grupo de investigación de SAP (adquisición y procesamiento del lenguaje) de la Universitat Pompeu Fabra y es la coordinadora del consorcio de investigación Consolider-Ingenio 2010 con la investigación bilingüismo y neurociencia cognitiva (BRAINGLOT).

Ha escrito más de 70 artículos en revistas internacionales. Es editora asociada de la publicación *Ciencias del Desarrollo* (2005).

mente en las mismas condiciones que los bebés humanos. Sin embargo, los bebés humanos de ocho meses pueden realizar ciertos cálculos de probabilidades sobre las sílabas del habla que las ratas no pueden computar. Uno de los campos de investigación abiertos en estos momentos se centra en el estudio comparativo de las capacidades que los bebés humanos poseen en los primeros meses de vida con las de otras especies. Es probable que este tipo de estudios nos permita conocer los orígenes evolutivos del lenguaje, más que intentar (inútilmente) enseñar el lenguaje a chimpancés y bonobos.

Durante (aproximadamente) los primeros 6 meses de vida, las capacidades de procesamiento del lenguaje que muestran los bebés humanos no parecen estar muy condicionadas por la lengua del entorno (aunque los bebés prefie-

Los bebés al nacer ya son capaces de distinguir algunas lenguas de otras, como por ejemplo el inglés del español, o el holandés del japonés (no pueden distinguir hasta los 4-5 meses el italiano del español o el inglés del holandés)

ren escuchar al nacer la lengua hablada por los padres, sugiriendo influencia intrauterina). Alrededor de los 6 meses, se produce un cambio importante y los bebés comienzan a "sintonizar" con la lengua que escuchan: por ejemplo, dejan de poder discriminar los sonidos a los que no están expuestos y mejoran la percepción de los fonemas de su lengua. En este momento ya empiezan a poder reconocer algunas palabras (su nombre, por ejemplo) y la respuesta del cerebro al lenguaje está claramente lateralizada (en la mayoría de los adultos, las estructuras cerebrales del hemisferio izquierdo muestran un mayor patrón de activación que las del derecho cuando procesamos el lenguaje). El estudio de los mecanismos subyacentes a la adquisición de las lenguas en los primeros meses de vida es un campo de investigación muy activo, aunque las técnicas de estudio son muy limitadas, ya

que el registro de la actividad cerebral (tanto en técnicas de neuroimagen como de registro de electroencefalografía) requiere la inmovilidad del sujeto... ¡y no es nada fácil conseguir que un bebé de 10 meses esté quieto unos minutos! Por otra parte, las técnicas de estudio se tienen que adaptar constantemente a la maduración de los bebés (véase la Imagen 1). Investigar cómo los seres humanos somos capaces de aprender el lenguaje, que tiene unas propiedades formales extraordinariamente complejas, en un periodo de tiempo tan breve, es un reto actualmente abierto.

Aprender dos lenguas

Es de todos sabido que aprender una segunda lengua en la infancia da mejores resultados que en la edad adulta. Alrededor de esta cuestión existen varias preguntas importantes sobre la adquisición y el procesamiento del lenguaje.



Imagen 1. La investigación con bebés utiliza procedimientos de habituación-deshabitación. Mediante la succión de una tetina o mediante su mirada los bebés se “autoadministran” estímulos de una cierta categoría. Pasado un tiempo, se “aburren” y la tasa de respuesta disminuye. Cuando ésta llega a un valor crítico se presentan o bien estímulos nuevos de la misma categoría o bien estímulos de otra categoría. Solo si notan el cambio de categoría, su respuesta se incrementa. Fuente: www.infantstudies.psych.ubc.ca

El caso más extremo de aprendizaje precoz es aquel en el que un bebé nace en una familia multilingüe. ¿Cuánto tiempo tarda en percibir que hay más de una lengua en su entorno? Como hemos dicho, al nacer los bebés ya son capaces de percibir las diferencias entre algunas lenguas, por lo que si su entorno incluye lenguas suficientemente distintas, al nacer ya se dará cuenta. Pero si nace escuchando lenguas más similares (como el catalán y el español) tarda unos 4-5 meses, a esa edad los bebés son capaces de discriminar lenguas como el inglés y el holandés o el español y el italiano o el catalán. La investigación con bebés que crecen en entornos bilingües ha mostrado que, independientemente de la similitud entre

las lenguas, su desarrollo es equivalente al de un niño que crezca en un entorno monolingüe. Sin embargo, equivalente, no quiere decir idéntico. Los bebés bilingües desarrollan estrategias específicas de procesamiento que les permiten adquirir las dos lenguas. Una parte importante de la investigación en este campo intenta dilucidar cuáles son estas estrategias específicas y su impacto en el desarrollo y funcionamiento cognitivo (diversos estudios recientes muestran que los individuos bilingües tienen cierta ventaja sobre los individuos monolingües a la hora de reaccionar ante estímulos conflictivos: responden unas milésimas de segundo antes y activan de manera más efectiva ciertas áreas corticales).

El caso más extremo de aprendizaje precoz es aquel en el que un bebé nace en una familia multilingüe

Pero la mayoría de las personas aprenden una segunda lengua más tarde. Uno de los conceptos más polémicos en este ámbito es el de la existencia, o no, del denominado “periodo crítico”. Según el saber popular aprender una lengua antes de la finalización del período crítico implica una adquisición perfecta, pero aprenderla más tarde implica la imposibilidad de hacerlo (la edad varía entre los 7 años y la adolescencia). La cuestión es que más que de periodos críticos lo biológicamente plausible es hablar de “periodos ventajosos”: durante dichos periodos, la estimulación tiene efectos máximos, fuera de dicho período la misma cantidad de estimulación tiene un efecto menor. El problema para determinar si existe o no un periodo ventajoso en la ad-

quisición del lenguaje es que los distintos tipos de conocimientos implicados (los fonemas, la morfología, la sintaxis, etc.) reclutan distintas redes cerebrales, que requieren del funcionamiento de diferentes núcleos. Cuando nacemos, partes sustanciales de nuestro cerebro son funcionalmente inoperativas. El cerebro no madura de manera uniforme, por lo tanto el cerebro se encuentra en óptimas condiciones para el aprendizaje de los distintos subsistemas del lenguaje en momentos distintos. Hay aspectos para los que no parece haber límites temporales (podemos aprender palabras toda la vida), pero para otros parece que existen periodos ventajosos bastante acotados en el tiempo. Recordemos que hacia el sexto mes de vida, los humanos empezamos a sintonizar la percepción de los fonemas a las propiedades de la lengua del entorno. Entre los 6 y 12 meses se produce este “periodo ventajoso” para la adquisición de los fonemas. El inicio y finalización de los periodos ventajosos para los que existen modelos animales, como, por ejemplo, la visión, indican el papel fundamental de determinados factores de transcripción (una de las proteínas propuestas es, por ejemplo, Oxt2). Los modelos moleculares sobre el inicio y finalización de los periodos críticos en visión pro-

porcionan esquemas iniciales para comprender la dinámica de la plasticidad cerebral en el ser humano. Por lo que se refiere al aprendizaje inicial del lenguaje, una cuestión por resolver es establecer la relación entre factores ambientales (exposiciones particularmente ricas o pobres, ciertos tipos de medicación, nutrición, etc.) con la dinámica específica del proceso de aprendizaje de la lengua. Es evidente que poder llegar a establecer estos nexos para el aprendizaje de buena parte del conocimiento lingüístico es claramente un puente demasiado lejano (o tal vez inútil). En estos momentos es imposible formular ni tan siquiera hipótesis acerca de las bases moleculares subyacentes a la adquisición de, por ejemplo, la concordancia sujeto-verbo en una oración. Pero existen ya puentes (o andamios) para algunos de los conocimientos que los bebés adquieren en los primeros meses de su vida.

