

José Manuel Sánchez Ron

Diccionario de la ciencia

José Manuel Sánchez Ron, 1996

A mis hijas, Mireya y Amaya

Vemos, así, hasta qué punto los monumentos del ingenio y del saber son más duraderos que los monumentos del poder o de las manos. Pues ¿no se han conservado los versos de Homero dos mil quinientos años o más, sin mengua de una sílaba o letra, cayendo en ruinas o siendo demolidos entretanto incontables palacios, templos, castillos, ciudades? No es posible tener efigies o estatuas de Ciro, Alejandro, César, ni de los reyes o altos personajes de épocas mucho más recientes: porque los originales no permanecen, y a las copias por fuerza ha de faltarles vida y verdad. Pero las imágenes de las inteligencias y del conocimiento humano quedan en los libros, sustraídas a los estragos del tiempo y capaces de perpetua renovación. Como que ni siquiera es apropiado llamarlas imágenes, porque no cesan de engendrar y esparcir su semilla en las mentes de otros, provocando y causando infinitas acciones y opiniones en las épocas sucesivas.

FRANCIS BACON, *El avance del saber* (1605)

PRÓLOGO A LA NUEVA EDICIÓN

Han transcurrido diez años desde que este Diccionario de la ciencia, uno de mis libros más queridos, vio la luz por vez primera. Una década no es, en principio, mucho tiempo, pero en ésta algunos apartados de la ciencia —en especial aquellos que tienen que ver con las ciencias biomédicas— han experimentado un gran, un enorme incluso, desarrollo. He tratado de dar cuenta de estos avances, o, mejor, de reaccionar ante ellos introduciendo algunos cambios en las entradas existentes y admitiendo nuevas voces (por ejemplo, «células madre», «clonación», «gripe», «malaria», «materia oscura» o «química»), pero debo confesar que no son excesivas las variaciones con respecto a la primera versión, aunque en justicia sí se debe hablar de una «nueva edición». Que éste sea un «diccionario de autor», es decir, un libro en el que, bajo la forma de diccionario, el autor presenta algo así como su visión del mundo, justifica, creo, mi decisión. Diez años después, en este libro se encuentra lo esencial de mi visión de la ciencia, y del mundo también. Aquellos que busquen un diccionario en el sentido clásico de la palabra, una obra en la que se tiene la esperanza de encontrar todos, o la mayoría, de los términos y conceptos de la materia a la que el diccionario está dedicado, deberán dirigirse a otro texto y no a este.

Únicamente me resta agradecer a todos aquellos que durante estos años se han dirigido a mí valorando positivamente este libro mío. No olvido el aprecio, el afecto y cariño que me han mostrado. Espero que no abandone nunca mi memoria el recuerdo del hombre que me telefoneó para decirme cuánto consuelo había encontrado en la entrada «Alzheimer», mal que su esposa sufría, ni el de la madre que me expresó, agradecida, que su hijo quería estudiar ciencias después de leer mi libro. Por todo eso estoy aún más agradecido a la editorial Crítica, en concreto a Gonzalo Pontón y Carmen Esteban, por haberme ofrecido la oportunidad de esta nueva edición.

Madrid, 14 de junio de 2006

INTRODUCCIÓN

«Heme aquí, a mis sesenta y siete años, dispuesto a escribir algo así como mi propia necrología», escribía Albert Einstein al inicio de las *Notas autobiográficas* que compuso en 1946. Estoy todavía lejos de tener sesenta y siete años, y, lo que es por desgracia —para mí— ciertamente imposible de remediar, por mucho que pasen los años, jamás podré compararme intelectualmente con Einstein. Aun así, afronto la escritura de este *Diccionario de la ciencia* con un talante no totalmente ajeno al que debió de mover a aquel genio de la física: como un ajuste de cuentas conmigo mismo. Me he pasado la mayor parte de mi vida estudiando, pensando y escribiendo sobre cuestiones científicas. Primero como físico teórico, después como historiador de la ciencia; ocasionalmente también abordando problemas de filosofía de la ciencia. Es hora ya que emplee esa formación pluridisciplinar, esos años gastados o ganados —nunca se sabe— para construir, y ofrecer a aquellos que la quieran leer, mi propia visión del mundo de la ciencia.

Un *diccionario de autor* constituye un magnífico instrumento para semejante propósito. No se tiene que responder de la elección de términos realizada; se sabe que ésta no es sino una excusa que sirve a los propósitos —o a los gustos— de quien lo escribe. En el caso de la ciencia, el no tener que asumir ninguna pretensión de generalidad, de globalidad, es particularmente satisfactorio, ya que el cuerpo de ideas, conocimientos, problemas y técnicas que acoge el universo científico contemporáneo es abrumador; de ahí ese fenómeno, que no hace sino crecer constantemente, llamado «especialización».

Ahora bien, ¿cómo seleccionar, cómo escoger entre semejante variedad? A esta idiosincrásica selección de voces mía la anima un triple propósito. El primero es el de acercar a mis lectores aquellos conceptos, ideas, teorías, resultados o problemas científicos que considero fundamentales —*absolutamente* fundamentales, me atrevería a decir—, o que por algún motivo pueden ser vinculados a cuestiones de especial relevancia. No creo que sea necesario insistir en que, de todas maneras, será fácil encontrar ausencias completamente injustificadas para muchos. Más necesario es advertir que los lectores no deben esperar de cada entrada netamente científica un «estado de la cuestión» sobre el tema que se aborda en ella. Esto es, también, imposible de conseguir. Lo que he buscado es, más que los últimos resultados, hacer hincapié en algún punto que considero particularmente atractivo e interesante.

En segundo lugar, al mismo tiempo que explico esos temas y cuestiones, he intentado transmitir algunas de las principales características de la ciencia como empresa cognitiva. Me he esforzado por poner en evidencia un mundo —el científico— en el que la complejidad coexiste, necesariamente, con ideas y teorías a las que podemos llamar, aun dentro de su dificultad, «simples», hermosas (subjektivamente, al menos) y fundamentales. Habría fracasado en una parte esencial de mi empeño si no hubiese logrado mostrar la permanente inestabilidad y provisionalidad, aun dentro de su firmeza y aspiraciones a permanencia, de las construcciones conceptuales producidas por los científicos. Nos esforzamos por comprender el mundo, pero no sabemos muy bien si los conceptos y teorías que creamos con tal fin representan «la Realidad», o si podríamos haber creado otros que cumplieren funciones parecidas. Existe, en otras palabras, un elemento de contingencia, de convencionalismo, inevitable en la ciencia. Pero no importa, el científico cree (a veces demasiado firmemente) en sus constructos, y si esas creencias a la postre constituyen una ilusión, nunca habrá sido una «vana ilusión». El único requisito es que sus aportaciones

hayan sido fecundas, abriendo nuevos problemas y «explicando» algunos fenómenos que identificamos en la naturaleza. «Explicar» es un verbo delicado, comprometedor, pero en ciencia quiere decir, simplemente, ser capaz de predecir el comportamiento futuro de «algo» que tiene que ver con la naturaleza. Sin esta capacidad de predicción, que también va asociada a la comprensión del pasado, no existe ciencia. A esto reduciría yo la receta de qué es la ciencia, una receta que con tanto empeño —y no demasiado éxito (nos han enseñado más qué no es la ciencia que qué es)— han perseguido generaciones de filósofos de la ciencia durante el siglo XX.

El último propósito que ha guiado mis esfuerzos ha sido el de mostrar lo más nítidamente posible, probablemente con cierta crueldad en ocasiones, el mundo del que surgen los resultados científicos. Un mundo este plural, previsible a veces y desconcertante otras, en el que afloran tensiones e intereses de todo tipo (políticos, filosóficos, económicos, religiosos, ideológicos, individuales o gremiales).

«Quien sólo sabe algo de música, no sabe nada de ella», dijo en cierta ocasión el compositor Hans Eisler. Y Lothar Baier trasladó hace poco esa frase al campo de la literatura: «Quien sólo sabe algo de literatura, no sabe nada de ella». No estoy seguro de que la misma idea se pueda traspasar con parecida facilidad al universo de los conocimientos científicos (sé de casos de espléndidos científicos que sabían —o les interesaba— poco fuera de su especialidad), pero soy de la opinión de que por mucho que hayan existido o existan científicos de este tipo, que, por otra parte, han producido trabajos de gran, acaso incluso extraordinaria, calidad, se trata de intelectos mutilados, deformes en lo que a su humanidad se refiere. Y yo nunca he podido —o deseado— admirar esa clase de deformidad. Y mucho menos recomendarla.

He pasado algunas de las mejores horas de mi vida cuando he llegado a comprender teorías científicas —especialmente físicas, como la relatividad general o la mecánica analítica— que para mí tienen una belleza y un atractivo especiales. Creo que puedo apreciar bastante bien la pasión que se encuentra detrás de la creación original y recreación continuada de cualquier formulación científica. No es, en consecuencia, mi intención, en modo alguno, transmitir a los lectores de este diccionario apreciaciones que los lleven a minusvalorar los logros a los que ha llegado y continúa llegando la ciencia, ni de ésta como actividad. Pero, lo confieso, no acepto la idea de que la ciencia está por encima de nosotros mismos, que es un valor supremo, ante el que debemos abandonar cualquier otro tipo de consideración o justificación. Así, siempre que he podido, he buscado, para incluir en este diccionario, la dimensión moral y humana que surge en, o está asociada a, la ciencia.

Entre muchos científicos del siglo XX y del actual (y sobre todo entre los físicos), ha proliferado una actitud, o filosofía, según la cual uno de los principales atractivos de la ciencia es el de que constituye una huida de la vida diaria con su dolorosa crudeza y desoladora vaciedad; una huida de un mundo que nos impone constantemente la penosa obligación de elecciones morales y asunción de responsabilidades; una huida hacia un mundo donde reina lo objetivo; una evasión, en definitiva, hacia la «trascendencia». En un discurso que pronunció en 1918, Einstein resumió, breve y claramente, la esencia de esta filosofía trascendente: «En principio, creo, junto con Schopenhauer, que una de las más fuertes motivaciones de los hombres para entregarse al arte y a la ciencia es el ansia de huir de la vida de cada día, con su dolorosa crudeza y su horrible monotonía; el deseo de escapar de las cadenas con que nos atan nuestros, siempre cambiantes, deseos. Una naturaleza de temple fino anhela huir de la vida personal para refugiarse en el mundo de la percepción objetiva y el pensamiento».

Durante la segunda guerra mundial muchos científicos no tuvieron más remedio que involucrarse en la vida, que mostraba en aquellos momentos algunos de sus aspectos más dramáticos. Y en general se involucraron de buen grado, aunque fueron diversas las maneras como conceptualizaron su participación. En Los Álamos, en pleno desarrollo del Proyecto Manhattan, el matemático John von Neumann aconsejó a Richard Feynman, acaso el mejor físico de la segunda mitad del siglo XX, que «no tenía por qué sentirse responsable del mundo en el que vivía». Y el entonces joven físico siguió aquel consejo, desarrollando, como explicó en su autobiografía, «un poderoso sentido de irresponsabilidad social, que hizo de mí una persona muy feliz desde entonces». Fueron, sobre todo, los físicos que crearon y desarrollaron la mecánica cuántica los que vivieron en la idea de que existen, o que es posible y deseable establecer, fronteras definidas entre las esferas política, moral y científica.

Admiro profundamente a Einstein, Feynman y von Neumann, especialmente los dos primeros constituyen lo que para mí es la esencia de la originalidad y profundidad científica. Pero este diccionario no está modelado según la idea del compromiso moral que, al menos en ciertas ocasiones, ellos defendieron. Sé muy bien que es imposible encontrar en todos los conceptos, teorías y, en general, esfuerzos científicos una cuestión humana o moral, el calor del sentimiento que nace de la vida tal y como la desarrollan, todos los días, la mayor parte de los seres humanos que pueblan o han poblado nuestro planeta. No es posible llegar a comprender lo que es realmente la ciencia si se ignora su dimensión de esfuerzo puramente intelectual, esfuerzo que a veces convierte al científico en algo así como un gran componedor de rompecabezas, animado, cierto es, por la pretensión de ser capaz de describir, o predecir, cuanto más fenómenos naturales mejor. Y sería innoble por mi parte pretender hurtar a mis lectores este aspecto de la investigación científica. Pero tampoco deseo escamotearles otras dimensiones de la ciencia, que tienen que ver con la condición humana, enriquecida, eso sí, por una generosa y racional —científica— comprensión de todo aquello que aunque no sea humano, forma parte de la naturaleza que nos rodea. Quiero así utilizar también este diccionario para encontrar, entre la ciencia, el calor de la preocupación por la vida. No hay ciencia auténtica sin pasión, es verdad; pasión por el conocimiento, por la explicación racional, por la comprensión, pero yo deseo añadir en este, también apasionado, diccionario la compasión por la vida.

Comparto la opinión que expresó Salvador Luria, uno de los protagonistas del desarrollo de la biología molecular durante los años sesenta y setenta (obtuvo el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1969 por sus contribuciones a los mecanismos de replicación y la estructura genética de los virus), cuando dijo: «Pese a mi compromiso con la ciencia como disciplina intelectual, nunca he internalizado la idea, bastante común entre los científicos, de que la ciencia es una especie de sacerdocio sagrado ante el cual deben ceder todos los demás intereses y consideraciones».

Debemos, por tanto, aproximarnos a la ciencia desde una perspectiva plural, respetuosa con su contenido, pero también con el universo, social y natural, del que surge. Y hago hincapié en el término que he empleado: *debemos*. Vivimos en un mundo profundamente impregnado por la ciencia y la tecnología. Prácticamente nadie, salvo que se encuentre en una situación de subdesarrollo y desamparo casi absolutos, puede evitar relacionarse con —si no *depende* de— el universo del conocimiento científico y de sus dimensiones tecnológicas. Cuando miro hacia atrás, a, por ejemplo, la época, apenas hace tres siglos, en que vivió Isaac Newton, y me doy cuenta del abismo que, en lo que a la materialidad de la vida diaria se refiere, nos separa de entonces, a duras penas puedo

reprimir una extraña sensación de desazón y vértigo. La ciencia es, no cabe duda, uno de los principales, si no el mayor, responsable de ese abismo. Y ahora nos encontramos en un momento en el que todo indica que se producirán avances fundamentales cuyas consecuencias pueden afectar profundamente a nuestras vidas. El desarrollo de las ciencias biomédicas y de las telecomunicaciones sustancia semejante sospecha. Si no conocemos en qué direcciones se dirigen los avances que prevemos, no será posible aspirar a controlarlos, y si no lo hacemos nuestro futuro será, aunque con seguridad materialmente mejor, cultural y socialmente una completa incógnita. Claro que, de todas maneras, tarde o temprano, de manera inadvertida y continua, o a grandes saltos, nuestras culturas, los entornos que nos acogen, las costumbres y valores que nos apoyan y condicionan, cambiarán de forma drástica. Hace, aproximadamente, cien mil años *homo sapiens*, el humano moderno, comenzaba, inseguro, no mucho más que uno entre otros animales, su camino, un camino que se había iniciado hacía alrededor de dos millones y medio de años antes, cuando apareció el género de los *homos* (*habilis*, *erectus*, *sapiens*). En sólo cien mil años, tras más de dos millones de años de lenta —y seguramente imprevisible— evolución biológica, surgieron los Aristóteles, Newton, Darwin, Einstein, y con ellos, haciéndolos posible, no distinguiéndonos de ellos tan profundamente, todos los demás, el resto de los humanos. Los dinosaurios vivieron 120 millones de años, a nuestro planeta le restan todavía algunos millones de años de vida. Somos, pues, recién llegados a este planeta. ¿Qué nos deparará el futuro?

Como señalaba al principio, este diccionario es —sin ser «algo así como una necrología»— fruto de una vida. En consecuencia, debe mucho a todos aquellos que han intervenido, directa o indirectamente, amigablemente o no, en configurarla. Naturalmente, no es posible mencionarlos a todos, aunque conste que me esfuerzo por retenerlos en mi, mala, memoria. Es un placer, sin embargo, agradecer a mi editor y amigo, Toni Munné, la simpatía y confianza (¡y paciencia!) que me ha brindado. Estoy seguro de que una persona tan humana (acaso demasiado para los tiempos que corren) como él, recibirá con satisfacción un diccionario de la ciencia que, sin embargo, aspira a no estar al margen del mundo en que vivimos. A mi mujer, Ana, le agradezco sus constantes esfuerzos por enseñarme a contemplar todo aquello que nos rodea con mayor interés y compasión. Si dedico este libro a mis hijas, Mireya y Amaya, es con la esperanza de que las ayude a ser, ellas mismas, más humanas y compasivas, sin perder por ello el aprecio que se merece ese fruto de nuestra curiosidad, inteligencia y perseverancia que llamamos ciencia.

Madrid, 9 de junio de 1996

A

La «A» es una letra dulce, que sabe a infancia. Y he aquí que en esta idiosincrásica selección mía, la primera voz es, caprichos del alfabeto, una de las que exige inicialmente de usted, querido lector, un poco más de atención, un cierto esfuerzo de conceptualización. Acaso la que más exige de usted en estos sentidos. Lo lamento. O acaso no. A veces es mejor ir cuesta abajo que cuesta arriba. Y además, acostúmbrese usted, a pesar de que yo no le vaya a ayudar demasiado en este aspecto, a la idea de que la ciencia es, en primera instancia, ideas, conceptos, teorías, comparación con datos experimentales, un esfuerzo continuo por, recurriendo a la abstracción, explicar la naturaleza. Sin esto, no hay ciencia. Y sin ella, tampoco existiría, naturalmente, este diccionario.

ADN. El universo de los seres vivos es el resultado de prácticamente infinitas interacciones entre todo tipo de compuestos; como células y moléculas, que no son, en última instancia, sino reacciones químicas entre elementos. Para poner orden en este aparente caos, es necesario aislar piezas de esa realidad. Pues bien, ninguna «pieza» ha sido hasta el momento tan fructífera como el ácido desoxirribonucleico, o ADN, la macromolécula que contiene, en forma químicamente codificada, toda la información necesaria para construir, controlar y mantener un organismo vivo. Aunque el ADN fue identificado como sustancia transmisora de la herencia en 1944 por Oswald Avery (1877-1955), Colin MacLeod (1909-1972) y Maclyn McCarthy (1911), su estructura geométrica fue descubierta en 1953 por James Watson (1928) y Francis Crick (1916-2004). Constituye la auténtica piedra angular de la biología contemporánea, cuyas implicaciones están abriendo desde hace tiempo todo tipo de posibilidades en la comprensión de los organismos y en el tratamiento de enfermedades, al igual que, indirectamente, de comportamientos y acuerdos sociales, como explico en otros lugares de este libro.

El ADN está constituido por dos cadenas, cada una de las cuales formada por cuatro compuestos químicos, combinaciones de carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y fósforo, denominados adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T). Los cuatro tienen un comportamiento de álcalis o «bases» (lo contrario de ácidos). La estructura de la cadena es muy sencilla: lo que se puede considerar como su «esqueleto» está formado por una alternancia regular de ácido fosfórico (P) y un azúcar, la desoxirribosa (D); esto es:



Sobre este esqueleto, se superponen las cuatro bases mencionadas antes, pero de forma que a cada azúcar D va unida una base, A, C, G o T, formando una secuencia determinada (al conjunto de P, D y una base se le llama «nucleótido»); el ácido fosfórico es algo así como un eslabón de esta singular cadena, que tiene forma espiral de hélice, la famosa «doble hélice».

El ADN surge cuando se unen dos cadenas de este tipo, mediante el procedimiento de establecer uniones entre parejas de bases, pero sólo de manera que la T de una cadena se asocie a la A de la otra y la G a la C. Cualquier otro emparejamiento está prohibido. Con semejante estructura se puede comprender fácilmente el proceso de la duplicación del ADN en cada célula: en un momento dado de la vida de ésta, la doble hélice se escinde en dos segmentos helicoidales, que al captar en el medio en el que se encuentran el azúcar, el fosfato y la base reconstruyen sus complementos, de manera, además, perfectamente fiel, de generación a generación (salvo mutaciones), debido a la ley del emparejamiento de las

bases.

Con la excepción de las bacterias, el ADN aparece en forma de filamentos muy largos en los cromosomas, las unidades que se encuentran en los núcleos de todas las células de un individuo y gracias a las cuales los caracteres biológicos se transmiten de padres a hijos (el número de cromosomas varía entre uno, en las bacterias, y docenas o incluso cientos en los organismos superiores; en los seres humanos hay 23 pares). Si pudiésemos extender el ADN de una célula humana, formaríamos un hilo de unos tres metros de longitud. Y si se tiene en cuenta el número de células que poseemos, todo el ADN de una persona formaría un hilo de una longitud más de veinte veces la distancia que separa al Sol de la Tierra. El «genoma» (conjunto de instrucciones —o de genes— que permiten construir un organismo) humano se encuentra en esos gigantescos hilos, y consta de unos tres mil millones de pares de bases. En septiembre de 1988 se estableció formalmente el denominado Proyecto Genoma Humano, liderado por Estados Unidos, para determinar la estructura de nuestro genoma. El resultado final se anunció el 11 de febrero de 2001: tenemos unos 30 000 genes, poco más del doble de una mosca y menos que el arroz, según se comprobó más tarde. Ahora sabemos que desde el punto de vista genético no nos diferenciamos demasiado de los chimpances, con los que compartimos el 97,7 por ciento del genoma, ni de los orangutanes (96,4 por ciento), resultados que, obviamente, reivindican a Darwin. Las diferencias cuantitativas son pequeñas, pero no así siempre las cualitativas.

Cuando se habla del ADN es inevitable hacerlo también del ARN (acrónimo de ácido ribonucleico). Se trata de una molécula de estructura similar al ADN, salvo que normalmente está formada por una sola cadena, tiene ribosa en lugar de desoxirribosa y uracilo en vez de timina. La función principal del ARN es transmitir la información genética que dirige la síntesis de las proteínas. El «dogma central» (ésta es la expresión que se suele utilizar) de la genética molecular moderna establece que la información genética se transfiere primero de ADN a ADN, durante la transmisión del genotipo (constitución genética contenida en los cromosomas de un individuo) desde una generación a la siguiente (replicación), y después de ADN a ARN (transcripción). Existen, por cierto, buenas razones para atribuir el origen del sistema genético al ARN y no al ADN, pese a que éste es el principal depositario de la información hereditaria (los ácidos ribonucleicos, por ejemplo, se sintetizan con mayor facilidad que los desoxirribonucleótidos del ADN).

El papel del ARN se observa con especial claridad en los organismos eucariotas, esto es, en aquellos dotados de células que poseen un núcleo —*karyon* en griego— claramente definido (el prefijo *eu*, de origen griego, significa «bueno»), rodeado por una membrana, dentro del cual se encuentran los cromosomas con su ADN correspondiente (las células que carecen de núcleo se denominan procariotas; la mayoría de los organismos —la excepción son las bacterias— tienen células eucariotas). Como los genes cromosómicos se ubican en el núcleo, mientras que la síntesis proteica tiene lugar en el citoplasma celular, el ADN no puede servir, de manera directa, como molde para la síntesis de las proteínas. El ARN es, como se ha señalado, quien cumple esa función, «estimulado» por una de las cadenas del ADN; su estructura es tal que el ARN puede emparejarse con otra molécula de ARN, o captar cortos fragmentos de nucleótidos unidos a aminoácidos, para producir así todas las proteínas que dan a los organismos sus formas y configuraciones.

Por consiguiente, en condiciones normales, se puede decir que el flujo de información primordial de la vida se orienta desde el ADN hacia el ARN, y de éste a las proteínas. Pero esto es, como digo, únicamente la pauta general. Están, por ejemplo, los

retrovirus, que invierten el flujo informativo desde el ARN hacia el ADN. Incluso en una presentación tan simplificada como la presente, cualquiera se puede dar cuenta de la extraordinaria complejidad que caracteriza al mundo de la biología molecular.

[Véanse también GEN y PROTEÍNA].

AGUA. Sustancia formada por la combinación de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno: H_2O , la fórmula química más universalmente conocida, incluso para muchos que lo ignoran todo de la química, la ciencia que se ocupa de las propiedades de los elementos y de las reacciones que tienen lugar entre éstos.

Hablar del agua es tanto como hablar de nosotros mismos; al fin y al cabo, el 77,2 por ciento de nuestro cuerpo está formado de agua, que cubre, además, tres cuartas partes de nuestro planeta. Pero de lo que yo quiero hablar en esta entrada, y el motivo por el que la he seleccionado, es del papel, absolutamente esencial, que desempeña el agua en la vida.

A veces se tiende a pensar en que empeñados en buscar prerequisites para la vida, el primero debería ser el oxígeno. Sin embargo, esto no es verdad. Nosotros, los humanos, no podemos vivir sin oxígeno, pero la vida se las puede arreglar bastante bien sin él, como muestran florecientes comunidades de anaerobios, de organismos —bacterias— que viven sin oxígeno. Como la denominada *Ectothiorhodospira*, una especie muy importante en muchos lagos sódicos (lagos con agua alcalina, que se han saturado de carbonato sódico y que contienen gran cantidad de cloruro sódico) porque consume el sulfuro de hidrógeno, utilizándolo para un tipo de fotosíntesis (proceso mediante el cual las plantas verdes atrapan energía lumínica que utilizan para poner en marcha una serie de reacciones químicas que conducen a la formación de hidratos de carbono), que no lleva a la producción de oxígeno y con el que aumenta la productividad biológica del lago.

Tampoco parece que la luz sea completamente indispensable para la vida, aunque sí para la vida a la que estamos acostumbrados: las plantas no pueden existir sin luz, y los animales —los humanos entre ellos— sin ellas. No obstante, algunas bacterias anaerobias que producen metano, sólo necesitan hidrógeno gaseoso y dióxido de carbono para producir materia orgánica. En realidad, en la Tierra estas bacterias dependen indirectamente de la luz, ya que el hidrógeno que utilizan procede de materia orgánica que ha sido sintetizada por otros organismos que necesitan luz. Pero podrían ser independientes de ese hidrógeno, disponiendo, por ejemplo, del hidrógeno primordial formado en los primeros instantes del universo. Así que, estrictamente, la luz no es esencial para ese tipo de vida.

De lo que no parece existir escapatoria si se quiere vivir —en cualquiera de los sentidos que sugiere la experiencia de nuestro planeta— es del agua. Es cierto que la vida puede abrirse camino en medios áridos, sin agua, pero los seres vivos deben mantener, de alguna manera, húmedos sus interiores. Algunos cuerpos, como semillas, pueden sobrevivir durante mucho tiempo en condiciones de sequía extrema, pero lo hacen en estado latente, «reviviendo» cuando vuelven a disponer de agua.

Se podría pensar que la importancia del agua procede de que facilita, debido a su liquidez y limitada densidad, el movimiento de las moléculas de nuestro cuerpo. Por supuesto, esta característica es conveniente para la vida, pero hay más: son las propiedades químicas del agua, la capacidad de escindirse en dos elementos, hidrógeno y oxígeno, que se relacionan benéficamente con nuestras moléculas (acabamos de ver que constituyen dos de los cinco integrantes últimos del ADN), lo que la hace insustituible; al menos a nadie se le ha ocurrido, o ha observado, cómo otro líquido podría tomar las funciones vitales del agua.

Así que ya saben, el agua no sólo alivia nuestra sed, o nos mantiene limpios, sino lo

que es mucho más importante: permite que exista la vida. Precisamente por ello debemos ser muy cuidadosos con el agua, y no malgastarla. Evitar, por ejemplo, derroches estúpidos —o, mejor, inmorales— como el que con frecuencia se produce utilizando, para mantener campos de golf, esas reservas «estratégicas» de agua acumulada a lo largo de cientos o miles de años que son los acuíferos subterráneos.

AGUJERO NEGRO. Suele ser una constante en los miembros de nuestra especie, profundamente curiosa, el que les atraiga todo aquello que suena a misterioso. Los agujeros negros (el término fue acuñado por el físico estadounidense John Wheeler [1911] en 1967), objetos cuya existencia predice la teoría general de la relatividad, pertenecen a esa familia, y así se han convertido en sujeto de atracción e interés público. (No está de más recordar que en el siglo XVIII, cuando se aceptaba la teoría de Newton según la cual la luz estaba formada por partículas, John Michell [1724-1793] y Pierre Simon Laplace [1749-1827] ya especularon con la posible existencia de «estrellas oscuras», estrellas de pequeño radio y gran masa que ejercerían la suficiente atracción gravitacional sobre los corpúsculos luminosos para no dejarlos escapar del entorno estelar. Nada en las leyes de la física del Siglo de las Luces impedía la existencia de estrellas de este tipo. Si se abandonó la idea fue debido a que la teoría ondulatoria de la luz terminó desbancando a la corpuscular, y no estaba nada claro cómo una descripción ondulatoria encajaba con las leyes de la gravedad newtonianas).

Expresado sucintamente, un agujero negro es un objeto estelar creado por procesos como la implosión de una estrella, en el que todo aquello con masa y/o energía puede caer, pero del que nada en principio puede salir, ni siquiera la luz (que no tiene masa, pero sí energía), que queda también atrapada en su interior, destinada acaso a perderse en la ruptura del espacio y el tiempo (singularidad espacio-temporal) que esconde en su seno el agujero. Y si la luz no puede salir, tampoco podremos verlo, solamente sentir los efectos, gravitacionales, producidos por su enorme masa.

No toda estrella está destinada, cuando su combustible nuclear —las reacciones termonucleares que se producen en su interior [véase NUCLEOSÍNTESIS]— se agota, a convertirse en un agujero negro. Es preciso que su masa supere un cierto valor, que depende del tamaño de la estrella. En caso contrario, termina sus días como una fría estrella de neutrones, objetos de aproximadamente la misma masa que el Sol pero de sólo cincuenta a mil kilómetros de circunferencia, formados por neutrones aprisionados por la fuerza de la gravedad, algo así como núcleos atómicos gigantes, pero sin protones y con la interacción gravitacional desempeñando el papel de la interacción fuerte, que es la que reina en el reducido ámbito de los núcleos atómicos (algunas estrellas de neutrones, que giran muy rápidamente emitiendo radiación de gran regularidad, forman lo que se denomina púlsares).

Teóricamente, sin embargo, pueden existir agujeros de todos los tamaños y de todas las masas (combinando ambos de manera apropiada). Agujeros negros microscópicos que tienen el tamaño de una partícula elemental, agujeros negros de diez masas solares (la masa del Sol) y de algunos kilómetros de radio, o agujeros negros gigantes de varios miles de millones de masas solares y tan grandes como el sistema solar. De hecho, hay muchos indicios de que pueden existir agujeros negros gigantes en el núcleo de algunas galaxias, la nuestra —la Vía Láctea— entre ellas. En cuanto a agujeros negros de tamaño «normal», parece demostrada su existencia: se acepta que Cygnus X-1, un objeto situado en nuestra galaxia, y que forma parte de un sistema binario (su compañera —HDE 226868— es una estrella brillante ópticamente y oscura en rayos X), es un agujero negro. Si ha sido posible detectarlo es porque Cygnus X-1 atrae gases de HDE 226868, que se precipitan hacia él; en

su camino estos gases son acelerados emitiendo rayos X, que es posible observar mediante telescopios adecuados. Los cálculos realizados indican que el agujero negro situado en el centro de Cygnus X-1 tiene una masa probablemente alrededor de dieciséis soles.

En cuanto a los miniagujeros negros, su posible existencia adquiere sentido dentro de formulaciones realizadas en la década de los años setenta por, especialmente, Stephen Hawking, quien, como volveré a mencionar en la entrada que dedico a este conocido físico, ha intentado combinar algunos elementos de la teoría cuántica con la relatividad general, llegando a la conclusión de que, después de todo, los agujeros negros pueden radiar energía (esto es, no son tan negros). Este efecto sólo es observable en principio, dada la edad que supuestamente tiene el universo, para agujeros negros microscópicos (o primordiales) que se formasen poco después del *big bang*, en los primeros instantes de vida del universo.

No sabemos, en cualquier caso, cuántos agujeros negros puede contener el universo. Por el momento, constituyen un concepto esencialmente teórico, apoyado por cada vez más observaciones, extraordinariamente atractivo y sugerente. Un concepto que pone en tela de juicio la continuidad de aquello que pensábamos era más continuo y permanente, el espacio y el tiempo, esto es, aquello que hace posible nuestra propia existencia. No es sorprendente que ante características semejantes haya quien piense que acaso los agujeros negros son puertas de acceso a otros universos, o que tal vez nuestro universo no sea sino un gran agujero negro, del que, salvo con la ayuda de la mecánica cuántica (todavía no incorporada en la estructura de la cosmología relativista teórica), no podemos escapar. [Véase RELATIVIDAD y HAWKING].

ALZHEIMER (Alois). 1864-1915. Neuropatólogo alemán que describió, en 1906, la enfermedad que lleva su nombre.

Antes de continuar con esta dolorosa entrada, me adelanto a contestar a una pregunta que podrían plantearme aquellos que echen un vistazo al índice de este diccionario. Enfermedades existen muchas, demasiadas, y también nombres propios asociadas a ellas; ¿por qué, entre tantas y tantos, he ido a fijarme precisamente en la asociada a Alzheimer? Les contesto: en primer lugar, porque este apellido —que ya no nos recuerda a un ser humano, sino a una enfermedad— suena a desamparo, a soledad, a pérdida de identidad, y, siempre que sea posible (no son muchas las oportunidades), quiero que mi diccionario se aproxime a los desamparados, aunque sólo sea enseñando a todos aquellos que todavía poseen el entendimiento necesario para «comprender» y para mantener esa comprensión en el recuerdo, en la memoria (una capacidad de la que carecen los enfermos de Alzheimer), algo de la ciencia que existe tras este mal. Tal vez así, sufriendolo en nuestro entendimiento, seamos más generosos con los que lo padecen.

Pero hay más: el mal de Alzheimer ocupa un lugar peculiar en la historia de la medicina en general, y de las ciencias neurológicas en particular. Una escueta aproximación a la vida de Alois Alzheimer nos muestra un momento crucial de historia de las ciencias biomédicas.

Hijo de un notario de origen francés, Alois Alzheimer nació en Marktbreit del Main. Estudió en las escuelas de medicina de las universidades de Berlín, Wurzburg y Tubinga entre 1882 y 1887. Una vez finalizados sus estudios, encontró un trabajo en el asilo municipal para enfermos mentales de Frankfurt del Main, en donde también trabajó el conocido histólogo Franz Nissl (1860-1918), discípulo de Alzheimer. Por entonces, Camino Golgi (1843-1926) y Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) ya habían iniciado sus pioneras investigaciones sobre las células de un cerebro normal. Nissl desarrolló procedimientos para identificar tejidos celulares y se planteó la posibilidad de si esas

técnicas le podrían permitir encontrar los correlatos anatómicos de las enfermedades mentales en los cerebros de sus pacientes. A ese programa de investigación se sumó Alzheimer.

No es posible apreciar la naturaleza de las investigaciones de Alzheimer y Nissl sin tomar también en consideración a Emil Kraepelin (1856-1926), a quien se ha denominado «el Linneo de la psiquiatría», uno de los fundadores de la psiquiatría basada en la biología. Cuando Kraepelin comenzó sus investigaciones, muchos psiquiatras consideraban que las demencias que aparecían a edades intermedias eran desórdenes psiquiátricos de la mente, entendiendo por esta expresión enfermedades no orgánicas del cerebro. Sólo mucho después emergió la neurología como una ciencia independiente que asumía responsabilidades en este campo. Importantes en este sentido fueron también los trabajos neuroanatómicos de Oskar Vogt (1870-1959) y Korbinian Brodmann (1868-1918), que lograron demostrar que regiones y capas diferentes de la corteza cerebral eran anatómicamente distintas entre sí. Esa diferencia implicaba la especificidad de funciones, lo que sugería la idea de que anomalías estructurales o bioquímicas de regiones determinadas del cerebro pudiesen producir diferentes manifestaciones psicopatológicas; se hacía así patente que la investigación del cerebro era importante para comprender las causas de las psicosis.

En los mundos de la neurología, psiquiatría y neuropatología, Alzheimer es recordado sobre todo por sus extraordinarias contribuciones a la descripción de la patología cerebral en la arteriosclerosis y senilidad. Cuando tenía poco más de cuarenta años publicó trabajos, que se convirtieron en clásicos, en los que describía la arteriosclerosis del cerebro y algunos procesos seniles. Mostrando una gran perspicacia, supuso que la arteriosclerosis, producida por la acumulación de sustancias en las arterias del cerebro, causaba cambios en el cerebro que no eran del mismo tipo que los procesos seniles o de envejecimiento que se observaban en los cerebros de los ancianos.

Es curioso que su apellido se haya convertido en universalmente familiar en el último cuarto de nuestro siglo, como consecuencia de una breve comunicación oral que presentó al Congreso de Psiquiatras de Alemania del Sudoeste, celebrado en 1906, en la que describía un caso clínico, que, además, había captado su atención por casualidad (publicó el contenido de su investigación en una nota de tres páginas, que apareció en 1907).

La enferma que describió Alzheimer era una mujer de cincuenta y un años que había experimentado un implacable, y severo, debilitamiento de memoria (amnesia). Sus habilidades lingüísticas también se habían deteriorado. Hablaba sin entonación. Estos síntomas señalan a lo que en la actualidad llamamos *afasia*, o incapacidad para expresarse y comprender, pero aquel caso era más complicado ya que la paciente no recordaba la utilidad de objetos concretos (los neurólogos denominan a la incapacidad de ejercer una acción que requiere algún tipo de habilidad aprendida previamente, en ausencia de problemas motores o de alguna anomalía sensora, *apraxia*, y a la incapacidad de reconocer o identificar un objeto familiar, *agnosia*).

La paciente falleció cuatro años y medio después de que apareciese su enfermedad. Al final la había invadido una apatía total, quedando confinada a su cama, en donde adoptaba una posición fetal. La autopsia mostró un cerebro desigualmente atrófico. (La atrofia cerebral, la disminución de la masa encefálica, es un proceso fisiológico que ocurre durante el envejecimiento: a los veinticinco años, el cerebro pesa, por término medio, 1400 gramos, mientras que a los ochenta ha disminuido en un diecisiete por ciento y no pesa más

de 1150 gramos; esta desaparición de masa es consecuencia de pérdidas neuronales no suficientemente compensadas por la multiplicación de las células gliales, que constituyen los elementos intersticiales que «empaquetan» las neuronas. En el caso del mal de Alzheimer, la atrofia es más pronunciada y desigual).