El estudio de los mecanismos iniciales implicados en el aprendizaje (y uso) de la lengua puede ser un excelente modelo de la influencia de aspectos epigenéticos en el desarrollo sano. A menudo el impacto de las experiencias iniciales en el desarrollo se basa en modelos de exposición aberrante. Numerosos estudios han puesto de manifiesto que entornos

adversos en los periodos iniciales del desarrollo son buenos predictores de enfermedades físicas o psiquiátricas. Sin embargo, las consecuencias de variaciones dentro de la normalidad son más difíciles de estudiar. La variabilidad natural que ocurre en las lenguas ofrece modelos de variación no patológica. A modo de ejemplo, las lenguas varían de manera importante en el número de fonemas (el español tiene solo 5 vocales, mientras que el holandés tiene casi 20). La Lingüística nos proporciona modelos teóricos sobre las diferencias formales entre las lenguas, que se suelen ver reflejadas en diferencias en el procesamiento. Estudios con neuroimagen muestran que no solo el cerebro es morfológicamente distinto, según la exposición lingüística (por ejemplo, existen diferencias en el tamaño de áreas de percepción auditiva entre monolingües y bilingües), sino también en los patrones específicos de activación neuronal. Los mecanismos específicos que son necesarios para la comprensión de una lengua como el español, con “cabeza inicial”, no son exactamente los mismos que requiere una lengua como el euskera, con “cabeza final”. Desde el punto de vista del procesamiento, el tipo de cómputos que el cerebro tiene que realizar para comprender dos oraciones que significan lo

mismo en español y euskera no son los mismos. En la oración “la mujer que ha escrito este libro”, ya al principio de la misma sabemos que se trata de una mujer y el resto del sintagma lo que hace es añadir detalles. En euskera, esta oración sería “liburu hau idatzi du-en emakume-a” [libro este escrito ha-que mujer-la] donde primero se nos da la información sobre los detalles y al final se nos dice de qué. Estas diferencias implican necesidades de almacenamiento y manipulación de la información distinta en cada lengua. O para poner un ejemplo más extremo, comparemos “volveremos” con “we will come back”. Ambas oraciones significan lo mismo, pero en el caso del español el “nosotros” y el tiempo futuro lo “deducimos” a partir de secuencias específicas de partes de la palabra; en inglés, cada parte del significado está representada con una palabra distinta. Para aprender una lengua nueva, tenemos que modificar estrategias de procesamiento que se encuentran profundamente enraizadas en nuestro cerebro, ya que se aprendieron muy pronto en la vida y las practicamos continuamente. La mayoría de los seres humanos lo conseguimos de forma relativamente exitosa a base de esfuerzo y años de práctica. Sin embargo, hay algunos individuos que parecen estar

dotados de manera natural, que han nacido con un “don” para las lenguas.

En los últimos años, han proliferado estudios que relacionan la ejecución de determinadas tareas cognitivas con ciertas variaciones genéticas. Dada la complejidad que implica el conocimiento que tenemos del lenguaje (Figura 1) no es de extrañar que resulte particularmente difícil identificar los genes que desempeñan un papel relevante en su aprendizaje y uso. Aunque se han identificado varios genes relacionados con la aparición de diversas patologías del lenguaje (el más famoso el FOXP2, pero también, el CNTNAP2, ATP2C2, CMIP o incluso las enzimas lisosomales), estos estudios se basan en el análisis de patologías y los diagnósticos necesitan también avanzar e incorporar los conocimientos recientes sobre el aprendizaje y funcionamiento del lenguaje.

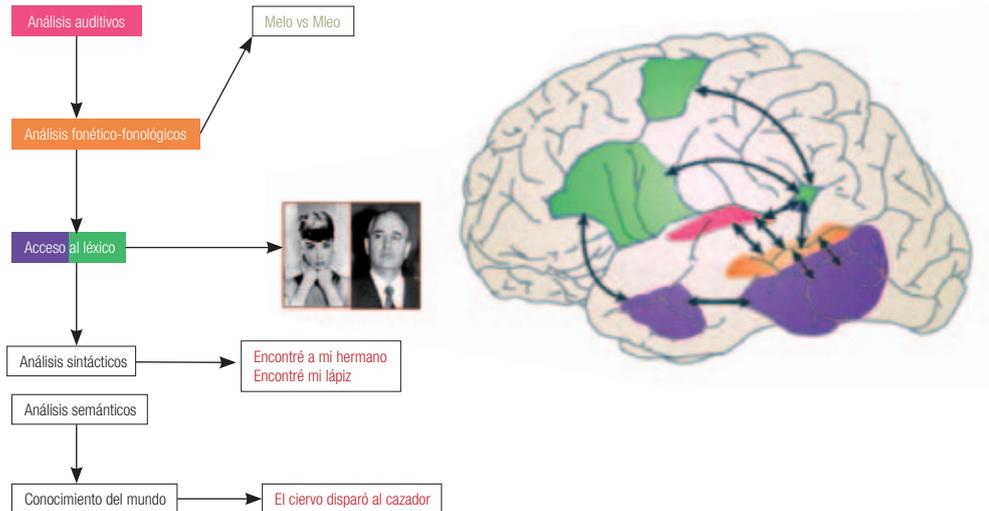
El lenguaje como herramienta social

Uno de los ámbitos que en estos momentos está generando más interés es la interrelación entre el procesamiento del lenguaje y fenómenos relacionados con aspectos sociales. Diversos estudios han mostrado que los adultos y los niños de cinco años prefieren a personas que hablen sin acen-

to antes que a personas que tengan un acento extranjero. Estudios realizados en Estados Unidos muestran que si la disyuntiva es entre etnia (raza) o acento, los niños (y adultos) prefieren una persona de una etnia distinta que hable con su acento antes que una persona (de su misma etnia) pero con un acento extranjero. La preferencia por personas que hablan sin acento ya se observa en bebés de 5 meses. Los bebés prefieren ver (miran durante más tiempo) vídeos sin sonido de personas que antes han oído hablar sin acento que el de personas que antes han oído hablar con un acento extranjero.