Examinando con el microscopio el cerebro de la mujer en que basó su trabajo, Alzheimer advirtió que numerosas neuronas, especialmente en las capas de la corteza superior, habían desaparecido completamente [véase NEURONA]. También observó que dispersas por todo el córtex cerebral (sustancia gris, formada por neuronas, que recubre otras «capas» del cerebro), y en grandes cantidades, especialmente en las capas superiores, aparecían zonas que eran idénticas a lo que Emil Redlich (1866-1930) había denominado en 1898 simplemente «placas» («placas seniles» se las denomina ahora, y sabemos que rodean a fragmentos de neuronas afectadas por procesos degenerativos), y que interpretó como la «tarjeta de presentación» de la demencia senil. Una de las diferencias es que en el caso estudiado por Alzheimer se trataba de una mujer no anciana. Parecía que existía algún tipo de relación entre la enfermedad de Alzheimer, la demencia senil y acaso también el más suave, pero universal, declive de las funciones mentales que se produce en el envejecimiento normal. Todavía hoy se habla, al mismo tiempo, de «enfermedad de Alzheimer» y «demencia senil».

El trastorno al que Alois Alzheimer dio nombre es, como vemos, una manifestación, distorsionada, de las distintas y múltiples habilidades, o funciones, del cerebro humano: el envejecimiento, la memoria, la, en suma, personalidad. Refleja, por consiguiente, la enorme complejidad que caracteriza a ese órgano sin el cual no seríamos lo que somos. A través de la biografía de Alzheimer asistimos a un importante desplazamiento que tuvo lugar en la ciencia contemporánea: la neuroanatomía fue invadiendo terrenos que, en nuestra ignorancia, asignábamos a la psiquiatría, entendida más como una ciencia fenomenológica que explicativa (sería lo que la termodinámica es con respecto a la física estadística).

¿Cuáles son las causas de la enfermedad de Alzheimer? En la actualidad la hipótesis, parece, más aceptada es la del origen genético. Existen evidencias (no muy numerosas) de familias en las que el mal se ha dado en varias generaciones y en las que se ha identificado una anomalía en un cromosoma del vigésimo primer par. Apunta en la misma dirección el que los mongólicos (en cuyas células los núcleos poseen tres cromosomas 21, en vez de dos) desarrollan trastornos bastante parecidos a los de la enfermedad de Alzheimer. Y adquiere mayor consistencia por el hecho de que la proteína (amiloide) que se acumula en el centro de las placas seniles la codifica parte del par de cromosomas 21. No obstante, se han estudiado recientemente familias en las que el mal de Alzheimer se reproduce, con gran probabilidad, de una generación a otra, pero en estos casos la anomalía genética identificada se localiza en el cromosoma 19.

De lo que no hay duda es de que aún no se ha descubierto un tratamiento satisfactorio para esta enfermedad (ni para las enfermedades seniles de la misma familia). Y es un problema grave: en los países desarrollados, casi el veinte por ciento de la población ha cumplido sesenta y cinco años. Dentro de ese grupo de edad, alrededor del quince por ciento de los individuos presentan alteraciones manifiestas de las capacidades cognitivas. Antes hablábamos de «chochez», ahora de «enfermedad de Alzheimer». Se calcula que uno de cada cuatro individuos de más de ochenta años padece esta dolencia.

La civilización científico-tecnológica que hemos construido dilata nuestras vidas, pero al hacerlo nos hace, inadvertida pero no por ello menos dramáticamente, susceptibles a una perturbación que se manifiesta en el debilitamiento progresivo e irreversible de

nuestras funciones intelectuales, incluyendo algo que nuestras sociedades aprecian tanto como es el pensamiento abstracto. El mal de Alzheimer nos hace, en el mejor de los casos, esclavos del pasado y náufragos en el presente (la memoria de los hechos recientes sufre alteraciones mucho más precoces que la de los sucesos del pasado).

Me doy cuenta perfectamente de que lo que estoy escribiendo no es agradable. Yo mismo no quisiera saberlo. Pero, repito, lo escribo con la esperanza de que seamos más compasivos con esos náufragos del presente que son los enfermos de Alzheimer. Ellos han perdido su identidad, pero está en nuestra mano tratarlos de la manera más digna y compasiva posible.

Diferente es el caso de los que no hemos perdido —¿todavía?— la conciencia de nuestra personalidad, el recuerdo y la conceptualización de nuestras acciones. El saber que existe, y en qué consiste, la enfermedad de Alzheimer suscita temor. Desde que las leí, no he podido olvidar unas frases que escribió en su autobiografía (*La estatua interior*) François Jacob (1920), uno de los grandes biólogos de nuestro siglo: «Lo que no se puede olvidar es el miedo al miedo. El asco de volverse repulsivo. La incapacidad de evitar la impotencia. Ni tampoco el terror de ser dominado como un niño, de ser manipulado. El temor de convertirse en un ser distinto al de ahora, de pensar de otra manera o incluso de dejar de pensar. Y luego la pesadilla de tener que aguantar, de ser manejado sin poder reaccionar, ni explicarse, ni siquiera preguntar. Resumiendo, el espectro del vegetal».

Es, efectivamente, terrible tener conciencia del miedo al miedo, de convertirse en un ser distinto, profundamente incapaz. Y aquí esa característica tan indisolublemente asociada a la ciencia como es la predicción, que nos hace vivir lo que todavía no ha sucedido; abre otras puertas, otros mundos, no siempre bienvenidos. Como el de la eutanasia (del griego *eu-thanatos*, muerte buena o fácil), al que dudé de asignar su propia entrada en este diccionario (Jacob continúa la cita anterior con estas palabras: «Ahí el veneno pierde su carácter desleal y se convierte en un aliado [...] Lo difícil es escoger el momento. Demasiado pronto es una estupidez. Demasiado tarde, imposible. Y quizá plantear esta alternativa equivalga ya a empezar a escurrir el bulto. En este terreno no existe el momento perfecto»). No resisto la tentación de citar también algo que ha escrito mi amigo Arturo Pérez-Reverte: «Si cuando me toque decir “Hasta luego Lucas” no consigo organizarlo a mi aire, si el mar no colabora espontáneamente en el asunto, o el Alzheimer no permite que me acuerde de dónde está el gatillo de la pistola, y por mi mala estrella termino en un hospital... háganme un favor. No es lo mismo acortar la vida que acortar la agonía, así que no me fastidien. Tampoco vengan a darme la murga con gorigoris, velitas encendidas y pazguatos arrodillados en la acera con los brazos en cruz bajo pancartas proclamando que mi vida es sagrada. Mi vida —lo dice el propietario titular— no es más sagrada que la de mi perro labrador o la de los millones de seres humanos que, como el resto de los animales y las plantas, han pasado por este mundo cochambroso a lo largo de los siglos y la historia, y seguirán pasando. A ver quién puñetas se han creído que somos. Por eso, el médico que, con mi consentimiento o el de los míos, decida aliviarme el trayecto ahorrándome sufrimiento inútil, nunca será un asesino, sino un amigo. Mi último amigo. Que otros hagan lo que quieran con sus vidas, pero a mi permítanme no perder la compostura. Déjenme morir tranquilo»).

Si no he incluido esta dolorosa —pero compasiva también— palabra, es porque su dominio no es estrictamente científico. Involucra valores y sentimientos, historias y opciones individuales y familiares; distinciones entre biología y biografía. La ciencia puede ayudar, pero sólo hasta cierto punto. Ofreciendo, por ejemplo, datos como los que

reproducía un artículo publicado por la revista médica *Lancet* en 1991: en todo momento existen entre cinco mil y diez mil estadounidenses que sobreviven en estado vegetativo. El filósofo y defensor de la eutanasia (voluntaria e involuntaria) Peter Singer, escribía en uno de sus libros, que «una vida más larga no es un bien tan supremo que pese más que cualquier otra consideración. (Si así fuera, habría formas mucho más eficaces de salvar vidas, tales como prohibir fumar, o reducir el límite de velocidad a 40 kilómetros por hora, que prohibir la eutanasia voluntaria)». No podría decir, hoy, si estoy en favor o en contra de la eutanasia, aunque me inclino en favor suyo, pero sí que es fiel testimonio del cinismo que caracteriza a nuestra civilización el que soporte paradojas como las que Singer muestra en este, aparentemente insignificante, ejemplo. La incidencia del cáncer, del que también me ocuparé en este diccionario, es otro ejemplo en un sentido parecido.

AMINOÁCIDO. Véase PROTEÍNA.

ANTIBIÓTICO. Medicamento que mata o impide el crecimiento de bacterias y hongos. El primer antibiótico introducido fue la penicilina, descubierta en 1941 por el bacteriólogo escocés Alexander Fleming (1881-1955).

En la actualidad estamos perfectamente familiarizados con la idea de que existen agentes vivos microscópicos que, después de un período de incubación, producen desórdenes orgánicos, desproporcionados con sus dimensiones, que se pueden transmitir a otros seres. Pero esta visión microbiana de las enfermedades infecciosas tiene poco más de un siglo. Surgió de las ideas y aportaciones de científicos como Jacob Henle (1809-1885), Robert Koch (1843-1910) y Louis Pasteur (1822-1895). Cuando, en 1821, John Keats murió de tuberculosis, ésta no era considerada una enfermedad contagiosa, ni siquiera una enfermedad propiamente dicha, sino una condición del cuerpo o del alma que aquejaba a espíritus «especialmente sensibles», como poetas, músicos, y otros tipos de artistas. Hubo que esperar hasta el 24 de marzo de 1882, cuando Koch anunció ante la Sociedad de Fisiología de Berlín que había descubierto el bacilo causante de la tuberculosis.

Mycobacterium tuberculosis, como llamó Koch a este germen, se reproduce con lentitud (dobla su número cada 18 o 20 horas), y es un parásito de los mamíferos que necesita oxígeno, por lo que prefiere los tejidos, como los de los pulmones, que son ricos en este elemento.

A pesar de conocerse el germen de la tuberculosis, durante mucho tiempo no se disponía de medios químicos para combatirlo. A lo largo del último cuarto del siglo XIX se descubrió empíricamente que la enfermedad podía ser superada en ciertos entornos, plenos de aire y sol, suplementados por una buena alimentación. Este hecho fue utilizado para lanzar una campaña publicitaria sin precedentes en la que —especialmente en Estados Unidos— se hablaba de mantener las ventanas abiertas, estimular el cuidado por la salud, y también de que la enfermedad era producto de malos hábitos, y que el no subsanarlos era irresponsable e inmoral (un siglo más tarde, algunos utilizarían una retórica no muy diferente al referirse al sida, el síndrome de inmunodeficiencia adquirida).

En 1943 se descubrió el primer medicamento realmente efectivo contra la tuberculosis. Se debió al bioquímico estadounidense Selman A. Waksman (1888-1973). En un cultivo de tejidos de gallina identificó estreptomycin, una sustancia que más tarde se mostró capaz de matar al bacilo de la tuberculosis (también al de la lepra). En 1967 se habían desarrollado otros once antibióticos, de los cuales únicamente dos, isoniazida y la rifamida, son realmente efectivos. Utilizando tratamientos que combinan los antibióticos más eficaces con los que lo son menos, la tuberculosis decayó de manera aparentemente imparable durante las décadas siguientes.

Y sin embargo puede que esté reviviendo. Aunque en la década de los sesenta se pensaba que estaba erradicada, en oscuros enclaves, en suburbios en los que reina la pobreza y la penuria, ha continuado manteniendo su presencia. En Estados Unidos hay veintisiete mil tuberculosos, y de éstos el cinco por ciento en formas resistentes a más de un medicamento, algunos a todas las formas conocidas de fármacos.

¿Por qué parece estar reviviendo? Las razones son complejas, pero instructivas. En primer lugar, hay que tener en cuenta que aunque sean vencidas, las bacterias de la tuberculosis continúan en estado latente en los macrófagos —grandes células blancas cruciales en la actividad inmunológica— que las han digerido previamente. En esencia, la tuberculosis es una agresión que dura toda la vida. Y la víctima de esa agresión, una bomba bacteriológica potencial.

Ahora bien, se puede pensar que no hay problema, ya que se dispone de medicamentos que la combaten eficazmente. Pero sí hay problemas. *Mycobacterium tuberculosis* puede, como todos los agregados biológicos, sufrir mutaciones, aunque son poco frecuentes: solamente uno de cada cien mil de los organismos que descienden de este bacilo pueden convertirse, por mutación, en resistentes a la acción de la isoniazida, y uno en un millón a la de la rifamida. Si se utiliza un tratamiento con isoniazida, rifamida y etambutol, la isoniazida matará a los gérmenes resistentes a la rifamida, ésta a los que pueden vencer a la isoniazida, y el etambutol a los pocos (veremos en seguida que pueden no ser tan «pocos») que resisten a ambas.

Hay, sin embargo, una dificultad, de carácter extracientífico podríamos decir. Como es bien sabido, muchos pacientes no toman todos los medicamentos que les recetan sus médicos. Imaginemos la siguiente situación (descrita por Mark Earnest y John Sbarbaro): una persona con tuberculosis. Por serlo transporta del orden de dos mil millones de bacterias tuberculosas, algunas —han aparecido espontáneamente por mutaciones— resistentes a la isoniazida y otras, a la rifamida. Supongamos que el médico le ha recetado correctamente (no siempre ocurre) los tres antibióticos que he mencionado antes. El paciente siente molestias en el estómago, y piensa: «Veamos qué ocurre si tomo únicamente la isoniazida» (es la píldora más pequeña). Como este antibiótico matará a las abundantes bacterias sensibles a la isoniazida, el paciente se sentirá mejor, y además no padecerá efectos secundarios. Pero ha ignorado a los organismos resistentes a la isoniazida, que continúan proliferando, llegando al cabo de un tiempo a hacer notar sus efectos. Decide entonces tomar la rifamida, pero para entonces puede ser tarde. Al haberse reproducido en grandes números, se habrán producido cepas resistentes también a la rifamida, que habrá perdido su poder curativo. Es obvio que esta secuencia, basada en tomar un solo medicamento a la vez, puede ir generando cepas progresivamente resistentes, hasta hacerlas acaso inmunes a todos los antibióticos.

Este escenario se debe completar además con otros elementos; como la aparición del sida, el virus que destruye el sistema inmunológico y hace a sus víctimas mucho más susceptibles de contraer infecciones: como la tuberculosis. La experiencia ha demostrado que las personas que han dado positivo a la prueba del VIH (virus de inmunodeficiencia humana), y que tenían bacilos dormidos de tuberculosis tienen un diez por ciento de probabilidad de contraer la enfermedad, que, debido a la debilidad de su sistema inmunológico, progresará rápidamente. Y para empeorar las cosas, al principio la tuberculosis estará enmascarada por el desarrollo del sida, lo que hará que sea diagnosticada más tarde, con lo cual aumentan los focos de infección potenciales.

No es preciso continuar. Sólo pretendía explicar que el mundo microscópico,

bacterial, que combaten los antibióticos es esencialmente dinámico, que las bacterias poseen la habilidad de desarrollar inmunidad como consecuencia de la aplicación de dosis repetidas o insuficientes, de manera que se necesiten cada vez antibióticos sintéticos más avanzados. Desgraciadamente, parece que en estos ámbitos de la medicina no existen soluciones definitivas. Los organismos no son objetos pasivos, a los que se vence de una vez por todas. ¡Qué le vamos a hacer!

ARISTÓTELES. 384-322 a. J. C. A más de uno le resultará extraño, cuando no completamente fuera de lugar, que este diccionario dé cobijo a un pensador de la antigüedad. ¿No es, al fin y al cabo, la ciencia un sistema que se perfecciona constantemente y cuyos resultados envejecen con suma rapidez? ¿Qué nos puede quedar, que tenga un grado de actualidad suficiente, de lo que discurrieron antepasados nuestros hace más de veinte siglos? Y, si hay realmente que incluir a alguno, ¿por qué no a Euclides (c. 295 a. J. C.) cuyo sistema matemático (los *Elementos*) desafía y desafiará el paso del tiempo? O a Arquímedes (c. 287-212 a. J. C.), cuyas aportaciones a la física todavía tienen cabida en nuestros libros de texto elementales. Tiene que ser precisamente Aristóteles, cuya física, aquella que hablaba de la existencia de cuatro elementos, de lugares naturales y cosas por el estilo, nos mantuvo, aliada con la astronomía geocéntrica (sistema aristotélico-ptolemaico), en el «error», hasta que llegó, nada menos que en el siglo XVI, Nicolás Copérnico (1473-1543), que puso el Sol en su sitio (esto es, en el centro del universo; también un error, por cierto), y luego Galileo, que desarrolló una dinámica (física del movimiento) sin lugares naturales, ni conceptos semejantes.

Que Aristóteles apuntó en ocasiones en direcciones que el desarrollo científico ha mostrado erróneas es algo innegable. Pero es ésta una manera de entender la ciencia profundamente desenfocada, y uno de mis motivos para incluir aquí a aquel hijo del médico de la corte de Macedonia, al que educaron en Atenas, en la célebre Academia de Platón, es precisamente para recalcar la dimensión histórica de la empresa científica.

Vivimos en una época dramáticamente apegada a la novedad; tanto ensalzamos lo nuevo, que hablamos de la muerte de la historia, cuando no de las ideologías (lo uno, me parece a mí, viene a ser como lo otro: ¿qué es la historia, sino ideas —ideologías— encontradas?). Pero la ciencia no es únicamente resultados, los *últimos* resultados. La ciencia es, por encima de todo, una tradición de comportamiento. Si perdemos semejante tradición, perderemos también a la investigación científica, a la propia ciencia. Y el que desprecia, o no es capaz de comprender, el pasado no tiene futuro, aunque tenga presente. Es, simplemente, un impostor. No quiero decir con esto que los científicos actuales deban esforzarse en comprender los razonamientos que guiaron a sus predecesores, especialmente a aquellos de los que les separa demasiado tiempo. Ni siquiera quiero decir que estén obligados a conocer a qué resultados llegaron. Lo que sí quiero decir es que debería esperarse de cualquier persona interesada por la ciencia contemporánea (científicos incluidos) una actitud de simpatía, de comprensión y respeto por los esfuerzos de pensadores de otros tiempos. Más aún si son del calibre de Aristóteles, a quien, conviene recordar, le debemos nada más y nada menos que la lógica formal, lo que es casi equivalente a «pensar ordenada y rigurosamente».

En la Academia de Platón, más tarde en su propio Liceo, o en sus viajes y estancias lejos de Atenas, Aristóteles se mostró como un extraordinario maestro y creador —acaso también promotor o aglutinador— de ideas, en campos tan diversos como la física, la astronomía y la cosmología, la lógica y la metodología, la retórica y la poética, la ética, la biología, zoología, anatomía y fisiología (se le atribuyen más de ciento cincuenta tratados,

de los cuales aproximadamente treinta han llegado hasta nosotros). Pero nunca se contentó con exponer *lo que sucede*, sino que buscó también el *porqué* de los procesos que describía. Fue, por consiguiente, un científico; o acaso más, un *filósofo de la naturaleza*. Un filósofo cuyas ideas y sistema llegarían a ser —a partir especialmente del siglo XIII— admirados, casi reverenciados. Pero mucho después de que la mayoría de sus doctrinas más especulativas hubiesen sufrido, justa o injustamente, casi siempre razonablemente, el amargo embate de la crítica, sus contribuciones a la historia natural continuaban siendo lección obligada. Nadie, en efecto, con anterioridad a Darwin, realizó una aportación mayor a nuestro conocimiento del mundo viviente que Aristóteles, el gran estudioso de los sistemas vivos y de la diversidad orgánica.

Jonathan Lear, acaso el mayor conocedor de la figura y obra de Aristóteles, ha señalado que éste creía que para comprendernos a nosotros mismos hemos de comprender el mundo, pero que no se detenía en este punto, sosteniendo también que, a su vez, para comprender el mundo uno ha de comprenderse a sí mismo. No parece exagerado afirmar que hemos abandonado tal coincidencia de objetivos —comprender la naturaleza y comprendernos a nosotros mismos—. Acaso si no lo hubiésemos hecho, no sufriríamos las amargas consecuencias que tal divorcio está produciendo en la naturaleza que nos rodea, al igual que en nuestros vacíos, no importa que aparenten estar colmados, espíritus.

B

BACTERIA. Organismo microscópico unicelular, que no posee núcleo (célula procariota). Habitualmente se reproduce dividiéndose en dos partes iguales (fisión), y como este proceso puede ocurrir cada 20 minutos, una bacteria es capaz, en principio, de multiplicarse enormemente en un día. Aunque a menudo se las considera dañinas, ciertos tipos de bacterias son vitales para muchos alimentos (como el queso o el yogur) y procesos industriales, mientras que otras desempeñan un papel esencial en el ciclo del nitrógeno, que mantiene la fertilidad del suelo. Normalmente no sobreviven a temperaturas superiores a los cien grados centígrados, pero algunas son capaces de soportar temperaturas de hasta 350 °C (como la *Thermus aquaticus*, un extremófilo que se reproduce en las aguas hirvientes de fuentes termales; una enzima que se deriva de esta bacteria se utiliza en ingeniería genética para aumentar la velocidad de reproducción de millones de copias de secuencias de ADN, un proceso que necesita de temperaturas muy elevadas).

Las bacterias constituyen uno de los cinco reinos en los que taxonómicamente se clasifica la vida en la naturaleza. Hubo una época en la que se dividía la vida en dos reinos, vegetal y animal, pero algunos descubrimientos desacreditaron esa división. Sucede, por ejemplo, que las plantas y los animales tienen una bioquímica común; están compuestos por los mismos componentes químicos —líquidos, hidratos de carbono, proteínas y ácidos nucleicos—, que se fabrican a partir de la materia prima ingerida utilizando las mismas reacciones básicas. También se descubrió que los principios de la genética son comunes para los animales y las plantas, y que ciertos organismos unicelulares tienen características animales y vegetales. Los ciliados —células o microorganismos provistos de cilios— nadan (como los animales) y las algas realizan la fotosíntesis (como las plantas). Por lo tanto, los ciliados parecen animales y las algas se asemejan a plantas. Pero los flagelados nadan y fotosintetizan, de modo que no se pueden adscribir a ninguno de los dos reinos. De hecho, la práctica taxonómica vigente otorga a los ciliados, las algas y los flagelados un reino propio, el de los protistas. Aparte están los hongos, que se parecen a las plantas, pero no fotosintetizan: para ellos se ha creado un cuarto reino. En la actualidad existen, por tanto, cinco reinos: bacterias, protistas, plantas, hongos y animales.

Pero puestos a buscar diferencias realmente fundamentales, la gran frontera se encuentra en la división procariota-eucariota, mucho más neta y profunda que la dicotomía clásica entre los reinos vegetal y animal. Los procariotas sólo tienen un cromosoma; los eucariotas tienen varios. Los procariotas no sufren fusiones celulares durante su ciclo reproductivo; en cambio, el ciclo reproductivo de los organismos eucariotas consiste en una alternancia entre dos fases: una haploide con un solo juego de cromosomas y una diploide con dos juegos de cromosomas. Así que, de verdad, sólo existen dos reinos: el de los procariotas, que coincide con el de las bacterias, y el de los eucariotas, que engloba a protistas, plantas, hongos y animales. En la diferente organización de las células eucariotas frente a las procariotas se encuentra, pues, la mayor separación que se conoce entre las formas de vida.

BIG BANG. Gran Estallido (o Explosión) del que se supone surgió el universo, hace, aproximadamente, trece mil quinientos millones de años. [Véase UNIVERSO; también NUCLEOSÍNTESIS].

BIODIVERSIDAD. Los seres vivos, la diversidad biológica —o *biodiversidad*— que existe en nuestro planeta es fruto, improbable y delicado (dentro de su indudable

resistencia), de millones de años de evolución. Cuando una especie se pierde, desaparecen enormes conglomerados de instrucciones químico-genéticas que seguramente será imposible reconstruir jamás (las reconstrucciones de seres vivos a partir de rastros de ADN se limitan, por el momento al menos, a las novelas de ciencia ficción y al cine). Perdemos, de esta manera, parte de nuestro pasado, o, lo que es lo mismo, de nuestra historia, y ya se sabe la indefensión, el abandono en que se encuentran aquellos que no tienen historia. Privados de un entorno familiar, perdemos no sólo identidad, sino que aumenta la incertidumbre con respecto al futuro.

Cuando de biodiversidad se trata, un futuro con menos especies puede ser un futuro con equilibrios ecobiológicos diferentes, que afecten a la vida que resta en el planeta. A toda la vida, incluyendo, por supuesto, a la vida humana: el *homo sapiens* ha llegado a ser lo que es, no lo olvidemos, apoyado por una naturaleza esencialmente plural. Si desapareciéramos hoy mismo, el medio ambiente natural terminaría volviendo al fértil equilibrio que existía antes de la explosión de la población humana. Solamente alrededor de una docena de especies, entre ellas el piojo y un ácaro que vive en las glándulas sebáceas de nuestra frente, dependen de nosotros por completo. Otras especies son más importantes, ecológicamente hablando. Si, por ejemplo, desaparecieran las hormigas, decenas de miles de otras plantas y especies animales peligrarían, simplificando y debilitando sus respectivos ecosistemas.

Estos hechos biológicos se pueden entender en el sentido de que tenemos el deber de preservar para nuestros descendientes el acervo genético —en continua evolución, por supuesto— que existe en nuestro planeta; ya vendrán las extinciones que no podemos controlar [véase DINOSAURIOS], para reducir ese legado. Este deber no es sólo moral, sino biológico también. Recordemos que en un sentido biológico, el organismo no vive por sí mismo. Su función primordial ni siquiera es reproducir otros organismos, sino unidades más pequeñas y básicas: genes. El organismo individual es sólo un vehículo, parte de un complicado mecanismo para conservar estos genes y propagarlos (en palabras de Samuel Butler: «La gallina es sólo el sistema que tiene un huevo de hacer otro huevo», mientras que Richard Dawkins habla de «el gen egoísta»). Deberíamos, en consecuencia, esforzarnos por conservar la biodiversidad terráquea.

Ocurre, no obstante, que entre los grandes problemas que afectan a la humanidad se encuentran los medioambientales. Nuestras actividades agrícolas e industriales están envenenando ríos y lagos; ya incluso los océanos, una de las últimas reservas de vida del planeta. Somos, asimismo, responsables de la lluvia ácida, de la expansión gradual de los desiertos, el derretimiento de los casquetes polares o la desaparición de las selvas tropicales, del calentamiento global de la atmósfera (efecto invernadero), al igual que de los agujeros en la capa de ozono [véase OZONO, AGUJERO DE LA CAPA DE y EFECTO INVERNADERO].

Promovido por semejante deterioro, las especies están desapareciendo a un ritmo demasiado elevado, la mayoría pequeñas plantas e insectos que viven en las selvas tropicales que sucumben al fuego, el hacha o los *bulldozers*. Un ritmo varios miles de veces mayor que el que se produce de manera natural. Según las últimas estimaciones, unas 16 000 especies animales y vegetales están amenazadas de extinción en todo nuestro planeta. Basándonos en los datos que se conocen acerca de la desaparición de aves, mamíferos y anfibios durante los últimos cien años, se obtiene un ritmo de extinción para la actualidad que es entre 50 y 500 veces mayor que el que se deduce del registro fósil. Estamos transformando ecosistemas terrestres en monocultivos agrícolas, creando inmensos hábitats

de cemento, acero, plástico y cristal desprovistos prácticamente de biodiversidad, de vida que no sean los 5700 millones de seres humanos que pueblan la Tierra (se estima que hace diez mil años, en los albores de la agricultura, sólo había cinco millones; 250 en la época del nacimiento de Cristo).

Los seres humanos que hoy pueblan la Tierra y que tienen, aproximadamente, más de, aproximadamente cincuenta años, cargan sobre sus hombros la enorme responsabilidad de haber deteriorado nuestro planeta más que cualquier otra generación o generaciones anteriores, o que ninguna otra de los millones de especies que existen o han existido. Deteriorado, además, de manera perfectible con nitidez. ¿Quién, de estas generaciones que acabo de señalar, no es capaz de distinguir la gran diferencia que existe entre el planeta que conocía, o que le enseñaron existía, en su niñez y aquel con el que se encuentra ahora?

Por supuesto, la ciencia no es culpable de semejante situación, aunque de la ciencia y la tecnología procedan algunos de los instrumentos que utilizamos en contra de nuestro entorno. Muy al contrario, la ciencia nos ayuda a comprender y valorar tal situación. Y si adoptamos las decisiones apropiadas, en el conocimiento científico encontraremos un aliado esencial para subsanar en lo posible los graves deterioros ya producidos.

BIOLOGÍA MOLECULAR. Disciplina que se ocupa del estudio de las bases moleculares de la vida, incluyendo la bioquímica de moléculas como el ADN, el ARN o las proteínas, y la estructura molecular y funciones de las diferentes partes de las células.

Aunque antes del descubrimiento de la estructura del ADN ya había comenzado la búsqueda de la composición molecular de sustancias como la hemoglobina del caballo (Max Perutz, Viena y Cambridge, finales de la década de 1920), o polipéptidos (Linus Pauling, California Institute of Technology, finales de la década de 1940), fue especialmente a partir del descubrimiento en 1953 de Watson y Crick cuando comenzó la verdadera historia de la biología molecular, una historia cuyo desarrollo se ha ido acelerando progresivamente, hasta el punto de que no es posible prever todas las consecuencias que se derivarán de ella en el futuro próximo. Si hay una disciplina científica que puede cambiar nuestras vidas y valores en las próximas décadas, ésa es la biología molecular, por sí misma o bajo la forma de biotecnología o ingeniería genética. De hecho, ya está cambiando algunos apartados básicos de nuestras vidas, como los mecanismos de reproducción o el tratamiento de ciertas enfermedades. Incluso se adivina en un horizonte no lejano la posibilidad de intervenir, dirigiéndola, en la evolución de nuestra especie (y de otras, claro). De esa misma evolución que hasta ahora había sido producto del paso del tiempo —mucho tiempo—, del azar y de la selección natural. [Véanse BIOTECNOLOGÍA e INGENIERÍA GENÉTICA].

BIOTECNOLOGÍA. Conjunto de técnicas biológicas dirigidas fundamentalmente a crear productos y procesos que sean nuevos, mejores y, si es posible, más baratos. Productos farmacéuticos y de diagnóstico para los seres humanos y para los animales, semillas, plantas, fertilizantes, aditivos para la alimentación, productos industriales, bacterias que eliminan o degradan agentes contaminantes (como el petróleo), figuran entre los posibles objetos de interés para la biotecnología. Se espera que esta tecnociencia produzca efectos sociales y económicos positivos, permitiendo, por ejemplo, aumentar la producción de las cosechas (con nuevas plantas, al igual que ofreciendo la oportunidad de utilizar tierras marginales), haciendo que crezca la producción de alimentos como la leche o proporcionando vacunas contra enfermedades endémicas. De hecho, mucho de esto ya lo está haciendo, con frecuencia rodeado de un fuerte debate público.

A pesar de esta orientación «industrial» de la biotecnología, en realidad no siempre

es fácil distinguirla de disciplinas más «científicas», como la biología molecular: existen, sin ir más lejos, investigaciones que por un lado pueden servir para describir de manera más profunda las relaciones evolutivas entre las diferentes especies animales, y, por otro, para producir especímenes animales diseñados para cumplir determinados fines industriales.

La capacidad de los microorganismos para fermentar alimentos y bebidas (como la cerveza) permitiendo su transformación y conservación, utilizada hace miles de años, es en realidad un procedimiento biotecnológico, pero es a partir de los avances impulsados por el descubrimiento de la estructura del ADN que ha sido posible dar un salto cualitativo nuevo, identificando, alterando y transfiriendo materiales genéticos, hasta el punto que se puede decir que la biotecnología moderna no tiene más allá de veinte años de edad. [Véase también INGENIERÍA GENÉTICA, disciplina estrechamente relacionada con la biotecnología].

BIT. Acrónimo de *binary digit* (dígito binario). Si incluyo esta voz es porque creo que algo de razón tiene Nicholas Negroponte, el gurú del mundo digital, cuando define esta unidad de información de la siguiente forma: «Un bit no tiene color, tamaño ni peso y viaja a la velocidad de la luz. Es el elemento más pequeño en el ADN de la información. Es un estado de ser: activo o inactivo, verdadero o falso, arriba o abajo, dentro o fuera, negro o blanco. Por razones prácticas consideramos que un bit es un 1 o un 0». Y puesto que le he dado mucha importancia al ADN biológico, ¿por qué no dárselo al informático, que también amenaza con cambiar nuestro mundo (lo está haciendo ya)?

Una definición menos literaria de lo que es un *bit* es la siguiente: unidad de medida de información consistente en la cantidad transmitida o almacenada (por un dispositivo electrónico, como, por ejemplo, un ordenador/computador) por la selección de una entre dos señales posibles. Información generada cuando, entre dos signos equiparables, se elige uno.

[Véase DIGITAL].

C

CALENTAMIENTO GLOBAL. Véase EFECTO INVERNADERO.

CAMBIO CLIMÁTICO. Fenómeno que se ha dado otras veces en la historia de la Tierra, pero que ahora puede producirse (algunos, cada vez más, sostienen que ya se está produciendo, y que se intensificará, hagamos lo que hagamos) debido a la actividad humana, en particular a la emisión de gases, como el CO₂, de efecto invernadero.

[Véase EFECTO INVERNADERO].

CÁNCER. Conjunto de enfermedades caracterizadas por una proliferación anormal de células (existen más de cien tipos de cánceres, algunos comunes, como el de pulmón, otros raros, como el mesotelioma abdominal, asociado por lo general a la exposición al asbesto). Más específicamente, crecimiento celular excesivo e incoordinado, que no está sujeto a los controles normales del organismo, y que además tiene capacidad de invasión, destrucción de estructuras vecinas y diseminación (se podría añadir que normalmente acarrea la muerte al individuo si se deja evolucionar libremente). La proliferación celular local da origen a un tumor.

El médico, anatomista y fisiólogo romano Galeno (129-194) describió una de las patologías cancerosas como «un tumor que se extiende por los dos lados mediante prolongaciones anormales que invaden los tejidos adyacentes. Esto se parece a las patas de un cangrejo, que también están en la cabeza y en todo el cuerpo del animal». Por eso se terminó imponiendo la palabra «cáncer», que en griego significa «cangrejo».

Supongo que no es necesario que recuerde a mis lectores que el cáncer es una de las enfermedades más extendidas y mortales que conocemos. Todos lo sabemos, y lo tememos (hace tiempo pregunté a un amigo mío, Paul Forman, conservador de uno de los museos de la Smithsonian Institution, en Washington, qué sabía del cáncer, y este hombre, normalmente frío y racional, me contestó: «Ni sé, ni quiero saber nada»).

Enfrentado con esta maldita palabra, que difícilmente puedo evitar en este diccionario (al fin y al cabo, uno de los beneficios que más reclamamos de la ciencia es que nos libre de enfermedades), la primera pregunta que surge es la de qué se sabe del cáncer desde el punto de vista genético (oncogenética). Aunque diré algo inmediatamente, no es mi intención profundizar demasiado en este punto, sobre el que se han escrito billones de palabras. Mi propósito es, lo verán pronto, hacer hincapié en otros aspectos.

Si el problema con los cánceres es el de que las células se multiplican desmesuradamente, entonces es obvio que la primera pregunta que hay que plantearse es: ¿cómo sabe la célula cuándo ha crecido lo suficiente para decidir si se divide?

La división celular, como cualquier otro proceso biológico, está bajo control genético. Genes determinados deben regular la mitosis (división) celular, y lo pueden hacer en respuesta a señales intracelulares, intercelulares y ambientales. Aunque se ha avanzado notablemente en este problema, incluso en el caso del *Escherichia coli*, el organismo celular más simple y mejor estudiado, sigue sin conocerse realmente el mecanismo molecular por el que la célula decide cuándo debe iniciar su mitosis.

Se sabe, sin embargo, que en las células tumorales se produce una doble regulación: existen promotores de la proliferación celular (oncogenes) e inhibidores (antioncogenes). Tan mala puede ser la presencia de los primeros, como la ausencia de los segundos (recuerde, cuando se resta un número negativo, es como si sumásemos). Se han identificado ya más de cien oncogenes, y, aunque no son más de una docena los antioncogenes

conocidos hasta la fecha, no existen dudas de que, en un futuro próximo, aumentará su número. Semejantes cifras muestran con claridad la gran complejidad de los mecanismos genéticos que controlan el crecimiento y la división celular. La meta de una terapia genética del cáncer es, por el momento, inalcanzable.

Hasta aquí algunas, pocas, ideas relativas a la base genética del cáncer. Pero, como señalaba antes, yo quiero utilizar este desorden celular con otros fines. Fines que, como se verá, muestran algunos de los límites de la ciencia. O de la falta de racionalidad a la hora de buscar soluciones a problemas graves (en este caso para la salud pública).

La notoriedad del cáncer es tal que son inmensos los recursos que se emplean en investigaciones cuyo fin es encontrarle remedio. Uno de los programas de investigación científica más ambiciosos de la historia se planteó en 1971. El 23 de diciembre de aquel año, el presidente Richard Nixon (1913-1994) anunciaba el establecimiento de un proyecto que terminaría con el mal. La victoria, señaló, llegaría en 1976, aniversario del bicentenario de la independencia de Estados Unidos. Si John Kennedy (1917-1963) había sido capaz de culminar su deseo de llevar un hombre a la Luna, ¿por qué iba a ser diferente con el cáncer? Sidney Farber, un notable cancerólogo, declaraba: «Estamos llegando al objetivo. Lo que necesitamos es energía y créditos idénticos a los que han permitido enviar el hombre a la Luna».

Desgraciadamente, Nixon y todos los que pensaban como él se equivocaron. Roswell Park (1807-1869), un médico de Nueva York, señalaba en 1899 que el cáncer era «la única enfermedad que aumenta constantemente». Aquel año, el cáncer se cobró treinta mil vidas de ciudadanos de su país. En 1994, el cáncer se cobraba quince veces más: 538 000, según las estimaciones de la Sociedad Americana del Cáncer. Cálculos de la Organización Mundial de la Salud indican que en los países desarrollados una de cada cinco personas muere de este mal. Cada año se diagnostican 6 000 000 de nuevos casos de cáncer en el mundo y 4 000 000 de personas mueren de esta enfermedad (algo más de 70 000 corresponden a España). Estimaciones de la misma organización señalan que para el año 2000 el número de defunciones anuales mundiales rondará la cifra de 8 000 000.