La influencia de aspectos sociales va más allá de la simple preferencia. Cuando escuchamos a alguien que consideramos con una jerarquía social superior a la nuestra, incluso si es porque juega mejor a un videojuego, nuestra percepción de lo que dice provoca activaciones corticales de mayor intensidad que cuando escuchamos a alguien que consideramos de una jerarquía social inferior. Esto es cierto no solo a nivel del significado global de las oraciones, sino también con respecto al nivel del reconocimiento de las palabras aisladas: percibimos mejor una palabra si está dicha por una persona de una jerarquía su-

/// Figura 1. Proceso de comprensión del lenguaje //////////////////////////////////////



En el proceso de comprensión del lenguaje el cerebro computa distintos tipos de unidades mediante la interacción de redes. Iniciándose con la extracción de las características físicas del habla (en fucsia), el cerebro identifica los patrones que conforman los fonemas y sus secuencias. Computa distintas unidades según las propiedades específicas de cada lengua (en naranja). Así, para un hispanoparlante la secuencia “Melo” no es una palabra, pero pudiera serlo, mientras que la secuencia “Mleo” es imposible que lo sea. El conocimiento específico de las palabras está representado a distintos niveles en el cerebro (en morado y verde en la figura). La comprensión de oraciones (no se muestra en la figura de la derecha) implica el cómputo de patrones de activación que corresponden a las propiedades sintáctico-semánticas (como, por ejemplo, la necesidad –o no– de la preposición “a” según si lo que se encuentra es un ser humano o un objeto). Los últimos pasos en la comprensión del lenguaje implican poder integrar lo que estamos escuchando con nuestro “conocimiento del mundo” (la anomalía en la oración “el ciervo disparó al cazador” es de este tipo). En el caso de patologías, pueden verse alterados algunos componentes, pero no otros, indicando diferentes afectaciones de las estructuras cerebrales subyacentes. Así, por ejemplo, los enfermos de Alzheimer pueden tener problemas graves en la integración del conocimiento del mundo o en el significado de las palabras, pero preservar el conocimiento de los análisis fonético-fonológicos.

Fuente: la imagen del cerebro es una adaptación de la que aparece en Poeppel D., Monahan P. J., *Current Directions in Psychological Science* 2008;17:80-85.

perior. El impacto de los aspectos de jerarquía social en el funcionamiento del cerebro es un campo muy reciente y cuyos resultados deberían tenerse muy en cuenta a la hora de tomar decisiones en diversas áreas, en especial, en la educación.

Conclusiones

El estudio del lenguaje (y de la cognición en general) requiere del concurso de psicólogos, lingüistas, biólogos moleculares y neurólogos y también de ingenieros, físicos y matemáticos (los modelos computacionales sobre la neurociencia cog-

nitiva son un aspecto que esta breve presentación no ha permitido abordar). Los resultados de estos estudios deberán ayudarnos no solo a diseñar rehabilitaciones más efectivas, sino también a mejorar aspectos fundamentales de la vida cotidiana, en especial la educación. ■

Modernidad: comprender nuestro presente

La visión más común sobre la modernidad –si bien no exenta de problemas– mantiene que este término hace referencia a un nuevo tipo de sociedad que surge a partir de las grandes transformaciones producidas en Europa y América del Norte, que culminaron con las revoluciones industriales y democráticas, iniciadas a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Peter Wagner, a través de su artículo, revisa los modos en que la Sociología y la Filosofía han intentado entender la modernidad, con el fin de ayudarnos a comprender nuestra propia modernidad.

Peter Wagner

Universitat de Barcelona

Traducción: Alberto Fragio

Hubo un tiempo en el que era común pensar en una única y singular “sociedad moderna”, originada en Occidente, pero llamada a fundar una nueva y mejor época en la historia de la humanidad. Hoy necesitamos reflexionar sobre esas ideas a la luz de la actual condición globalizada de la modernidad. Las pretensiones y esperan-

zas modernas se han vuelto imprescindibles en cada vez más ámbitos de la vida, y para muchas más personas que nunca. En el curso de su realización y difusión, sin embargo, esas pretensiones y esperanzas han sido también radicalmente transformadas.

Han aparecido nuevas cuestiones, algunas de las cuales

son centrales en nuestro tiempo, y que procedemos a enumerar a continuación.

En primer lugar, sociólogos y filósofos sostuvieron con tenacidad que hay –y que sólo puede haber– un único modelo de modernidad. Sin embargo, las instituciones y prácticas modernas no han permanecido invariables en el tiempo y,

por añadidura, ha surgido ahora una variedad de formas modernas de organización sociopolítica. ¿Qué conlleva esto para nuestra idea de progreso o, en otras palabras, para nuestra esperanza de que el mundo futuro puede ser mejor que el presente?

En segundo lugar, la modernidad se ha basado en la espe-

ranza de la libertad y la razón, pero ha creado las instituciones del capitalismo contemporáneo y de la democracia. ¿Cómo se relaciona en la actualidad la libertad de los ciudadanos con la libertad de los compradores y vendedores?, ¿y cómo afecta el descontento que suscitan el capitalismo y la democracia en la sostenibilidad de la modernidad?

En tercer lugar, nuestro concepto de modernidad está inextricablemente ligado a la historia de Europa y de Occidente. ¿Cómo debemos entonces comparar las diferentes formas de la modernidad global contemporánea de un modo “simétrico”, no sesgado ni eurocéntrico?, ¿de qué manera cabe desarrollar la sociología del mundo moderno?

Una revisión de los modos en que la Sociología y la Filosofía han intentado entender la modernidad, puede ayudarnos a comprender nuestra propia modernidad.

La visión más común sobre la modernidad –si bien no exenta de problemas– mantiene que este término hace referencia a un nuevo tipo de sociedad que ha surgido a partir de una sucesión de grandes transformaciones producidas en Europa y América del Norte, que hubieron de culminar con las revoluciones industriales y de-



Peter Wagner.