La tragedia que es el cáncer es todavía mayor por el hecho de que sus causas son bastante conocidas, y lo han sido desde hace tiempo. El cáncer es originado por productos químicos en el aire que respiramos, en el agua que bebemos y en los alimentos que comemos. El cáncer lo producen las malas costumbres o las malas condiciones de trabajo. También, por supuesto, la herencia genética que uno ha tenido la desgracia de recibir, aunque parece que éstos son la minoría (se cree que es casi seguro que el cinco por ciento de la población padecerán el tumor en algún momento de su vida debido a causas hereditarias; un número superior está predispuesto en menor grado).

La Organización Mundial de la Salud estima que alrededor de la mitad de todos los cánceres se producen en un quinto de la población mundial, el que corresponde a las naciones más industrializadas. Sin embargo, incluso dentro de esas naciones más industrializadas, varían mucho los tipos de cáncer. El principal cáncer de Estados Unidos (para hombres y desde la década de los ochenta para mujeres también) es el cáncer de pulmón; en Japón es el de estómago. El cáncer de boca es casi diez veces más frecuente entre los hombres franceses que entre los israelitas; las mujeres de Inglaterra y Gales tienen una probabilidad más de cinco veces superior de morir de cáncer de pecho que las mujeres de Japón. Checoslovaquia tiene el mayor índice mundial de muertes producidas por cáncer de colon (41 por 100 000), pero su índice de cáncer de pecho es sólo un tercio del de Estados Unidos. Queensland, en Australia, es la capital mundial del cáncer de piel, por la

desgraciada circunstancia de la emigración de británicos de piel clara a una región de intenso y prácticamente permanente sol.

En Estados Unidos los negros sufren proporciones significativamente más altas de muerte que los blancos por prácticamente todo tipo de cáncer (el cáncer de piel es la única excepción notable), no en vano algunos estudios han demostrado que es la pobreza más que la raza la que se encuentra en la base de la diferencia. «La pobreza —se ha dicho— es un carcinógeno».

Ocupación, dieta y estilo de vida están unidos a la enfermedad. Los que trabajan con asbestos, arsénico, uranio o berilio tienen más probabilidades de sufrir cáncer de pulmón; los que trabajan con tintes, cáncer de vejiga y de estómago. El cáncer de hígado puede ser producido por la exposición al cloruro de vinilo. El cáncer de intestino es raro en países en los que la carne no es parte regular de la dieta y en los que se consumen grandes cantidades de fibras. Los mormones, cuyas creencias religiosas les prohíben fumar o beber alcohol, café o té, tienen proporciones de muerte por cáncer un veinte por ciento menores que los no mormones. En China, se han encontrado correlaciones entre el riesgo que corren las mujeres de padecer cáncer de pulmón y los combustibles que utilizan para cocinar, lo frecuentemente que cocinan con aceite e incluso los diferentes tipos de aceite que emplean. Sabemos también que no hay mayor causa del cáncer que el tabaco. A mediados de la década de los ochenta se estimó que sólo los cigarrillos son culpables de entre trescientas mil y cuatrocientas mil vidas de norteamericanos cada año. Los fumadores de dos cajetillas diarias de tabaco aumentan su riesgo de sufrir cáncer de pulmón por un factor de veinte y disminuyen su expectativa de vida en unos ocho años. Y no sólo sufren los fumadores: la Agencia de Protección del Medio Ambiente estima que más de tres mil no fumadores mueren cada año en Estados Unidos por tabaco de «segunda mano» o «medio ambiental». Un informe de 1991 de la revista oficial de la Asociación Americana del Corazón situaba la cifra en cincuenta mil.

El cáncer, en otras palabras, no es necesariamente una constante de la condición humana, sino un producto de las sustancias a las que nos vemos expuestos en nuestras casas o en el trabajo, al igual que de los estilos de vida que llevamos. El cáncer es también una enfermedad histórica, en tanto que sus esquemas de incidencia han cambiado a lo largo del tiempo. En 1900, el cáncer de pulmón era una enfermedad muy rara; hoy es la segunda causa de muerte en las naciones industrializadas.

Desde esta perspectiva, no es demasiado extraño que por el momento la batalla contra el cáncer, en la que se han empleado inmensos recursos humanos y económicos, se esté perdiendo. Unos pocos años de expectativa de vida es lo que se tiene para la mayoría de los cánceres, básicamente lo mismo que en 1971, cuando Nixon declaró la guerra a la enfermedad. (Es preciso indicar que también se han producido algunos éxitos notables, especialmente en los niños y los adolescentes. En 1950, en Estados Unidos, morían de cáncer 1900 niños de menos de cinco años. Su número ha disminuido en la actualidad a más de la mitad. En la infancia, la quimioterapia ha modificado el pronóstico de leucemia aguda o el de cáncer de riñón. En 1960, con una amputación se curaba a menos del veinte por ciento de los niños afectados de osteosarcoma, un cáncer de huesos. Hoy, gracias a la quimioterapia, más del sesenta por ciento se salvan sin amputación. Asimismo, la enfermedad de Hodgkin, un cáncer del sistema ganglionar, hasta hace poco fatal o casi, se cura en más del ochenta y cinco por ciento de los casos).

Hemos, es cierto, aumentado nuestros esfuerzos científicos, pero no hemos atacado las fuentes de las que surge la enfermedad.

Pero deberíamos haber sido más perspicaces, o por lo menos más sinceros. El concepto de enfermedad es algo más que la identificación de un germen. No existe semejante cosa para los cánceres. Deberíamos recordar, por ejemplo, la experiencia del siglo pasado. Aunque los antibióticos y vacunas desarrollados entonces para enfermedades contagiosas como el cólera o la tuberculosis salvaron millones de vidas, a la larga aquellas enfermedades fueron dominadas mediante otro tipo de medidas: mejor alimentación, menos horas de trabajo, y, sobre todo, mejores condiciones de vida, en particular de salubridad. Koch probablemente salvó menos vidas de víctimas del cólera que activistas como John Snow (1813-1858), que eliminó el mango de la bomba de agua pública de Broad Street, en Londres (1854), con lo que redujo espectacularmente la epidemia de cólera que asolaba a la ciudad. Los médicos que asistían a las madres durante el parto lograron poner fin a una larga era de fiebres puerperales simplemente lavándose las manos.

La prevención, en lugar de la cura, es el mejor remedio para muchos trastornos. Para el cáncer, por ejemplo. Y sin embargo, una gran parte de la investigación se ha centrado en perfeccionar métodos de tratamiento, como la radioterapia, la quimioterapia o la cirugía; también, por supuesto, en comprender los mecanismos biológicos implicados en la carcinogénesis. En 1995, ha señalado Robert Proctor, la base de datos referente a ensayos clínicos del Instituto Nacional del Cáncer estadounidense mostraba 173 ensayos de tratamientos «activos» contra el cáncer de pecho, comparado con sólo ocho centrados en prevención. Para otros cánceres la proporción es todavía más llamativa. Una búsqueda limitada en bancos de datos ha mostrado 1190 ensayos de tratamientos frente a 32 ensayos de prevención (diez de los cuales estaban diseñados para impedir el desarrollo de un segundo cáncer en pacientes que ya habían padecido la enfermedad).

La investigación básica sobre el cáncer ha conducido, es cierto, a notables descubrimientos biológicos, y no se deben entender mis palabras como una crítica a ella, pero no ha producido por el momento avances sustanciales en el tratamiento del mal, y menos aún en su prevención. ¿Por qué no centrarse directamente en la prevención? La respuesta es clara: porque ello obligaría a entrar en el ámbito de la acción política; porque tendríamos que plantearnos el cambiar nuestros modelos de sociedad.

La ciencia también nos ofrece lecciones como ésta. Lecciones que nos muestran sus límites, que hacen evidente la falacia, el engaño que subyace cuando reclamamos de la investigación científica soluciones que con nuestros comportamientos nosotros mismos nos encargamos de hacer extremadamente improbables, si no imposibles. Enseñanzas, finalmente, que nos impulsan —o nos deberían impulsar— hacia dominios extracientíficos, que al dotarse de racionalidad y necesidad mediante conclusiones obtenidas a través de la ciencia, se hacen, ellos mismos, científicos.

CAOS. Propiedad de algunos sistemas matemáticos no lineales (que incluyen términos cuadráticos para las incógnitas) que hace que pequeñas desviaciones en las condiciones de partida (condiciones iniciales) produzcan efectos divergentes enormes en las soluciones.

Esta definición resume la esencia del concepto de caos, una palabra que ha penetrado nuestra cultura en las últimas décadas. Pero ¿qué es realmente el caos? Tal vez sirva de buena introducción recurrir a uno de los grandes matemáticos del siglo XIX, Henri Poincaré (1854-1912). El genio e intuición matemáticos de Poincaré fueron tales que adivinó la posibilidad de la existencia del caos, así como sus características principales, como se comprueba en uno de sus libros filosóficos al igual que de divulgación, *Ciencia y método* (1912), en donde se lee: «Una causa muy pequeña, que se nos escapa, determina un

efecto considerable que no podemos ignorar; decimos entonces que este efecto es debido al azar. Si conociésemos las leyes de la naturaleza y la situación del universo en el instante inicial, podríamos predecir con exactitud la situación de este universo en un instante ulterior. Pero aun cuando las leyes naturales no tuvieran más secretos para nosotros, no podríamos conocer la situación inicial más que *aproximadamente*. Si esto nos permite prever la situación ulterior *con la misma aproximación*, que es todo lo que necesitamos, decimos entonces que el fenómeno ha sido previsto, que está regido por leyes. Pero no acaece siempre así; puede suceder que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales las engendren muy grandes en los fenómenos finales; un pequeño error sobre los primeros produciría un error enorme sobre los últimos. La predicción entonces se vuelve imposible y nos encontramos con un fenómeno fortuito».

Está claro que Poincaré se había dado cuenta de que si se cambia ligeramente el estado inicial de un sistema, la nueva evolución temporal puede separarse rápidamente de la evolución original hasta que ambas se hagan totalmente diferentes: es el fenómeno de la *sensibilidad a las condiciones iniciales*. Un fenómeno que no requiere un estado de partida especial (como podría ser un equilibrio inestable), sino que puede tener lugar para una extensa clase de estados iniciales. Es entonces cuando hablamos de *caos*. La predicción del comportamiento futuro de un sistema caótico está, por definición, seriamente limitada aunque el sistema sea determinista. El caos, hay que hacer hincapié en este último punto, no implica que el sistema sea indeterminista.

La predicción del tiempo resulta ser uno de los dominios en los que reina el caos (aunque no completamente: dentro de nuestra caótica atmósfera hay ciertos elementos meteorológicos, como los vientos a grandes altitudes en las regiones ecuatoriales, que pueden ser predichos con bastante precisión, y no sólo a dos semanas vista, sino a dos meses o incluso a dos años). De hecho, fue en este dominio, el de la meteorología, de la mano del matemático y meteorólogo teórico Edward Lorenz (1917), en donde se formalizó la noción de caos, aunque también se hubiese dado cuenta Poincaré de esta característica de los fenómenos meteorológicos: «¿Por qué —se preguntaba— los meteorólogos tienen tantas dificultades para predecir el tiempo con alguna exactitud? ¿Por qué las lluvias y las tempestades nos parecen frutos del azar, hasta tal punto que mucha gente encuentra lógico rogar para que llueva o para que haga buen tiempo, mientras juzgarían ridículo pedir un eclipse mediante una oración? Vemos que generalmente las grandes perturbaciones se producen en las regiones en que la atmósfera es inestable. Los meteorólogos ven que este equilibrio no es constante, que se va a producir un ciclón en alguna parte; pero dónde, son incapaces de decirlo; un décimo de segundo más o menos en un punto cualquiera y el ciclón estalla aquí y no allá y extiende sus estragos sobre comarcas que hubiera evitado de otro modo. Si se hubiera conocido ese décimo de segundo, se habría podido prever, pero las observaciones no eran lo bastante seguras ni precisas, por esto es que todo parece debido a la intervención del azar. Aquí encontramos el mismo contraste entre una causa mínima, inapreciable para el observador, y los efectos considerables que algunas veces se convierten en espantosos desastres».

Poincaré fue un genio de la matemática, pero, como vemos, su imaginación y narrativa no desmerecían; sin embargo, se ha visto superada en este campo por la de Edward Lorenz, que introdujo en 1972 el denominado «efecto mariposa». Al plantearse el nada retórico problema de si el batido de las alas de una mariposa en Brasil producirá al cabo de algún tiempo un tornado en Texas, tal vez también, en última instancia, un cambio completo del estado de la atmósfera terrestre, Lorenz hacía patente la importancia práctica

del caos. Y de paso introducía una imagen que ha penetrado en nuestra cultura. (Leo, por cierto, en las recientes memorias —de niño republicano— de Eduardo Haro Tecglen, unas reflexiones que llenarían de alegría el corazón de más de un defensor del caos: «La invención de un insecticida poderoso modificó toda la mortalidad en África, varió su demografía y la mentalidad adecuada a la media de vida humana, y algunas personas ven en ello la causa original de la presión que acabó con los imperios coloniales y modificó enteramente la situación de Europa y, con ella, la del mundo»; y más adelante: «Un chip cualquiera puede cambiar todas las formas de trabajo, la relación de éste con el capital, y todo el sistema de mercados y de centros hegemónicos geográficos: puede influir en la vuelta de las revoluciones o en su destierro definitivo. O en no se sabe qué». Ya ven, el caos —o, viene a ser lo mismo, la compleja malla de las relaciones que constituyen eso que denominamos historia— aparece por todas partes).

Poincaré no buscaba el caos. Pretendía comprender las órbitas de los cuerpos celestes y se encontró con una peculiar propiedad de las soluciones de algunas ecuaciones. Para él, se trataba del fenómeno que hacía demasiado complejas las ecuaciones de tres sólidos como para poder resolverlas, en lugar de ser el sujeto principal de un futuro campo de investigación. Lorenz tampoco lo buscaba, pero fue lo suficientemente perspicaz para reconocerlo cuando lo encontró. Vio algo más que azar en el tiempo; vio orden *disfrazado* de casualidad. Para completar semejante tarea, el meteorólogo teórico que era Lorenz necesitó del matemático que también había en él.

Cuando en 1963 apareció el artículo en el que Lorenz condensaba sus ideas sobre el caos atmosférico, utilizando para ello una descripción simplificada del problema de la convección térmica, pocos científicos que no fueran meteorólogos repararon en él. Una década más tarde la situación sería otra. Hoy el caos no se encuentra sólo en la atmósfera; aparece en prácticamente toda la naturaleza. En la física, se encuentran movimientos caóticos en la magnetización del helio superfluido, en los láseres y en los plasmas. En ingeniería, en numerosos fenómenos aerodinámicos. En medicina y biología, en las oscilaciones (arritmias, por ejemplo) cardíacas, al igual que en la dinámica del funcionamiento cerebral. En química, en ciertas reacciones cinéticas. En ecología, en modelos que estudian las relaciones entre depredador-presa. Tampoco se libra del caos la economía, en donde está siendo estudiado su posible efecto en macromodelos, así como en el crecimiento económico clásico. Legisladores, economistas, industriales, políticos, deben hacer frente a la posibilidad de que sus decisiones produzcan oscilaciones violentas e imprevisibles con efectos acaso desastrosos, caóticos.

La trascendencia del caos es tal que incide también en cuestiones de indudable relevancia filosófica. Y es que el caos constituye una generosa fuente de nuevas aproximaciones a la naturaleza, una naturaleza que hasta no hace mucho estaba dominada, en su interpretación teórica, por la linealidad. El caos ha abierto, acaso más que ninguna otra disciplina (con la excepción de la física de fluidos), la puerta a la no linealidad de la naturaleza, y ello a pesar de que no todo lo no lineal es caótico (aunque sí todo lo caótico es no lineal). Éste es el camino del futuro, un camino que nos conducirá a una visión de la naturaleza mucho más rica que la actual (la no linealidad genera nuevas propiedades, mientras que la linealidad no: la suma de dos soluciones de un sistema no lineal es más que la reunión de las dos soluciones, no así en el caso de un sistema lineal).

CARSON (Rachel). 1907-1964. Hay libros que uno no puede olvidar, y uno de ellos —que yo le recomiendo, amigo lector— es uno escrito por una zoóloga y naturalista estadounidense, Rachel Louise Carson: *Silent Spring (Primavera silenciosa)*; 1962).

Carson estudió zoología; le atraía la enseñanza, pero no pudo dedicarse a ella, ya que, acuciada por tener que asumir varias obligaciones familiares, necesitaba ganar más dinero de lo que inicialmente podía proporcionarle. Tuvo, por consiguiente, que renunciar a una carrera académica, entrando a trabajar en la Agencia de Pesca de Estados Unidos. Mientras trabajaba allí escribió su primer libro: *Under the Sea-Wind (Bajo el viento marino*; 1941), que, publicado justo un mes antes del ataque japonés a Pearl Harbor, pasó prácticamente desapercibido. En 1951 apareció su segundo libro, *The Sea Around Us (El mar alrededor de nosotros)*, que se convirtió en un éxito de ventas, circunstancia que le permitió abandonar su empleo y dedicar todo su tiempo a escribir.

El fruto principal de aquella libertad fue *Primavera silenciosa*, que apareció inicialmente en forma de una serie de artículos publicados en la revista *New Yorker* en junio de 1962. Su publicación produjo una reacción agresiva de la industria química estadounidense, el *lobby* agroquímico, que reconoció el peligro que los argumentos y denuncias que contenía el libro representaban para ellos. Intentaron impedir su publicación como libro presionando a la editorial, Houghton Mifflin, cuestionando los datos que incluía, la interpretación que se hacía de ellos y las credenciales científicas de la autora. Nada nuevo ni nada que no se repetiría otras veces en el futuro. Afortunadamente, no tuvieron éxito, y gracias a este libro la sociedad, el público, supo de los efectos nocivos que para la naturaleza tenía el empleo masivo de productos químicos como los pesticidas, el DDT (diclorofenil-tricloroetano) en particular, un producto que había aportado antes muchos beneficios (salvó muchas vidas, combatiendo, por ejemplo, el mosquito palúdico). El éxito del libro obligó a que se formase un Comité Asesor al Presidente para el empleo de pesticidas.

Primavera silenciosa es un libro de ciencia. Utilizando los recursos de disciplinas como la química, la zoología, la agricultura o la oceanografía, Carson se esforzó en explicarnos cómo los productos químicos afectan a la vida que puebla la Tierra. Y consiguió lo que pocos textos científicos logran: iluminar nuestros conocimientos de procesos que tienen lugar en la naturaleza, e interesar y alertar a la sociedad tanto sobre la ciencia que es necesaria para comprender realmente lo que sucede en nuestro planeta, como acerca de la situación presente y futura de la vida que existe en él.