Un acontecimiento clave en la formación de lo que ahora consideramos como la Europa moderna fue el, así llamado, descubrimiento de las Américas con sus poblaciones hasta entonces desconocidas

Peter Wagner

Profesor ICREA de investigación en Sociología en la Universitat de Barcelona, e investigador principal del proyecto ‘Trajectories of modernity’ (TRAMOD), financiado por el European Research Council. Su investigación se concentra en el ámbito de la teoría política y social, la Sociología histórico-política comparada y la Sociología del conocimiento. De manera específica, ha estudiado la historia de las sociedades europeas y no europeas desde una perspectiva comparada y en términos de transformaciones de la modernidad. Antes de incorporarse a la Universitat de Barcelona, ha sido profesor de Sociología en las Universidades de Trento (Italia) y Warwick (Reino Unido), así como profesor de teoría social y política en el Instituto Universitario Europeo de Florencia. Entre sus publicaciones cabe contar *Plurality and progress: modernity in political philosophy and historical sociology* (Malmö: NSU Press, 2010); *Modernity as experience and interpretation: a new sociology of modernity* (Cambridge: Polity, 2008), *Varieties of world-making: beyond globalization* (ed. with Nathalie Karagiannis, Liverpool: Liverpool University Press, 2007), *Theorizing modernity and A history and theory of the social sciences* (both London: Sage, 2001) and *A sociology of modernity: liberty and discipline* (London: Routledge, 1994).

mocráticas iniciadas a finales del siglo XVIII y principios del XIX. No en vano, esta visión presupone que dichas transformaciones catapultaron a Europa (o bien a Occidente en su conjunto) a la primera posición de la historia universal, y que gracias a ello, a su inherente superioridad, habría sido difundido el modelo occidental de comprender el mundo. Pensar en la modernidad significaba así pensar en la globalización, por más que estos términos solo hayan empezado a ser de uso frecuente a partir de los años 80 y 90, respectivamente.

Obtener una significación global –o universal– era una aspiración de la modernidad europea ya desde sus inicios. Un acontecimiento clave en la formación de lo que ahora con-

sideramos como la Europa moderna fue el, así llamado, descubrimiento de las Américas con sus poblaciones hasta entonces desconocidas. Este evento suscitó las reflexiones europeas sobre la naturaleza de la humanidad, proporcionando un marco de referencia para las especulaciones filosóficas sobre el “estado de naturaleza”, como en el *Segundo tratado sobre el gobierno civil* (1690) de John Locke. Desde el *Discurso del método* (1637) de René Descartes en adelante, la Ilustración ha pretendido erigir el conocimiento universal a partir de unos fundamentos mínimos, pero absolutamente firmes y basados ante todo en la libertad y la razón. La revolución americana y la revolución francesa eran vistas como una inevitable entrada de la humanidad en la

democracia liberal, sustentada en los derechos humanos y en la soberanía popular. Ya en su *Democracia en América* de 1830, Alexis de Tocqueville consideraba el sufragio universal igualitario como el punto de llegada hacia el que la historia política habría de aproximarse. Y desde *La riqueza de las naciones* (1776) de Adam Smith hasta la primera mitad del siglo XIX, los economistas políticos se atribuyeron el descubrimiento de la autorregulación del mercado como una forma inequívocamente superior de organización económica. En el *Manifiesto comunista* (1848), Karl Marx y Friedrich Engels proporcionaron una imagen de la globalización económica cuyo poder evocador todavía no ha sido igualado.

Una comprensión básica y común de la modernidad subyace en este debate, que se extiende por más de dos centurias, alcanzando múltiples facetas de la vida social. La modernidad es la creencia en la libertad de los seres humanos –natural e inalienable, según muchos filósofos de la época–, así como en la capacidad de raciocinio de los hombres, combinada con la inteligibilidad y asequibilidad del mundo para la razón humana. Este compromiso se traducía en los principios de la autodeterminación individual y colectiva, junto con la espe-

La modernidad es la creencia en la libertad de los seres humanos –natural e inalienable, según muchos filósofos de la época–, así como en la capacidad de raciocinio de los hombres, combinada con la inteligibilidad y asequibilidad del mundo para la razón humana

ranza de un aumento del dominio de la naturaleza y de una interacción racional entre los seres humanos. Por su parte, la *Declaración de los derechos del hombre y de los ciudadanos* (1793) y los tratados de libre comercio pueden entenderse como aplicaciones de aquellos principios subyacentes de la modernidad, como las transformaciones técnicas que vienen recogidas en el término “Revolución industrial”.

Esos principios fueron considerados *universales*, por un lado, porque portaban un valor normativo con el que –así se pensaba al menos– todo ser humano podía estar de acuerdo y, por otro lado, porque permitían la creación de estrategias funcionalmente superiores con las que hacer frente a diferentes aspectos clave de la vida social, el más importante de los cuales, quizá, era la satisfacción de las necesidades humanas en la producción de bienes de mercado y el gobierno racional de los asuntos colectivos a través de una administración basada en la ley y jerárquicamente organizada. Estos principios, además, eran vistos como *globalizables* en su aplicación debido al poder interpretativo y práctico de su normatividad y funcionalidad.

Ninguna de esas pretensiones, sin embargo, fueron inmediatamente aceptadas.

Ni siquiera era factible extender esos principios mediante el compromiso intelectual, dado que siempre existieron dudas sobre la posibilidad de traducirlos en estrategias institucionales sin pérdidas o modificaciones sustantivas. Immanuel Kant y Karl Marx se cuentan entre los primeros críticos. Kant, por ejemplo, estaba comprometido con la idea de un gobierno ilustrado y responsable, y esperaba que el principio republicano propiciara la prosperidad mundial. No creía, sin embargo, en lo que podría considerarse la culminación de ese mismo proceso, la creación de un mundo republicano, pero argumentaba, en cambio, a favor de la superioridad normativa de una federación global de repúblicas (*Sobre la paz perpetua*, 1795). La crítica de Karl Marx a la economía política (ya en el subtítulo de *El Capital*, de 1867) ponía en tela de juicio que la transformación del ser humano en un agente de mercado estaba basada en los principios de libertad e igualdad, tal como la economía política sugería. Esta nueva formación social, a la que Marx se refería como la sociedad burguesa, por el contrario, dividía a la humanidad en dos clases crecientemente antagonicas: los poseedores de los medios de producción y quienes solo podían vender su propia capacidad de trabajo.

Por su parte, la Declaración de los derechos del hombre y de los ciudadanos (1793) y los tratados de libre comercio pueden entenderse como aplicaciones de aquellos principios subyacentes de la modernidad

Desde el comienzo del siglo XX, la trayectoria de las sociedades europeas (u occidentales) se había separado tanto del resto del mundo que la particularidad de la “racionalidad occidental”, por expresarlo como Max Weber, se había convertido, no sin objeciones, en una clave decisiva para el estudio histórico-sociológico. La ambigüedad de la terminología escogida por Weber hubo de quedar instalada desde entonces en el debate sobre la modernidad. Weber parecía reivindicar tanto los presuntos orígenes occidentales de esa racionalización como el arraigo de sus precondiciones en una cosmología occidental, que además estaba destinada a poseer una “significación universal”, no sin antes reconocer, como frecuentemente suele olvidarse, que quizá esto último es lo “*que estamos inclinados a pensar*”. Así las cosas, esto permitió a los promotores de la teoría de la modernización de la década de los 60 y a los más recientes abogados de las “múltiples modernidades” referirse a Weber como su fuente principal de inspiración. Los primeros, liderados por Talcott Parsons, sugerían que el “avance” occidental hacia la modernidad podría ser emulado por las élites en otras sociedades en virtud de su superioridad normativa y funcional y, por lo tanto, la modernidad

occidental sería susceptible de obtener una difusión global en el proceso de “desarrollo y modernización”, tal como lo expresaba la jerga sociológica de los años 60. Los últimos, inspirados en el Shmuel N. Eisenstadt tardío, no desmintieron dicha “significación universal” de las transformaciones sociales de Occidente iniciadas en el siglo XVIII, pero sostuvieron que el encuentro de otras civilizaciones con la modernidad occidental no condujo a una mera difusión del modelo occidental sino, por el contrario, a la proliferación de variaciones de la modernidad generadas en el encuentro de diferentes “programas culturales” previos con las prácticas e ideas occidentales.

La oposición entre la teoría de la neo-modernización y el teorema de las múltiples modernidades, que caracteriza el actual debate sociológico sobre la modernidad, tienden a descuidar el tercer aspecto de la concepción weberiana del “racionalismo occidental” y que consiste en un profundo escepticismo respecto al destino de la modernidad. Desde este punto de vista, las reflexiones de Weber se ubican a medio camino de la tradición crítica con la modernidad, que fue elaborada a mediados del siglo XIX y del XX, con Karl Marx en el inicio y Theodor W. Adorno en el final

—al menos en la forma más radical de esta aproximación—. Marx aceptó el compromiso moderno de la libertad y la razón, tal como se pone de relieve en su esperanza en una futura “asociación libre de seres humanos”. Sin embargo, no dejó de señalar la imposibilidad de llevarla a cabo bajo las condiciones de dominación de clase. El mercado libre de la sociedad burguesa podría conducir tanto a la alienación como a un excesivo utilitarismo, a convertir la relación de los seres humanos en un mero tráfico de objetos. De manera semejante, Weber vio la Reforma protestante como un incremento de la autonomía individual y una eliminación de las mediaciones institucionales de la Iglesia entre los creyentes y Dios (*La ética protestante y el espíritu del capitalismo*, 1904-05). Toda vez que la ética social ligada al protestantismo, la cual enfatizaba el éxito y el compromiso profesional, había contribuido a impulsar las instituciones del capitalismo moderno, sin embargo, una conducta racionalizada de la vida podría imponer a sus habitantes una “morada fabricada con acero” (la traducción común de la expresión de Weber *stählernes Gehäuse* como “jaula de hierro” está claramente errada) característica de la modernidad. Adorno y Max Horkheimer (*Dialéctica*

de la Ilustración, 1944) proporcionaron la versión más extrema de la idea, según la cual el compromiso moderno con la libertad y la razón tendía hacia su autocancelación en su proceso inmanente de conversión a formas socio-históricas concretas. Vieron los orígenes de esta regresión en la Filosofía de la Ilustración que, en su insistencia en la cognoscibilidad del mundo, hubo de transformar todas las cualidades en meras cantidades de lo mismo, reduciendo lo desconocido al estatus de una variable sometida a la lógica de las ecuaciones matemáticas. Tal conceptualización estableció una alianza totalizadora con el capitalismo industrial y produjo, a lo largo del siglo XX, una sociedad dominada por la cultura industrial, en la que no había nada que pudiera ser oído o tocado por vez primera. La novedad y la creatividad eran igualmente eliminadas en sociedades que de otro modo habrían permanecido ajenas a la cultura de masas de los Estados Unidos, de la Alemania nazi o de la Unión Soviética estalinista.

Las críticas radicales de la modernidad fueron perdiendo gradualmente su poder persuasivo tras la Segunda Guerra Mundial. Un eco se puede encontrar, no obstante, en el análisis de Herbert

Las críticas radicales de la modernidad fueron perdiendo gradualmente su poder persuasivo tras la Segunda Guerra Mundial

Marcuse sobre el “hombre unidimensional” y la “sociedad unidimensional” (1964), un diagnóstico en consonancia con la revuelta estudiantil de finales de los años 60 y con la revolución cultural de “1968”, llamada a (re)introducir una pluralidad de dimensiones en el mundo contemporáneo. Cuando Zygmunt Bauman reanimó los análisis de la modernidad que mostraban sus intentos obsesivos por crear un orden y eliminar la ambivalencia (*Modernidad y Holocausto*, 1989; *Modernidad y ambivalencia*, 1991), solo parcialmente lo hizo en perspectiva histórica, ofreciendo una nueva visión del genocidio nazi sobre los judíos europeos como un fenómeno plenamente moderno, y situando sus propios escritos como la salida a semejante organización de la modernidad, a saber, hacia una postmodernidad preocupada por la libertad, incluso a través de una posible modificación y reducción de las promesas modernas tempranas.

Tal visión sobre la modernidad sufrió de hecho una modificación crucial a partir de la década de los 70 y cuyo emblema es *La condición postmoderna* (1979) de Jean François Lyotard. Lyotard radicalizó el debate sociológico de la década –promovido por autores como Raymond Aron y Daniel

Bell– sobre la transformación de una sociedad industrial en una sociedad postindustrial, sugiriendo que esta configuración social emergente era de una novedad tal, que difícilmente podía ser captada por la conceptualización tradicional. De este modo, su trabajo contribuyó a suscitar una investigación mucho más amplia que ha caracterizado buena parte de la Filosofía política y la Sociología histórico-comparativa elaborada desde entonces, convirtiendo el franco compromiso moderno con la libertad y la razón en una pluralidad de posibles interpretaciones. Una de sus consecuencias fue la temprana oposición entre una visión afirmativa de la modernidad como institucionalización de la libertad y la razón, por una parte, y el análisis crítico de la autocancelación del compromiso normativo moderno, por otra, que además podía ser ahora reinterpretado como evidencia de la ambigüedad de las bases conceptuales de la modernidad, y de la variedad de posibles traducciones de dichos compromisos en prácticas sociales institucionalizadas, tales como la democracia y el capitalismo.

Las dudas sobre la estabilidad y superioridad de Occidente, sobre la “sociedad moderna”, no quedaron redu-

cidas en ese periodo al ámbito de las reflexiones teóricas. A finales de los años 70 y comienzos de los 80, la revolución iraní acabó con la idea de que las sociedades no-occidentales iban tan solo un poco atrasadas en relación con la misma trayectoria modernizadora sobre la que Occidente se había embarcado. La emergencia de la economía japonesa –y después la de Taiwan, Corea del Sur y China– sugería que un capitalismo por completo ajeno a la cultura protestante podía competir con las economías supuestamente más avanzadas. La aparición de las ideologías neoliberales (monetarismo y la economía de la oferta, según se las denominaba entonces) afines al poder gubernamental en Reino Unido y en los Estados Unidos, así como el fracaso concomitante de la política económica de oferta de mercado en Francia, señalaron el final del optimismo en las economías de mercado alentadas por los gobiernos nacionales. Además, esos años fueron jalonados por movimientos estudiantiles, de trabajadores y por los derechos civiles, que súbitamente pusieron en entredicho el aparente consenso social postbélico de finales de la década de los 60, al que se añadiría el colapso del socialismo soviético entre 1989 y 1991. Había, en su-

ma, un conjunto de evidencias cotidianas plenamente disponibles que volvía aún más acuciante la necesidad de preguntarse de nuevo sobre la condición humana contemporánea.