Quiero citar unos pasajes de esta obra con tan hermoso título. Merece la pena que sean leídos: «Por primera vez en la historia del mundo, todo ser humano está ahora en contacto con productos químicos peligrosos, desde el momento de su concepción hasta su muerte. En menos de dos décadas de su uso, los pesticidas sintéticos han sido distribuidos tan intensamente por el mundo inanimado al igual que por el animado que están presentes en prácticamente todas partes. Han sido recuperados de la mayor parte de los principales sistemas fluviales e incluso de corrientes de agua subterránea que fluyen por la Tierra sin que las veamos. Residuos de estos productos químicos permanecen en suelos a los que pueden haber sido aplicados una docena de años antes. Han penetrado y se han instalado en los cuerpos de peces, pájaros, reptiles y animales domésticos y salvajes tan universalmente que los científicos que llevan a cabo experimentos con animales encuentran casi imposible localizar ejemplares libres de tal contaminación. Se les ha encontrado en peces de remotos lagos de montaña, en lombrices enterradas en el suelo, en los huevos de pájaros, y en el propio hombre, puesto que estos productos químicos están ahora almacenados en los cuerpos de la vasta mayoría de los seres humanos. Aparecen en la leche materna y, probablemente, en los tejidos del niño que todavía no ha nacido».

Luchemos porque esto no continúe siendo así. Y agradezcamos, y recordemos, a

Rachel Carson por habernos llamado la atención, desde la ciencia, sobre este gran problema.

CÉLULAS MADRE. En muchas ocasiones las enfermedades diezman las células de un tejido (así sucede, por ejemplo, con la enfermedad de Huntington y el Alzheimer). Y hasta hace poco no se tenían esperanzas de poder recuperar esas vitales células perdidas. Las células madre, de las que tanto se habla últimamente, han cambiado esta triste situación, arrojando un informado rayo de esperanza.

Para entender qué son las células madre hay que saber, en primer lugar, que muchas de las células —los «átomos» de la vida, de la humana ciertamente (se conocen 216 tipos diferentes de células humanas)— del cuerpo sólo son capaces de reproducirse a sí mismas: una célula hepática, por ejemplo, sólo produce células hepáticas. Con las denominadas «células madre» es diferente: pueden generar distintos tipos de células.

Una razonable definición de célula madre es la siguiente: es una célula progenitora de otros tipos celulares, que posee dos propiedades básicas. La primera que cuando se divide, puede dar dos hijas iguales, y la segunda que puede diferenciarse en otros tipos celulares. Y de estas propiedades se sigue el corolario de que las células madre pueden colonizar y regenerar un tejido.

Desde el punto de vista puramente científico, esta clase de células plantea un profundo problema: ¿cómo es que es posible tal «ductibilidad»? ¿cuáles son los «detonadores moleculares» responsables de esa dinámica celular? Para responder a estas preguntas será preciso comprender el «mecanismo» de estas células, lo que constituirá un avance fenomenal. Sucede, sin embargo, que cuando se habla de células madre no se habla sólo, la mayor de las veces, ni siquiera fundamentalmente, de ciencia, sino de valores morales. Aunque se pueden encontrar células madre en los adultos, parece que éstas suelen carecer de la habilidad que sí poseen las que se encuentran en los embriones: la capacidad de diferenciarse en *cualquier* tipo de célula. Por eso, a las células madre que se obtienen después de la formación de la mórula (embrión temprano que, durante el periodo de segmentación, tiene forma de una mora) se las denomina «pluripotentes», y a las que son anteriores a esa formación, «totipotentes». Y hay quienes consideran (muchos de ellos animados por creencias religiosas) que utilizar células madre totipotentes es como cometer un crimen, atentar contra la vida.

Sé muy bien que los valores morales son muy personales, y que es difícil poner de acuerdo a los que están a favor y a los que están en contra, aunque también pienso que todo se puede argumentar racional y compasivamente. Y tanto desde la racionalidad como desde la compasión, mi opinión es que debemos explorar con decisión este mundo científico, con la intención de utilizar lo antes posible (aunque aún transcurrirán algunos años en el mejor de los casos) todas sus posibilidades, *para combatir el dolor y las enfermedades*. Una mórula es un agregado de células, sin ninguna característica, sin ningún tipo de sistema nervioso, por ejemplo, que la asimile a un ser humano. No soy el único, como pueden ustedes suponer, que defiende estas investigaciones. Así, James Watson, el codescubridor de la estructura en doble hélice del ADN, ha escrito: «A mi juicio, sería una tragedia para la ciencia y para toda la gente que al final se pueda beneficiar de la terapia con células madre el que las consideraciones religiosas impidan las investigaciones». La naturaleza ha sido generosa con nosotros ofreciéndonos esta posibilidad. Aprovechémosla, eso sí, con sabiduría y precaución.

CEREBRO. Órgano extremadamente especializado y sensible, formado en los humanos por alrededor de un billón de células, de las cuales unos cien mil millones son

neuronas. Fruto de las actividades y relaciones de todas esas células son habilidades como la memoria o la inteligencia. El cerebro está organizado en partes diferentes, en las que predomina la simetría bilateral (hemisferios derecho e izquierdo, conectados por el cuerpo calloso y otros «puentes»). Su base consta de estructuras como la médula, que regula las funciones autónomas (como la respiración o la digestión), y el cerebelo, que se encarga de coordinar los movimientos; entre ambos se encuentra el sistema límbico, grupo de estructuras que intervienen en, por ejemplo, la conducta emotiva y la memoria a largo plazo. Aunque se avanzó extraordinariamente durante el siglo XX en su conocimiento, todavía lo que sabemos de él es sobre todo con respecto a la estructura y propiedades de sus partes, no como un conjunto capaz de, por ejemplo, tener conciencia de sí mismo. Tal vez durante el siglo XXI llegue esa «visión global», esa «teoría unitaria» del cerebro humano. [Véase NEURONA].

CHANEL N.º 5. En cierta ocasión (es una anécdota famosa), le preguntaron a Marilyn Monroe qué llevaba en la cama. «Solamente Chanel n.º 5», contestó.

Aunque sólo fuera por esto, este perfume seguramente merecería figurar en cualquier diccionario. Afortunadamente, yo puedo recurrir aquí a otras razones, más desapasionadas (no sé si objetivas).

Creado por Ernest Beaux, y puesto a disposición del público en 1921 por la diseñadora parisina Gabrielle «Coco» Chanel, como complemento a su colección de vestidos, Chanel n.º 5 fue el primer perfume en incorporar un ingrediente sintético en su composición, en la que, por otra parte, todavía predominaban los productos naturales (como un aceite extraído de las flores de un árbol de Filipinas: ylang-ylang). El ingrediente en cuestión es el compuesto $C_{11}H_{24}O$, perteneciente a la familia de los aldehídos, entre los cuales hay algunos que se caracterizan por poseer un perfume agradable (aldehídos aromáticos). Con Chanel n.º 5 el perfumista se convertía en científico. De manipulador de sustancias cuyo sólo nombre suscitaba pasiones o ensimismamientos (ámbar, pachulí, sándalo, bergamota, flor de lúpulo, agua de espliego o de rosas, esencia de neroli y nardo, jazmín o canela, bálsamos, mieles, frutas secas o confitadas, semillas de anís), pasó a experto en las propiedades de las combinaciones de los elementos de la tabla periódica; a maestro en volatilidades (en una mezcla de moléculas, la más volátil se evapora antes, y el perfumista-químico desea que la esencia de un perfume permanezca y trascienda todos los adornos olorosos de lo que la rodea).

Culminaba de esta manera —de la manera más íntima e intrascendente que imaginar se pueda, y precisamente por ello más definitiva— un proceso que se puso en marcha durante la segunda mitad del siglo XIX, con el gran desarrollo experimentado por la química orgánica. Un desarrollo que contó entre sus manifestaciones —y apoyos— con los extraordinarios avances que se realizaron en la ciencia y la técnica de los tintes. En 1856, William Perkin (1838-1907), un discípulo de Augustus Hofmann (1818-1892), a su vez antiguo estudiante de Justus von Liebig (1803-1873), uno de los «padres» de la química orgánica moderna, encontró, partiendo del alquitrán de hulla, una sustancia de color violeta que denominó mauveína (por su semejanza con el color de las corolas de la flor de malva; también se le denomina «violeta de Perkin»). Perkin era hijo de un tintorero y envió el producto a su padre, quien después de ensayarlo, lo empleó para teñir fibras artificiales. Fue el primer colorante sintético. El año siguiente, Perkin sintetizaba la anilina —que Friedler Runge (1794-1867) había aislado en 1834 también del alquitrán de hulla—, la base de la industria de los colorantes azoicos. Aquello significó el inicio de una importante industria, que no tardó demasiado en crecer rápidamente. En la historia de la industria química, y

probablemente en la historia de toda la industria directamente dependiente del conocimiento científico, la producción de tintes artificiales figura —en Alemania, la nación en la que alcanzó su máximo desarrollo— como la primera que alcanzó proporciones gigantescas. Sólo en exportaciones, se pasó de 58 millones de marcos en 1890 a 138 en 1902; 209 en 1912. Y no fue sólo la industria; la investigación y la enseñanza superior científica recibieron un poderoso estímulo, con la creación de laboratorios universitarios desde los que se intentaba satisfacer las demandas —de personal especializado y de nuevos conocimientos aplicables a la búsqueda de nuevas sustancias— de la industria. Así comenzó realmente la «institucionalización de la ciencia», el proceso que terminó proporcionando a la ciencia el papel, el valor, que tiene en el mundo contemporáneo. Y el mundo se hizo más colorido, más vistoso y plural. Fueron desapareciendo los mortecinos colores —«naturales», eso sí— que habían acompañado a la mayor parte de la especie humana desde más tiempo del que recuerda la historia. La ciencia química se detuvo sobre nuestros vestidos, iluminándolos. Más tarde, se posó en nuestras pieles, aromatizándolas de mil formas diferentes. Marilyn y Chanel n.º 5 nos lo recuerdan.

CIENCIAS SOCIALES. Una de las lecciones que aprendí en los escritos de Karl Popper —y antes en la vida, en la calle— es que no hay que insistir demasiado en los nombres; hasta cierto punto, claro. Viene esto a cuento porque no me importa —me parece bien, de hecho— que se utilice el nombre de «ciencias sociales» al hablar de disciplinas como la economía, sociología, política, historia, etc. Entiendo que la razón de semejante nombre se encuentra en el deseo de aproximarse lo más posible a las ciencias de la naturaleza. Este deseo de aproximación se manifiesta de muy diversas formas; el principal, mediante la utilización de técnicas matemáticas de análisis (estadísticas, por ejemplo). Se trata de ordenar y comparar datos mediante tales técnicas; de matematizar la disciplina en cuestión.

Pero una descripción matemática no es el único requisito que satisfacen las ciencias de la naturaleza. No hay ciencia —lo recuerdo una vez más— sin capacidad predictiva. Una capacidad que habitualmente se manifiesta mediante leyes matemáticas, universales dentro de su dominio de aplicabilidad. A veces, es cierto, también consideramos científicas ideas, teorías, que aún no han sido matematizadas (acaso nunca lo serán realmente), pero que poseen la habilidad, el poder de ordenar, mediante algunos principios generales, fenómenos observables, o de abrirnos dominios de la realidad que antes ignorábamos. El evolucionismo, o, aunque sea más debatible, las ideas psicoanalíticas de Freud (de ambas me ocupo en este diccionario), son ejemplos en este sentido: *El origen de las especies* de Darwin no contiene ninguna ecuación matemática.

No creo que las disciplinas sociales que mencionaba antes hayan llegado todavía, ni que esté claro que lo hagan algún día, a semejante situación. Su capacidad de predicción es muy pequeña. Existen algunas leyes, es verdad, pero hay grandes diferencias entre las pretensiones y ámbitos de aplicabilidad de esas leyes y las leyes físicas, químicas o biológicas. Incluso cuando se trata de tratamientos estadísticos. Seguramente es porque la sociedad es más compleja que los, en algunos sentidos, elementales —o fundamentales, ahistóricos— fenómenos naturales. Para advertir de semejante diferencia, no para, en modo alguno, disminuir el valor de esas disciplinas sociales, he incluido esta entrada.

CIENTÍFICO. Término introducido en inglés por el educador, filósofo y cultivador de diversas ciencias William Whewell (1794-1866), en su obra *The Philosophy of the Inductive Sciences* (1840). El momento en el que Whewell, al que el filósofo Karl Popper resucitaría de un injusto olvido más de un siglo después, introdujo este nombre es

significativo: aunque todavía un tanto tibiamente, ya estaba en marcha la *profesionalización* de la actividad científica, una de cuyas consecuencias fue la *especialización*, el centrarse en un área determinada de una disciplina científica concreta, una tendencia que no ha hecho sino crecer desde entonces, hasta llegar al momento actual en el que, de manera sin duda exagerada, alguien ha caracterizado al científico como aquel que sabe todo de nada, frente al filósofo que sabe nada de todo. Fue durante el siglo XIX cuando la expresión «filósofo de la naturaleza» se hizo cada vez menos apropiada para referirse al «hombre de ciencia» (y perdonen mis lectores el que recurra al género masculino; lo hago, consciente aunque dolorosamente también, porque tal era la expresión comúnmente empleada entonces, en una época en la que la ciencia estaba prácticamente vetada a las mujeres). La filosofía y la ciencia eran ya, claramente, actividades distintas, y además se hacía necesaria una expresión que englobase dentro de un mismo grupo a *especialistas* en, por ejemplo, matemáticas, física, química, geología; esto es, a matemáticos, físicos, químicos o geólogos.

Por muchos matices que yo esté introduciendo en este diccionario acerca del valor de la ciencia, no cabe duda de que éste es grande, por lo que nos enseña y porque a través de ella podemos librarnos de numerosos prejuicios. ¿Quiere esto decir que los científicos de los que me estoy ocupando ahora son personas «mejores» que los legos en este conjunto de disciplinas? Claro que ¿«mejores» en qué? En este punto quiero ser claro: ahora me quiero referir a «mejores» desde el punto de vista moral, ético; ciudadanos más responsables en un mundo que valora la actividad científica.

Cuando el científico era un filósofo natural, la ciencia no estaba excesivamente alejada, teóricamente al menos, de la excelencia moral. Los *virtuosi* (virtuosos), como se denominaban a sí mismos, de la revolución científica (siglos XVI y XVII) deseaban avanzar en el conocimiento analítico de la naturaleza, pero en general pensaban que de esta manera también serían mejores (moralmente hablando). Robert Boyle, uno de los científicos/filósofos de aquel tiempo (todavía aprendemos en el colegio alguna de las leyes físicas que llevan su nombre), incluía en uno de sus libros, *The Christian Virtuoso*, el siguiente aforismo: «Un *virtuoso* tiene cuatro ventajas: 1) que no es arrastrado por opiniones y estimaciones vulgares; 2) que puede valorar placeres y ocupaciones de naturaleza espiritual [...]; 3) que siempre puede encontrar ocupaciones agradables y útiles, y de esta manera escapar de los peligros a los que expone la ociosidad; 4) que sabe lo que es la dignidad y reconoce a un loco».

Pero en aquel tiempo, ya lejano, había pocos científicos, y la mayoría de ellos (ciertamente Boyle) se dedicaban a la ciencia porque gozaban de una posición social y recursos económicos tales que no tenían que trabajar para ganarse la vida (y, además, tampoco todo era de color de rosa, ni mucho menos). Hace mucho que esta situación ha cambiado (y nos debemos, por supuesto, alegrar de ello; de que el acceso a la investigación científica no sea exclusivo de unos pocos privilegiados). La ciencia es ya una profesión y los científicos, unos trabajadores, acaso con un cierto prestigio (no está claro que sea mayor que el que rodea a, por ejemplo, los banqueros, los arquitectos o los abogados), pero con problemas, percepciones y deseos parecidos a los de otros profesionales. El sociólogo Derek J. de la Solla Price (1922-1983) señaló hace ya bastantes años que el crecimiento exponencial del número de científicos significa que en la actualidad viven alrededor del noventa por ciento de los investigadores que han vivido jamás. (Se puede argumentar que este fenómeno ha ocurrido también en el pasado, pero la propia exponencialidad de la ley, junto al crecimiento de la población mundial, hace que las magnitudes sean cada vez más

aparatosas, lo que introduce una diferencia cuantitativa —y a la postre cualitativa también— significativa con épocas anteriores). Por este motivo, además de por la progresiva uniformización de intereses, gustos y valores que introduce en el mundo la difusión de las comunicaciones, los valores morales (en un sentido amplio) que comparten los científicos contemporáneos no se distinguen apenas de los de otros colectivos. De hecho, la enorme, cruel y difícilmente evitable competencia que existe en la ciencia actual no hace sino empeorar las cosas, desde el punto de vista del desprendimiento y participación en el espíritu que se suponía caracterizaba tradicionalmente a la ciencia.

Los ejemplos en este sentido son abundantes, especialmente en el ámbito de las ciencias biológicas. En este campo se ha producido una rápida comercialización a partir de la década de 1970, después de la introducción (1971) de las técnicas moleculares del ADN recombinante. Las aplicaciones potenciales del «troceado y pegado de genes» a un amplio rango de productos industriales, agrícolas y farmacéuticos estimularon la creación de cientos de nuevas compañías. Científicos universitarios participaron muy activamente en el nacimiento y desarrollo de muchas de estas compañías. Aunque este hecho no es, en sí mismo, nocivo (de hecho, es un fin que se persigue en muchos países, como un medio para aumentar el desarrollo industrial en el campo de la tecnología), siendo frecuente en algunas disciplinas, existen razones para creer que esta práctica se encuentra especialmente extendida en la biotecnología. Y estas conexiones merecen ser consideradas por varias razones. Entre las posibles consecuencias negativas se encuentran conflictos de intereses, cambio de dirección de la investigación, de áreas básicas a aplicadas, al igual que una erosión de la libertad en las comunicaciones científicas debido a intereses económicos. Naturalmente, también existen consecuencias positivas; como nuevas fuentes de apoyo a la investigación, mayor incentivo a la innovación científica, más facilidad para imaginar y hacer realidad nuevos productos comerciales beneficiosos, al igual que una transferencia tecnológica más rápida de las universidades y laboratorios gubernamentales a la industria.

Los conflictos de intereses a los que me acabo de referir pueden, en efecto, conducir a situaciones ante las cuales los científicos se vean obligados a adoptar modos de actuación que difieren de los aceptados tradicionalmente. La libertad que científicos universitarios con contratos industriales poseen para informar de sus resultados puede verse seriamente limitada, en tanto que tienen que cumplir con los lógicos intereses de la compañía que los apoya. El mismo procedimiento de evaluación por pares, un mecanismo absolutamente esencial para el funcionamiento de la investigación científica actual puede verse —lo está siendo— afectado. Aquellos que evalúan las solicitudes de ayudas, de las que germinan ideas innovadoras, están ligados por un código ético. Se espera de los evaluadores que protejan ideas todavía no publicadas que se mencionan en las solicitudes de ayudas. Pero muchos evaluadores tienen en la actualidad fuertes vínculos comerciales. En consecuencia, existen incentivos para romper estas normas y encauzar ideas innovadoras contenidas en las solicitudes al sector comercial.

De hecho, algunos de estos riesgos se encuentran mucho más cerca de lo que podría pensarse. Un debate en curso en el ámbito de la ingeniería genética e inmunología, es el de la disponibilidad de los denominados ratones *knock-out* —ratones de los que se ha eliminado un gen específico—. Sucede que ciertos científicos, entre los que se cuentan algunos de los más distinguidos, hacen todo lo posible por obstaculizar a sus colegas el acceso a estos animales tratados genéticamente. Es evidente que en el muy competitivo universo de la investigación genética no faltan buenas razones para comprender semejante comportamiento (obtener una estirpe de este tipo de ratones es muy complicado); más aún

si los científicos en cuestión tienen conexiones con la industria. Pero si tenemos en cuenta que estos animalitos son instrumentos preciosos para los inmunólogos, investigadores del cáncer y genetistas, y que de los resultados de estas disciplinas puede depender el bienestar futuro de millones de seres humanos, entonces resulta más difícil aceptar tales comportamientos, que benefician a algunos, pero dificultan las investigaciones de muchos otros.

Para evitar este tipo de comportamientos se están introduciendo algunos controles. Así el Instituto Nacional de la Salud estadounidense obliga a aquellos investigadores que financia a que compartan libremente los resultados de sus investigaciones, una vez publicados. Pero no existen todavía demasiados ejemplos en este sentido. Y en el caso de las industrias privadas, la situación es, evidentemente, por completo diferente.

No se piense, tampoco, que este «secretismo» es exclusivo de las ciencias biomédicas. Aparece también en otros campos. Hace algunos años, la comunidad de cristalógrafos se enfrentó con un problema similar al de los ratones *knockout*. Al igual que con los animales alterados genéticamente, las imágenes y datos de rayos X que revelan la estructura de macromoléculas pueden tardar años en analizarse, y afectaría a los científicos involucrados proporcionar estos datos a sus rivales, inmediatamente después de publicar el trabajo en el que se anuncian los resultados correspondientes. Desde 1971 existe un banco de datos de coordenadas cristalográficas en el Brookhaven National Laboratory, pero a finales de la década de los ochenta se hizo patente que una parte importante de los resultados relativos a macromoléculas (resultados ya publicados, *sin incluir las coordenadas*) no se depositaban allí. En consecuencia, la Unión Internacional de Cristalógrafos estableció una política que varios organismos (la revista *Science* y el Instituto Nacional de la Salud norteamericano, entre ellos) han adoptado: las coordenadas deben ser depositadas cuando se publica un artículo que anuncia la estructura de un cristal, pero el investigador tiene derecho a exigir que esos datos se mantengan secretos durante un año.

Éstas son algunas características de la ciencia actual que intervienen en los comportamientos que los científicos deben adoptar. Nos pueden gustar o no; en este último caso, en ciertas situaciones podremos introducir condicionantes que aminoren algunas, al menos, de las situaciones que entendemos como nocivas, pero en otros casos probablemente nos será imposible. Hemos construido —y, por el momento preferido— un mundo, político y económico que lleva asociados una serie de comportamientos, de organizaciones, de estructuras, que penetran en todos los recovecos de nuestras sociedades, de nuestras vidas, de todo aquello que hemos inventado y que nos enorgullecemos de llamar nuestro. Como la ciencia. ¿Por qué iba a estar al margen de nuestros modelos políticos, de nuestras ideologías económicas, incluso de nuestras modas, de nuestras filias o de nuestras fobias? ¿Por qué nos deleitamos en denominarla una actividad racional? ¿Es que no es racional el que nuestros modelos sociales afecten a nuestros modos de comportamiento?

CLONACIÓN. Véase DOLLY.

COLESTEROL. El colesterol es, de alguna manera, para muchas personas, prácticamente el único contacto o interés, *consciente*, que tienen con la ciencia (aunque seguro que, como en el personaje de Molière —que hablaba prosa sin saberlo— ignorándolo). A ellas va destinada esta voz, para ayudarlas a vislumbrar todo lo que hay de ciencia detrás de esas etiquetas o informaciones, que con tanto afán buscan, relativas a los contenidos de los alimentos; para que comprendan la complejidad y racionalidad que puede

existir detrás del dato más nimio.

Lo primero que hay que señalar es que el colesterol (que responde a la fórmula química $C_{27}H_{46}O$) no es en sí una toxina peligrosa, sino una molécula de tamaño medio que cumple importantes funciones. Es, por ejemplo, un componente esencial de las células, cuya temperatura ayuda a estabilizar. También es una parte importante de las membranas del sistema nervioso, el cerebro, la espina dorsal y los nervios periféricos. Tiene que ver con hormonas importantes, como las hormonas sexuales femenina y masculina, el estradiol y la testosterona, al igual que con la vitamina D, que necesitamos para producir calcio y formar nuestros huesos. Casi todos los tejidos de nuestro cuerpo son capaces de producir colesterol, pero el hígado y los intestinos son los que lo producen en mayor cantidad. Necesitamos colesterol para producir la bilis con la que digerimos las grasas de nuestros alimentos.

Aunque es esencial para el organismo, demasiado colesterol produce acumulaciones en las arterias, obstáculos que, como sabemos, tienen amargas consecuencias. Las causas de un índice de colesterol mayor del normal se encuentran en, por encima de todo, factores hereditarios; después, en elementos como la presión arterial, el estrés, el tabaco, la obesidad o el colesterol que recibimos a través de lo que comemos.

Sobre los factores hereditarios, por el momento poco podemos hacer; tampoco es demasiado fácil alterar las presiones que nos hacen la vida más complicada, pero sí podemos dejar de fumar y modificar nuestros hábitos alimentarios. Tomar otros alimentos parece ser una posibilidad más aceptable que abandonar el tabaco, y por ello, cínica o por lo menos parcialmente, se ha centrado en la alimentación la lucha contra el colesterol superfluo.

Pero las cosas, el mundo orgánico y fisiológico del que somos parte y manifestación, no son tan sencillas: solamente una parte muy pequeña del colesterol que tenemos en nuestro cuerpo procede de los alimentos que ingerimos: producimos alrededor de cuatro veces más colesterol del que podemos absorber a través de nuestra alimentación, incluso aunque tomemos productos ricos en él, como los huevos. El colesterol es tan importante para nuestro cuerpo que, fruto de la actividad de células, intestinos e hígado, producimos más o menos un gramo de él cada día. ¿Debemos, entonces, dejar de preocuparnos por lo que comemos? No, por supuesto; por ejemplo, las grasas y aceites que tomamos, en sí mismos no ricos en colesterol, tienen el efecto de estimular su producción en nuestro cuerpo. Esto ocurre porque para digerir los alimentos, nuestro organismo produce ácidos biliares, de los que forma parte el colesterol. Cuanto más grasas tomamos, más bilis necesita producir el hígado, y, en consecuencia, más colesterol generamos. Por otra parte, existen alimentos (como el ajo, el alcohol —¡pero no se excedan!—, y otros como la avena y las judías, que contienen muchas fibras solubles) que pueden reducir el nivel de colesterol en la sangre hasta en un diez por ciento.

El colesterol, por tanto, es un amigo peligroso. Amigo, porque lo necesitamos, peligroso porque puede acarrear problemas. Es difícil saber en dónde se encuentra la frontera. Si lo reducimos demasiado de nuestras dietas podemos tener problemas. Un estudio realizado en 1992 en Suecia, y en el que se siguió durante veinte años a cincuenta mil personas mayores de cuarenta y cinco años, reveló que los hombres que tenían un nivel de colesterol bajo en la sangre no mostraban un índice de fallecimientos mucho menor que los de niveles altos, aunque éstos ciertamente tenían más probabilidades de morir de ataques cardíacos (pero menos de suicidarse o fallecer prematuramente en accidentes). Curiosamente, no se encontró estos efectos en las mujeres. Una muestra más de que todavía

queda mucho por saber.

CROMOSOMAS. Veáse ADN.

D

DARWIN (Charles). 1809-1882. La historia de la ciencia no es parca en ejemplos de investigadores que introdujeron ideas, observaciones o teorías magníficas, de primerísimo orden, pero de muy pocos se puede decir lo que se puede manifestar a propósito de Darwin: que generó una revolución intelectual que fue mucho más allá de, en su caso, los confines de la biología, provocando el derrumbamiento de algunas de las creencias más fundamentales de su época. Creencias como la de que cada especie fue creada individualmente; y al socavar tal idea, hubo que concluir que los humanos no somos productos especiales de la creación, sino que hemos evolucionado de acuerdo a principios que operan en el resto del mundo viviente. Si Copérnico quitó a nuestro hábitat, la Tierra, del centro del universo, Darwin despojó a la especie humana del lugar privilegiado que hasta entonces había ocupado en la naturaleza. Tal vez para algunos esto haya rebajado nuestra «categoría», pero está bien que así sea, puesto que una de las consecuencias de tal «degradación» ha sido la de aproximarnos más a los «otros animales»; al verlos como esencialmente no diferentes de nosotros podremos, tal vez, relacionarnos con ellos más compasiva y —no hay paradoja aunque lo parezca— más humanamente también.

Miembro de una familia distinguida y acomodada (no tuvo nunca necesidad de ganarse la vida), hijo y nieto de médicos, Charles Darwin parecía destinado a aprender y, acaso, ejercer la medicina, en la que fue matriculado en la Universidad de Edimburgo. La encontró, sin embargo, demasiado aburrida, resultándole, además, difícil soportar las clases en las que debía asistir a operaciones, realizadas sin anestesia. De su estancia en Edimburgo le quedaron excursiones geológicas y visitas a su bahía, donde recogía animales marinos.

La siguiente opción que le sugirió su padre fue tomar las órdenes en la Iglesia de Inglaterra. Aunque tenía algunas dudas sobre los 39 artículos de esa iglesia, logró superarlas; más tarde escribió: «Como entonces no tenía la menor duda sobre la verdad estricta y literal de cada palabra de la Biblia, me convencí en seguida de que nuestro Credo debía ser aceptado íntegramente». Para ingresar en la Iglesia, tenía que graduarse en alguna de las universidades inglesas; eligió Cambridge. Allí estudió teología y las disciplinas clásicas, además de matemáticas, pero también pudo profundizar en las ciencias naturales: se relacionó con el catedrático de Botánica, John Henslow (1796-1861), quien le animó a convertirse en naturalista.

Una vez graduado, en 1831, Henslow le ayudó para que se uniese a la expedición que iba a tener lugar con un bergantín de la Marina británica, el *Beagle*, para cartografiar América del Sur y las islas de los mares del Sur. El capitán del barco, Robert Fitzroy (1805-1865), andaba buscando un naturalista para que se sumase al viaje. Darwin obtuvo el puesto.

El 27 de diciembre de 1831, el joven Charles dejó Inglaterra a bordo del *Beagle*, iniciando el viaje alrededor del mundo que le proporcionaría sus primeras evidencias de la evolución. Regresó cinco años más tarde, habiendo renunciado entretanto a la idea de convertirse en clérigo [sobre Darwin y la religión, véase DIOS], y en seguida inició una serie de investigaciones dirigidas a descubrir si era imaginable un mecanismo natural que hiciese más dúctiles, menos rígidas a las especies. En 1838 se le ocurrió la idea básica de la selección natural, la idea de que no hay una tendencia intrínseca que obligue a las especies a evolucionar en una dirección determinada; de que no existe una fuerza que empuje a las especies a avanzar según una jerarquía predeterminada de complejidad, ni tampoco una

escala evolutiva por la que deban ascender todas las especies. Se podía hablar de «evolución de las especies», es cierto, pero se trataba de un proceso básicamente abierto, sin final único. Si se trasladan especies a lugares diferentes y aislados, cada una de ellas cambiará sin referencia a las otras, y el resultado sería un grupo de especies distintas aunque relacionadas «filialmente». Los diferentes pájaros pinzones que había observado en las islas Galápagos, cada grupo adaptado a las condiciones específicas de la isla en la que se encontraba, se ajustaban perfectamente a este modelo.

Existe una carta, dirigida el 11 de enero de 1844 al biólogo Joseph Dalton Hooker (1817-1911), en la que Darwin expresó con una gran franqueza, no exenta de un cierto dramatismo, el origen de sus ideas evolutivas, y cómo reaccionó inicialmente ante ellas. Merece la pena reproducir sus pasajes más interesantes:

Yo estaba tan sorprendido con la distribución de los organismos de las Galápagos etc., etc., y con el carácter de los mamíferos fósiles de América, etc., etc., que decidí reunir a ciegas toda suerte de hechos, que pudiesen ocurrir en cualquier forma en las especies existentes. He leído montones de libros de agricultura y horticultura y nunca he dejado de reunir datos. Al fin han surgido destellos de luz, y estoy casi convencido (muy al contrario de la opinión con que empecé) de que las especies (es como confesar un crimen) no son inmutables. El cielo me ha preservado del sinsentido de Lamarck de «una tendencia al progreso», «adaptación desde el lento deseo de los animales».

Es «como confesar un crimen», decía.

Otro texto, éste no agrícola ni de horticultura, que influyó en la manera en que Darwin terminó entendiendo el mecanismo evolutivo fue el libro de Thomas Robert Malthus (1766-1834), *Ensayo sobre el principio de población*. El concepto de lucha por la existencia descrito por Malthus encajaba bien con procesos que se daban en la naturaleza.

En octubre de 1838 —escribió Darwin en su Autobiografía—, es decir, quince meses después de haber comenzado mi indagación sistemática, sucedió que leí para distraerme el Population de Malthus, y por estar bien preparado para apreciar la lucha por la existencia que se libra en todas partes debido a mi prolongada observación de los hábitos de los animales y las plantas, en seguida me di cuenta de que bajo estas condiciones las variaciones favorables tenderían a conservarse y las desfavorables a destruirse. El resultado de esto sería una nueva especie.

Al adoptar este mecanismo, con claras implicaciones políticas y sociales, Darwin contribuyó a la creación de la ideología del individualismo de la libre empresa, que defiende la función benéfica, e inevitable (*científicamente inevitable*, argumentan muchos a partir de las enseñanzas de Darwin), de la competencia entre individuos. «Darwinismo social» se ha denominado a esta filosofía científico-social.

Durante las dos décadas siguientes a la concepción de la idea, todavía bastante borrosa, de la evolución, Darwin trabajó en secreto en su teoría, primero en Londres y a partir de 1842 en Down, una localidad campestre no lejos de la capital inglesa en la que intentaba controlar su mala salud, informando sólo a unos pocos amigos de sus ideas, recopilando incansablemente datos zoológicos, botánicos y geológicos. En la década de 1850 comenzó a escribir un amplio estudio en varios volúmenes de su teoría, pero este proceso fue interrumpido el 18 de junio de 1858, cuando recibió un artículo («Sobre la tendencia de las variedades a apartarse indefinidamente del tipo original») de Alfred Russel Wallace (1823-1913) en el que se apuntaba una teoría muy similar a la suya. Darwin preparó extractos de su propia teoría para su publicación, junto con el artículo de Wallace,

en la revista de la Sociedad Linneana. Casi inmediatamente, empezó a escribir una exposición de su teoría, que fue publicada en noviembre de 1859 con el título *On the Origin of Species (Sobre el origen de las especies)*, una de las obras cumbres de la literatura científica universal. Da idea del interés que suscitó el libro el que el mismo día de su publicación se agotó la primera edición; en 1876 se habían vendido en Gran Bretaña 16 000 ejemplares. Entre sus otros libros se encuentran: *Diario de investigaciones en la geología e historia natural de los diversos países visitados durante los viajes del HMS Beagle* (1839, 1845), *La estructura y distribución de arrecifes de coral* (1842), *Observaciones geológicas sobre América del Sur* (1846), *Fertilización de las orquídeas* (1862), *El origen del hombre* (1871) y *La expresión de las emociones en los animales y en el hombre* (1872).

A pesar del éxito popular de *Sobre el origen de las especies*, la teoría de la selección natural de Darwin siguió siendo altamente controvertida durante el final del siglo XIX. Tan sólo un puñado de biólogos se tomaron en serio el mecanismo darwiniano, mientras que una amplia mayoría optó por diferentes ideas antidarwinianas y relegó la selección natural como un factor secundario y puramente negativo. Detrás de este hecho se encuentra el fracaso de Darwin en convencer a sus contemporáneos de que la selección natural era un mecanismo adecuado para explicar el proceso evolutivo. Y es que Darwin descubrió el hecho de la existencia de la selección natural, y contribuyó notablemente a dilucidar la historia de la evolución animal, pero apenas pudo más que hacer vagas sugerencias acerca de por qué surgen variaciones hereditarias entre organismos y cómo se transmiten éstas de generación en generación; es decir, carecía de una teoría de la herencia. Las teorías de la herencia que prevalecían por entonces sostenían ideas como la de que las características de los progenitores se mezclan en los hijos; pero si esto era así sería difícil explicar cómo podían mantenerse, sin diluirse con el transcurso de las generaciones, las características favorables.

La pieza de que carecía Darwin era la genética. De hecho, pudo haber dispuesto de la esencia de ella, puesto que el artículo fundacional del monje agustino Gregor Mendel (1822-1884), en el que formuló los principios básicos de la teoría de la herencia, a la que llegó a través de los experimentos que realizó con guisantes en el jardín de su monasterio, en Brno (República Checa), se publicó en 1866. Pero las investigaciones de Mendel apenas fueron conocidas, desde luego no por Darwin, y cuando fueron redescubiertas, simultáneamente, en 1900, por el holandés Hugo de Vries (1848-1935) y el alemán Carl Correns (1864-1935), el autor de *Sobre el origen de las especies* ya había muerto.

En cualquier caso, para explicar la selección natural no es suficiente con una teoría elemental de la herencia. De Vries manejó la idea de que las variaciones se producen debido a mutaciones genéticas, concluyendo que una nueva especie se origina de repente, a partir de una especie ya existente, sin preparación visible y sin transición. Desde este punto de vista, la selección natural podía perder muchas de sus funciones. De hecho, la integración de la genética —clásica y molecular— con la selección natural ha sido, y continúa siendo, un proceso, un programa de investigación, complejo y desde luego todavía abierto. Utilizando técnicas de análisis de poblaciones, genéticos teóricos como Ronald A. Fisher (1890-1962; en 1930 publicó un libro básico: *Teoría genética de la selección natural*) demostraron matemáticamente que la selección natural puede producir, actuando acumulativamente sobre pequeñas poblaciones, cambios evolutivos importantes en formas y funciones. Naturalistas como Ernst Mayr (1904-2005) y Julian Huxley (1887-1975) se interesaron por problemas de biogeografía y reivindicaron lo adecuado de las conclusiones que Darwin había extraído de sus estudios en las islas Galápagos. Sus libros, *Sistemática y*

el origen de las especies, de Mayr, y *Evolución: la síntesis moderna*, de Huxley (ambos aparecieron en 1942), son considerados como dos clásicos en la fundación de la moderna forma sintética del evolucionismo, teoría sintética o síntesis evolutiva, en la que se subraya el papel de la selección natural, la adaptación y el estudio de la diversidad. Como también es clásica la obra de Theodosius Dobzhansky (1900-1975), *Genética y el origen de las especies* (1937).

No todos aceptan, sin embargo, la teoría sintética; para ello se han utilizado argumentos como que los descubrimientos de la biología molecular son incompatibles con el darwinismo, o que los depósitos fósiles (como el de Burgess Shale, popularizado por Stephen Jay Gould (1941-2002) en uno de sus libros: *La vida maravillosa*) muestran una discontinuidad evolutiva difícilmente compatible con el gradualismo darwiniano.