Tales observaciones y reflexiones dieron un nuevo ímpetu a la investigación sobre la modernidad. En Filosofía política y teoría social, la naturaleza de la ambigüedad moderna y sus compromisos requieren de ulteriores investigaciones, no solo con una visión que permita comprender e interpretar mejor el grado de apertura de los compromisos modernos, sino también las reivindicaciones universalistas que hubieron de acompañar a esos compromisos ya en sus comienzos. En la investigación sociológica, que se abre a partir de la década de los 60, la hipótesis de una reciente y gran transformación de las “sociedades modernas” ha condicionado muchos análisis desde la segunda mitad de los 80 en adelante. La investigación contemporánea necesita atender de manera especial la pregunta sobre esa transformación, si se muestra una dirección específica de ruptura o bien si se confirman las tendencias de la modernidad tal y como fueron postuladas en las teorizaciones tempranas. Finalmente,

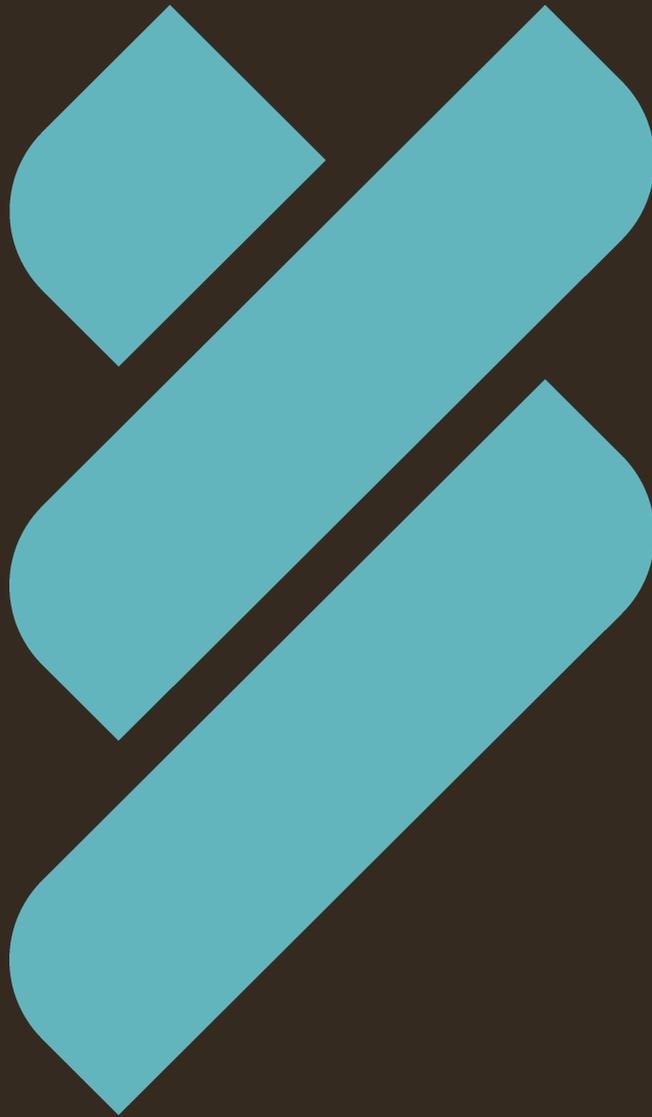
A finales de los años 70 y comienzos de los 80, la revolución iraní acabó con la idea de que las sociedades no-occidentales iban tan solo un poco atrasadas en relación con la misma trayectoria modernizadora sobre la que Occidente se había embarcado

la Sociología comparada de las diferentes modernidades necesita investigar si la constatable pluralidad de las formas modernas de organización sociopolítica fue creada por procesos históricos específicos, así como explorar las condiciones que permiten la persistencia de esa pluralidad bajo las condiciones actuales de globalización.

Esta triple tarea es heredera de las interpretaciones dadas en la reflexiones de Weber sobre la modernidad, sin embargo la actual condición de una modernidad global tiende a agudizar los aspectos desvelados en las primeras teorizaciones. La pluralidad de las formas modernas pueden propiciar una variedad en pugna de proyectos creadores del mundo, mientras las tendencias comúnmente observadas de producción de homogeneidad pueden imponer un retorno de la visión de la modernidad como una forma única y singular de organización sociopolítica, desprovista de alternativas duraderas. En este último caso, la crítica de la modernidad puede emerger con una nueva faz, como una crítica de la individualización alienada y utilitarista que conlleva el riesgo de perder el mundo como un espacio acogedor significativo, el riesgo de desmundanización. ■

06

Tribuna

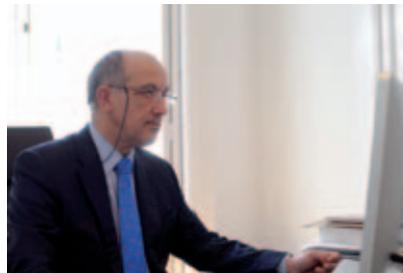


Investigación de frontera: traer un futuro al presente

Javier Rey

Director General de la Fundación General CSIC

Thomas Kuhn, en su libro *La estructura de las revoluciones científicas* describe un modelo de la dinámica de la ciencia basado en periodos de calma, que él llama *ciencia normal*, en los que reina un determinado paradigma, marco conceptual y metodológico, que se utiliza para encontrar respuestas a preguntas pertinentes en el contexto del propio paradigma. Estos periodos de calma se ven interrumpidos cuando aparecen anomalías en el paradigma, respuestas que no pueden ser conseguidas, o resultados y observaciones que contradicen alguno o varios de los principios que sostienen el paradigma. En estas fases de crisis y agitación serían, en opinión de Kuhn, cuando se producen cambios de paradigma, revoluciones científicas en las que se cambia el marco de desarrollo de la ciencia en un determinado ámbito. En ocasiones estos nuevos paradigmas no son directamente comparables con aquellos que desbancan (lo que Kuhn y otros filósofos de la ciencia como Paul Feyerabend o, en parte Imre Lakatos, llamaban *inconmensurabilidad* de paradigmas, concepto controvertido, debatido y matizado posteriormente por el propio Kuhn) e incluso puedan coexistir, aunque en realidades o escalas diferentes, como por ejemplo, la Mecánica newtoniana y la Mecánica relativista.



Javier Rey.

En la última etapa de su vida, Kuhn dejó un poco de lado la concepción de las revoluciones científicas en términos de estabilización y desestabilización de paradigmas y abrazó un concepto algo diferente basado en el aislamiento conceptual y metodológico entre disciplinas científicas. Las disciplinas acaban separándose tanto que no solo utilizan lenguajes diferentes, sino que los conceptos y marcos metodológicos son tan distintos que acaban siendo universos separados.

Aunque la evolución de la ciencia, no tanto revolución, tiene importantes componentes más sociológicos que epistemológicos, el concepto kuhniano de paradigma puede resultar útil cuando tratamos de investigaciones de frontera, ya

que la creación suave de nuevos paradigmas que abren puertas a dimensiones imprevistas del conocimiento es una propiedad, si no exclusiva sí muy característica, de las investigaciones de frontera.

¿Qué es investigación de frontera?

Una definición simple de investigación de frontera podría ser “aquellas investigaciones que se desarrollan en las fronteras del conocimiento”, matizando quizás, “en una determinada área o ámbito”. La definición es claramente imprecisa, de hecho no responde a la pregunta, pues traslada la definición un paso más atrás, a las fronteras del conocimiento, sin aportar ningún criterio discriminador. Toda investigación es sobre algo desconocido y puede aportar conocimiento nuevo. Por tanto, toda investigación sería de frontera, pues se desarrolla en la frontera entre lo que es conocido y lo que es desconocido. Pero evidentemente, esta conclusión no nos satisface. Queremos distinguir entre investigación de frontera genuina, y el resto de las investigaciones, las que podríamos llamar “de la corriente principal” (o *ciencia normal* según Kuhn).

Quizás ayude enumerar algunos aspectos que caracterizan a las investigaciones de frontera. Por ejemplo, suelen 1) abor-

dar cuestiones sobre las que existe una fuerte controversia en la comunidad científica del ámbito en el que se desarrolla; 2) ser cuestiones de difícil respuesta, al menos con los abordajes metodológicos al uso; 3) utilizar metodologías y conceptos atípicos en su ámbito; 4) partir de resultados inesperados que ponen en cuestión el paradigma dominante; 5) relacionado con esto último, centrarse en cuestiones cuya solución es clave para confirmar (o rebatir) el paradigma imperante; 6) ser investigaciones con un nivel de incertidumbre muy alto sobre su éxito; etc. No todas las investigaciones de frontera responden a todos estos criterios. Lo que parece más común a todas ellas es su potencial transformador y renovador del conocimiento. Las investigaciones de frontera tienen la capacidad de aportar resultados que suponen un avance muy significativo en el conocimiento, siendo generadoras de nuevos paradigmas que abren puertas a nuevos enfoques y formas de pensar, nuevas cuestiones y planteamientos, que no son posibles en el marco, digamos estándar, de la ciencia que no es de frontera, la ciencia de la corriente principal. Con un coste, el alto riesgo de fracaso de muchas investigaciones de frontera.

La vida en la frontera es difícil

Algunas investigaciones de frontera son muy populares, como aquellas necesarias por el paradigma imperante. Investigaciones cuyo resultado puede ratificar o refutar el propio paradigma. En otros casos, son investigaciones que se desarrollan en marcos metodológicos y conceptuales muy innovadores, cuya potencialidad es ya reconocida por la corriente principal de investigación, pero aun no están suficientemente implantadas en la comunidad científica afectada. Son investigacio-

nes pioneras de campos de investigación que pueden devenir en cuerpos de conocimiento completos.

Sin embargo, existen otras investigaciones de frontera en las que la potencialidad de generar conocimiento nuevo resulta difícil de estimar. Precisamente por desarrollarse en un terreno donde es intrínsecamente difícil investigar, con pocos antecedentes, con abordajes atípicos, y en muchas ocasiones con pocos investigadores y menos expertos trabajando en esa línea. El resultado es muchas veces impredecible. Es más, muchas de estas investigaciones no son siempre bien percibidas por el *statu quo* de la mayoría o pueden incluso ser completamente ignoradas. Los investigadores que se arriesgan en estas investigaciones son exploradores, trazan caminos sin saber adónde van a ir a parar.

Los sistemas actuales de I+D no favorecen las investigaciones de frontera. Precisamente por sus propias características. Al ser investigaciones de alto riesgo, no suelen tener una valoración alta en las comisiones de decisión de financiación de la investigación, donde es un requisito la existencia de resultados preliminares que apoyen la propuesta. Además, faltan en muchos casos expertos o conocedores de las investigaciones que se proponen, con lo que la evaluación por pares, común a la mayoría de los sistemas científicos actuales, falla. Las investigaciones de frontera tienen también dificultades en su penetración en la comunidad científica, es decir, en su diseminación en forma de publicaciones o comunicaciones. Por las mismas razones que explican su dificultad de financiación. Esto provoca que, pese a lo estimulante y atractivo que resultan, las in-

vestigaciones de frontera no sean caminos elegidos por la mayoría de los científicos y, lo que es más preocupante, por los científicos jóvenes, los que tienen mayor potencial creativo e innovador. Precisamente por su altísimo riesgo de fracaso y de exclusión por parte de la comunidad en la corriente principal de la investigación. Los sistemas actuales de promoción de la ciencia penalizan duramente el riesgo al fracaso, lo que sumado a la dificultad intrínseca que suele acompañar a las investigaciones de frontera explica por qué la intensidad de investigación en la frontera sea, en general, sensiblemente menor que en la *ciencia normal* de Kuhn.

Sin embargo, este planteamiento, que más parece una actitud, puede resultar muy perjudicial para el sistema científico a largo o incluso a medio plazo. Las investigaciones de frontera son el semillero de donde se echa mano cuando llega el momento de crisis del que hablaba Kuhn. Si queremos tener auténtica transformación del conocimiento es preciso potenciar las investigaciones de frontera, y reconocer y fomentar el espíritu inquisitivo y crítico de nuestros jóvenes científicos. Es necesaria no solo la excelente capacitación técnica que proporciona la ciencia de la corriente principal, sino también nuevas ideas y aproximaciones metodológicas y conceptuales. No será posible si no tener capacidad de respuesta cuando la próxima pregunta, el próximo resultado inesperado, el siguiente reto innovador, demande del sistema de I+D un conocimiento que ahora ni siquiera podemos sospechar o imaginar. Las investigaciones de frontera tienen esa capacidad, la de traer un futuro al presente, incluso aun cuando los que la practican no pueden siquiera anticiparlo. ■

07

Noticias



Workshops FGCSIC



La Fundación General CSIC ha puesto en marcha los Workshops FGCSIC, una oportunidad de encuentro al más alto nivel para profesionales, investigadores e interesados en áreas tales como la vigilancia tecnológica e inteligencia competitiva, la planificación estratégica aplicada a la I+D, la prospectiva científica o las métricas de la producción científico-técnica.

El 25 de mayo en Caixa Forum Madrid tuvo lugar el primero de ellos, que trató el tema “Aspectos clave de la vigilancia tecnológica y la inteligencia competitiva”. Concebido bajo el formato de jornadas, se estructuró en cuatro talleres, y cada uno de ellos constó de tres partes: una breve ponencia de un especialista contextualizó y mostró las principa-

les líneas de cada temática; a continuación, los asistentes afrontaron un caso práctico y, por último, se pasó al debate, la puesta en común y las conclusiones. Los ponentes invitados fueron Eliana Benjumea, directora de Infoline y experta en inteligencia competitiva en Acciona; Mario Esteban, gerente de Inteligencia Competitiva de Acciona; Clara Parapar, gestora de Proyectos de FGCSIC y responsable de contenidos de este Workshop, y Ramón Maspons de BioCat, director de Unidad de Proyectos.

El próximo Workshop FGCSIC será sobre métricas de la producción científico-técnica y se celebrará en septiembre.

Más información:
www.fgcsic.es/workshops

Programa de televisión “Claves de Alzheimer”

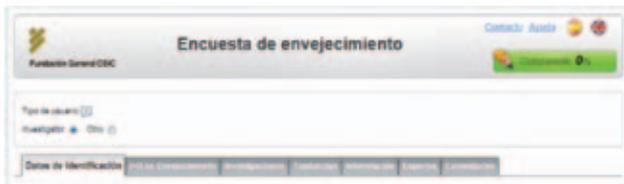


En el marco del Año Internacional de la investigación en Alzheimer y enfermedades neurodegenerativas, la Fundación General CSIC colabora en el programa de divulgación científica “Claves de Alzheimer”, que se estrenó el 8 de abril en el canal de Internet Indagando.tv.

“Claves de Alzheimer” se emite semanalmente *on line*, los viernes a las 10.00 de la mañana, tiene una duración de 20 minutos y se repite cada dos horas. A lo largo de trece programas, se analizarán las claves de la enfermedad, repasando las últimas líneas de investigación básica y clínica, así como los aspectos socio-sanitarios de la misma.

Más información:
www.indagando.tv
www.fgcsic.es
www.youtube/fgcsic

Encuesta FGCSIC sobre Envejecimiento



Con la finalidad de dar continuidad al *Informe FGCSIC sobre la I+D en Envejecimiento*, la Fundación va a realizar una encuesta dirigida a investiga-

dores del sistema español de I+D, especialmente a aquellos que se mueven en este ámbito. El objetivo de esta encuesta es recopilar material

que permita realizar un ejercicio de prospectiva científica en aquellas áreas relacionadas con el envejecimiento, con el fin de detectar cuáles son los principales retos de los científicos en la situación actual y por dónde se moverá la investigación en los próximos años. La encuesta se hará *on line*, a través de una aplicación telemática.

FGCSIC colabora en los Premios tr35 Spain concedidos por el MIT

Technology Review, publicación del Massachusetts Institute of Technology (MIT), con la colaboración de un conjunto de entidades a las que se suma la Fundación General CSIC, lanza por primera vez en España los Premios TR35, con el fin de seleccionar los mejores talentos españoles o extranjeros residentes en España, en el ámbito de la innovación. La iniciativa



TR35 Spain está patrocinada por el Centro de Innovación de BBVA y coordinada por Opinno, Open Innovation.

El Jurado seleccionará a los diez innovadores más destacados, menores de 35 años, cuyo trabajo técnico haya sido aplicado con éxito en los últimos años o posea un gran potencial de desarrollo en las próximas décadas. Los candidatos son nominados por personas de su entorno profesional o académico

La ceremonia de entrega de premios tendrá lugar en Málaga los días 26 y 27 de octubre de 2011.

Más información: www.tr35spain.com

Reunión del patronato



Fundación General CSIC

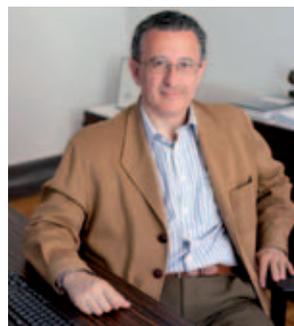
El 18 de mayo, se celebró el patronato de la Fundación General CSIC en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, en cuyo orden del día figuró la aprobación de la Memoria Anual de Actividades 2010 de la Fundación y la presentación del Informe sobre la situación actual del Plan de Actuación 2011.

José Luis de Miguel, presidente de LES España-Portugal

José Luis de Miguel Antón, subdirector general de la Fundación General CSIC ha sido nombrado presidente de LES España-Portugal (Licensing Executives Society International Inc.), asociación orientada

a la práctica profesional y de negocio. LES Internacional está reconocida por la Organización Mundial de la Propiedad Industrial (OMPI).

Más información: www.lesi.org



Proyectos cero en Envejecimiento



El día 31 de mayo finalizó el plazo para la presentación de documentación de los proyectos seleccionados en la primera fase de la Convocatoria de Proyectos Cero en Envejecimiento.

Más información en www.fgcsic.es/envejecimiento

FGCSIC, en la Red

La Fundación General CSIC se ha dado de alta en la Plataforma de Mercados Biotecnológicos: www.mercadosbiotecnologicos.com/es/index.cfm

También está presente en la Plataforma Tecnológica



del Sector de Componentes de Automoción (SERTEC-M2F): www.move2future.es/foroesp.htm

Y ha entrado a formar parte de la red profesional LinkedIn: www.linkedin.com/company/fundacion-general-csic



Fundación **BBVA**

Ciencia y Humanidades

La Fundación BBVA tiene como objetivo central de su actividad el apoyo a la investigación científica de excelencia, la música, la creación artística y literaria y las humanidades. La ciencia, la tecnología, la música y el arte, así como su estudio académico en el marco de las disciplinas humanísticas, forman hoy un espacio continuo, convergiendo en el modelado de la cultura y la sensibilidad del presente.

La Fundación BBVA impulsa el conocimiento a través de programas propios, abarcando proyectos de investigación, formación avanzada, y difusión a la sociedad de los resultados de la investigación y la creación. Entre las áreas de atención preferente destacan el medio ambiente (biodiversidad, cambio climático), la biomedicina, las ciencias básicas y la tecnología, economía y sociedad, música clásica y contemporánea, literatura, artes plásticas y humanidades.

La Fundación BBVA reconoce también, a través de distintas familias de premios, las realizaciones de investigadores y artistas. Los Premios Fundación BBVA Fronteras del Conocimiento, desarrollados en colaboración con el CSIC y actualmente en su tercera edición, distinguen a escala internacional contribuciones particularmente sobresalientes, capaces de desplazar de manera significativa el ámbito de lo conocido en los ocho ámbitos siguientes: Ciencias Básicas (Física, Química, Matemáticas), Biomedicina, Ecología y Biología de la Conservación, Tecnologías de la Información y la Comunicación, Economía, Finanzas y Gestión de Empresas, Música Contemporánea, Cambio Climático, y Cooperación al Desarrollo.

Con esas actuaciones, la Fundación BBVA desarrolla un principio central del Grupo BBVA: trabajar por un futuro mejor para las personas, mediante el impulso continuo del conocimiento y la innovación.

www.fbbva.es



Fundación General CSIC