Sería imposible, no obstante, resumir en los estrechos límites de esta entrada las múltiples tendencias y problemas del evolucionismo contemporáneo (semejante tarea requeriría de un diccionario para ella sola). Las siguientes palabras de uno de los darwinistas más ilustres del presente siglo, Ernst Mayr (en su libro, *Una larga controversia: Darwin y el darwinismo* [1991]), me parece que resumen, cabalmente, la situación actual: «Algunos críticos han acusado a los arquitectos de la síntesis evolutiva de pretender haber resuelto todos los problemas pendientes de la evolución. Esta acusación es bastante absurda. No conozco un solo evolucionista que afirme semejante cosa. Todo lo que dijeron los defensores de la síntesis es que habían llegado a una elaboración del paradigma darwiniano que parecía ser lo suficientemente robusta como para que las incógnitas que aún quedaban no la pusieran en peligro. Nadie negó que quedasen muchas cuestiones sin resolver, pero existía una sensación de que, independientemente de cuál fuera la respuesta a estas preguntas, sería consecuente con el paradigma darwiniano. Hasta ahora, en mi opinión, esta confianza no ha sido defraudada».

DEMOCRACIA Y CIENCIA. A todos aquellos que consideran que la democracia constituye uno de los grandes valores de la humanidad, y que, al mismo tiempo, opinan que la ciencia es uno de los productos más valiosos y característicos de la especie humana, les gustaría, no me cabe duda, poder vincular el progreso científico con el pleno ejercicio de los derechos civiles, tal y como los entiende una sociedad democrática; desearían, en otras palabras, que no hubiese ciencia sin libertades civiles. Abundan los ejemplos de manifestaciones en este sentido: en sus *Lecciones sobre la filosofía de la historia*, y tras afirmar que «no debemos buscar ciencia ni arte en Esparta, sino sólo en Atenas», Hegel afirmaba que «la ciencia y el arte no pueden producirse sino allí donde la individualidad puede llegar a una concepción libre».

Pero Hegel era un filósofo, y no de los más interesados en la ciencia. Es preferible abordar la cuestión de ciencia y democracia desde una perspectiva más cercana a las ideas de los propios científicos. Existe un ejemplo especialmente educativo, y, además, próximo históricamente: el de la ciencia nuclear y el régimen nacional-socialista implantado en Alemania por Adolf Hitler (1889-1945).

Samuel Goudsmit (1902-1978), un físico de origen holandés cuyo prestigio científico se debe a haber introducido, junto con George Uhlenbeck (1900-1988), el concepto de espín en la física cuántica, escribió en un libro en el que resumía su experiencia como el principal responsable de una misión, bautizada «Alsos», que el ejército estadounidense organizó en Europa, cuando las fuerzas aliadas estaban invadiendo en 1944 los dominios nazis, para obtener información de hasta dónde había llegado la ciencia germana, así como para capturar a científicos alemanes, que «los hechos demuestran de

manera bastante concluyente que la ciencia bajo el fascismo no fue, y con toda probabilidad nunca será, igual a la ciencia en una democracia».

Como el propio Goudsmit reconocía, el principal punto de apoyo de su afirmación se encontraba en el ámbito de la física nuclear; dicho de manera más escueta y cruda: en el hecho de que los aliados consiguieron construir una bomba atómica y Alemania no. Para el director de «Alsos» los alemanes fracasaron porque su ciencia estuvo disminuida por el dogma nazi. Desgraciadamente, sin embargo, y como ocurre con casi todas las historias de buenos y malos, los hechos no son tan diáfanos, tan determinantes como les gustaría a quienes buscan argumentos en favor de la democracia en todos los rincones, o como pretendía un holandés de origen judío como Goudsmit, que perdió a sus padres en el campo de concentración de Auschwitz, mientras él se encontraba ejerciendo su profesión en universidades del otro lado del Atlántico.

Cuando se pretende entender por qué los científicos alemanes no produjeron armas nucleares, hay que tomar en consideración muchos más elementos que los que tenía en cuenta Goudsmit. En primer lugar, el que a lo largo de 1940 y 1941 era fácil perder de vista en Alemania la relación entre la investigación en fisión nuclear y armamentos. La guerra parecía ganada y, por consiguiente, difícilmente habría tiempo para emplear explosivos atómicos. Desviar recursos importantes hacia la física e ingeniería nucleares parecía un derroche injustificado. Y sin grandes recursos, fabricar una bomba atómica en los años cuarenta era un sueño imposible. Los científicos nucleares germanos nunca llegaron a tener acceso a recursos de ese tipo; sí, por el contrario, sus colegas que trabajaron en Estados Unidos para el proyecto Manhattan. No es, además, irrelevante para la presente discusión recordar que, como también se explica en otra entrada del presente diccionario, el proyecto nuclear estadounidense estuvo bajo el control de las Fuerzas Armadas, una institución en la que el régimen interno no es, precisamente, esencialmente democrático. Los científicos que trabajaron para el proyecto Manhattan lo hicieron en unas condiciones que limitaban severamente su libertad; la norma impuesta por el general Leslie Groves (1896-1970), su director ejecutivo, era que la clave del éxito se encontraba en la compartimentación, en que cada uno supiese lo que debía saber y nada más. Tal vez por ello, ni siquiera el Congreso estuvo informado de la existencia, o controló —otra regla de oro en una democracia— los trabajos y presupuestos de semejante macroproyecto.

Para muchos de nosotros sería muy gratificante aceptar que ciencia y fascismo son contradictorios, que únicamente en un ambiente democrático puede florecer el conocimiento científico. No parece, sin embargo, que tales asociaciones sean correctas. El caso de la investigación nuclear así parece indicarlo, pero existen otros ejemplos y argumentos. Los procedimientos, con frecuencia, poco democráticos, de los propios científicos. Comportamientos poco menos que dictatoriales de un director de un laboratorio, de un instituto teórico o de un programa de investigación, no son extraños en la historia de la ciencia —antigua o contemporánea—, una historia que cuenta entre algunos de sus grandes protagonistas con personajes cuyo respeto por los derechos de los demás no estaba muy desarrollado que digamos.

Y no se trata sólo de la ciencia. Parece que, desgraciadamente, no existe una conexión obligada entre la excelencia y la democracia. En una entrevista, Ernst Gombrich (1909), el gran historiador del arte, señalaba que «no hay vinculación directa entre la democracia y el racionalismo, por un lado, y el logro artístico por otro». Y añadía: «Hay grandes obras de arte creadas por sociedades que ciertamente no pueden llamarse abiertas. No hay una correlación simple o directa. Muchas sociedades que no pueden llamarse

abiertas han producido arte magnífico. La libertad crea un mejor clima para el arte y permite alcanzar unos toques de excelencia, pero no es una condición indispensable para el genio». [Véase DISEÑO INTELIGENTE].

DERIVA DE LOS CONTINENTES. Si algo nos ha enseñado la ciencia es a ver cambio donde antes identificábamos permanencia y estatismo. Hubo un tiempo —ya lo he mencionado— en que se pensaba que la Tierra estaba inmóvil en el centro del universo. En el siglo XVI, Copérnico situó en aquel privilegiado lugar al Sol. Sus sucesores, los que realmente produjeron la revolución copernicana, Kepler, Galileo y Newton, sentaron las bases para que terminásemos dotando de movimiento a todos los cuerpos existentes en el cosmos. Todavía Newton pretendió retener un espacio absoluto, que sería algo así como el *sensorio* de Dios en este terrenal mundo nuestro. Y, aproximadamente dos siglos más tarde, numerosos físicos, el holandés Hendrik Lorentz (1853-1928) a la cabeza, intentaron que el éter (o campo) electromagnético desempeñase un papel análogo, aunque desprovisto de connotaciones teocráticas, al espacio absoluto newtoniano. La relatividad especial einsteniana acabó con aquellas ideas y hoy lo permanente sólo se encuentra en las propias leyes a las que obedecen los mutables fenómenos naturales.

No obstante, todavía existían otros escenarios, sin duda más modestos, en los que los humanos creíamos ver una, aunque temporal, agradable permanencia. La geografía de los continentes de la Tierra era uno de esos lugares. Hasta nuestro siglo, y aunque, al igual que en otros casos, se pueden encontrar algunos precursores de las ideas contemporáneas, se creía que, básicamente, los continentes habían estado siempre en el lugar en el que se encuentran en la actualidad y con similar geografía. Fue el meteorólogo y geofísico alemán Alfred Wegener (1880-1930) quien con más argumentos e insistencia propuso, primero en 1912 y después en su libro *El origen de los continentes y océanos* (1915), la idea de que los continentes se encuentran en movimiento; que en el periodo Pérmico, esto es, hace más de 250 millones de años, y durante el Triásico (hace entre 245 y 208 millones de años), los continentes que conocemos estaban agrupados en un gran supercontinente, Pangea. Más tarde, en el Jurásico (208-144 millones de años), apareció la primera fisura entre Europa y África, iniciando un proceso que ha conducido a la geografía continental actual.

En su, ya clásico, libro, Wegener, un personaje extraordinariamente atractivo (combinó sus intereses académicos con la exploración polar, que aplicaba a investigaciones meteorológicas y geológicas; falleció mientras cruzaba el casquete ártico de Groenlandia, en lo que era su cuarta expedición polar), se refirió al origen de sus ideas en los términos siguientes: «Tuve la primera intuición de la movilidad continental ya en 1910, cuando, al contemplar un mapamundi, me impresionó la coincidencia de las costas de ambos lados del Atlántico; pero por el momento no hice caso de esta idea, que me pareció inverosímil. En el otoño de 1911 conocí, a través de un trabajo de síntesis que cayó en mis manos por casualidad, los resultados paleontológicos, para mí desconocidos hasta entonces, referentes a las primitivas conexiones continentales entre Brasil y África. Esto me llevó a un examen atento, aunque por el momento fugaz, de los resultados de las investigaciones geológicas y paleontológicas referidas a esta cuestión, investigaciones que produjeron en seguida confirmaciones tan importantes que hicieron arraigar en mí el convencimiento de que eran básicamente correctas».

La simple observación de la similitud entre los perfiles oriental y occidental de, respectivamente, Sudamérica y África no era suficiente para concluir que en el pasado habían formado parte de un mismo continente (en 1620, Francis Bacon, por ejemplo, ya se había dado cuenta de tal coincidencia, pero no pasó de ahí). Tampoco era nueva la

observación del «parentesco» animal y vegetal entre ambos lugares, deducido de algunos restos fósiles encontrados a ambos lados del Atlántico. Una posible explicación que se manejó antes, e incluso después, de Wegener fue la de que habían existido «puentes continentales» que unían ambos continentes pero que más tarde se hundieron en el océano. Por allí pudieron haber transitado animales y semillas.

Wegener profundizó en estas relaciones paleontológicas, pero sin recurrir a la hipótesis de los puentes intercontinentales. Encontraba, por ejemplo, que la distribución geográfica de las lombrices de tierra contenía buenos argumentos en favor de la teoría de la deriva de los continentes. También se preguntó por qué se produjeron glaciaciones en ciertas épocas del pasado en continentes que ahora son tropicales. Fue, en suma, el extenso conjunto de observaciones y argumentaciones paleontológicas y biológicas, paleoclimáticas, geológicas y geodésicas, entrelazadas todas por el hilo común de la interpretación movilista, lo que dotaba a ésta de su fuerza. Ahora bien, durante casi medio siglo no fueron demasiados los que aceptaban semejantes puntos de vista. Existía un problema fundamental: ¿mediante qué mecanismo se desplazan los continentes? (tampoco, recordemos, poseía Darwin una teoría de la herencia que pudiese sustentar su teoría de la evolución y selección natural).

«La determinación y la comprobación de las traslaciones continentales relativas se han realizado —escribía Wegener en el antepenúltimo capítulo de su libro— de una forma puramente empírica, a partir de la totalidad de los datos geodésicos, geofísicos, biológicos y paleoclimáticos, pero sin haber hecho ninguna consideración sobre el origen de estos procesos. Éste es el método inductivo, método que las ciencias naturales se ven forzadas a emplear en la mayoría de los casos. Las fórmulas de las leyes de la gravedad y de las órbitas planetarias se determinaron en un principio de una forma puramente inductiva, por observación; sólo después apareció Newton y mostró cómo derivar estas leyes deductivamente a partir de la fórmula única de la gravitación universal». Y añadía: «Aún no ha aparecido el Newton de la teoría de los desplazamientos».

El que Wegener se diese cuenta de que todavía no había aparecido el «Newton de la teoría de los desplazamientos», no quiere decir que se abstuviese de proponer algún mecanismo que explicase, al menos *grosso modo*, el movimiento continental. Utilizando diversos datos y teorías geofísicas argumentaba que los continentes, que consideraba formados por *sial* (silicio y aluminio, que corresponden a rocas de granito) «flotaban», cual icebergs, sobre los más densos fondos marinos y continentales (formados por *sima*, esto es, silicio y magnesio, o rocas de basalto), y que su movimiento se debía a fuerzas de marea producidas por la Luna, junto a una fuerza centrífuga debida a la rotación de la Tierra. Basándose en tales teorías, Wegener estimaba que la distancia entre Escocia y Groenlandia debía aumentar entre 18 y 36 metros por año (la teoría actual, de la que me ocupo inmediatamente, da una estimación de unos pocos centímetros).

Este mecanismo no convenció, por buenas razones, a los geólogos contemporáneos a Wegener, ni tampoco a los de las décadas siguientes. Ha sido tras la segunda guerra mundial, con el avance experimentado por la investigación oceanográfica, impulsada por el deseo de las grandes potencias de conocer la geografía y geología de los fondos marinos (uno de los momentos culminantes de estos trabajos fue cuando el navío estadounidense *Glomar Challenger* fue capaz de obtener muestras a mil metros de profundidad por debajo del fondo oceánico). Cuando Wegener vivía apenas se sabía algo de las capas sobre las que se asientan los fondos de los océanos.

Los estudios sobre paleomagnetismo y dorsales oceánicas (estructuras que se

originan en la litosfera, la capa más superficial de la Tierra, como consecuencia de corrientes de convección ascendentes en la astenosfera, la parte del manto superior (terráqueo en estado de semifusión) realizados durante el Año Geofísico Internacional 1957 marcaron el punto de partida efectivo de una proliferación de datos que condujeron (gracias sobre todo a geólogos y geofísicos estadounidenses, como Robert S. Dietz (1914-1995), Harry H. Hess (1906-1969), Drummond H. Matthews (1931-1997), Frederic J. Vine (1939) y J. Tuzo Wilson (1908-1993), aunque también habría que mencionar, en una reconstrucción más detallada, al británico Arthur Holmes (1890-1965) y a los austriacos Otto Ampferer y Robert Schwinner) a una nueva síntesis, denominada «tectónica de placas». En esta nueva teoría no son sólo los continentes los que se mueven, sino zonas más grandes de la corteza terrestre («placas»), que incluyen partes de los fondos oceánicos al igual que masas continentales. Las placas —seis grandes y varias más pequeñas— se mueven sobre estratos más profundos, siendo la fuerza motriz corrientes lentas de magma viscoso.

El océano Atlántico puede servir para ilustrar la nueva imagen movilista: el continente americano estuvo unido en el pasado a Euro-África, pero ambos comenzaron a separarse durante el Mesozoico (hace 245-265 millones de años). Hasta aquí nada difiere de las ideas de Wegener, pero para éste la dorsal atlántica, la cadena montañosa situada en mitad del océano, y en cuyo centro existe un profundo valle, o, si se prefiere, una hendidura o grieta, no representaba nada en especial, simplemente marcaba el lugar de separación de los continentes. Para la tectónica de placas, sin embargo, esa dorsal significa otra cosa: es una zona dotada de, podríamos decir, vida: la frontera entre dos placas, por donde se crea constantemente nuevo fondo oceánico como fruto del flujo de magma que surge de las profundidades de la corteza terrestre (el magma es el material fundido que existe en el interior de la Tierra, del que se forman las rocas ígneas; la lava es magma que ha alcanzado la superficie y que se solidifica perdiendo algunos de sus componentes en el camino). El ritmo al que se crea ese fondo es el mismo que el que corresponde al aumento de la distancia entre los tres continentes (América, Europa y África). Para Wegener el fondo marino era viejo, mientras que para la tectónica de placas es joven; más joven en el centro, aumentando su edad según nos alejamos de la dorsal atlántica, o, en general, de la frontera que separa a dos placas.

El desarrollo de esta imagen no ha surgido únicamente del análisis de los fondos marinos; un apoyo muy importante provino del paleomagnetismo, esto es, del estudio de magnetismo «remanente» de las rocas, de la imanación que queda en las rocas cuando se forman, solidificándose, a partir del magma. La dinámica concreta es la siguiente: lava basáltica fluye desde una zona profunda esparciéndose por el fondo marino. Según se va formando roca por enfriamiento, la temperatura desciende de mil a quinientos grados centígrados. Pequeñas cantidades de hierro (óxidos normalmente) existentes en las rocas actúan como imanes. Como la lava cristaliza por debajo de los 500 °C, la imanación queda bloqueada en la roca, que de esta manera registra la dirección de los polos magnéticos de la Tierra en el momento en que se solidificó.

Si el campo magnético terrestre no hubiese cambiado a lo largo del tiempo, esa imanación remanente sería probablemente de escasa utilidad para comprobar la teoría de la tectónica de placas. Ocurre, no obstante, que el campo magnético terrestre no se ha mantenido constante, sino que ha variado, invirtiendo incluso su sentido (el Polo Norte se convierte, magnéticamente, en Polo Sur, y viceversa; sabemos, mediante medidas tomadas en los observatorios magnéticos, que el campo magnético de la Tierra ha decrecido en los

últimos 140 años; probablemente nos encontremos en camino hacia una nueva inversión magnética, que se producirá cuando el campo magnético terrestre disminuya hasta anularse y después aumente pero con una polaridad de signo contrario). Y en este punto aparece la tectónica de placas: como a ambos lados de las líneas marcadas por las dorsales va surgiendo materia, al solidificarse las nuevas rocas lo hacen de acuerdo con el campo magnético existente en ese momento en la Tierra. Con el transcurso del tiempo aparecen bandas simétricas (con relación a la línea marcada por la dorsal), cada pareja con la misma imantación. Fueron sobre todo los trabajos de Vine y Matthews, de la Universidad de Princeton, los que permitieron desarrollar y comprobar (tarea en la que han sido de gran utilidad los instrumentos denominados «magnetómetros») esta magnífica teoría.

El último elemento básico de la visión que proporciona la tectónica de placas de la Tierra es el siguiente: como la Tierra no aumenta de tamaño, la masa que se va creando y añadiendo a una placa, empuja a ésta, un movimiento que puede conducir a que dos placas choquen entre sí, en lo que es un margen *destrutivo* (frente a los *constructivos* de las dorsales). Entonces las posibilidades principales son dos. En la primera, la placa más densa puede verse forzada a sumergirse por debajo de la otra. La masa que desciende se funde formando un magma, que puede ascender de nuevo a la superficie a través de grietas formando volcanes. Pero si las dos placas son comparables, no tiene lugar ese proceso; en su lugar, la corteza se arruga de forma gradual, formándose cadenas montañosas, como el Himalaya, los Andes, o las Montañas Rocosas. (Existe un tercer proceso: a veces, dos placas se deslizan entre sí; el caso más conocido es el de la falla de San Andrés, en California, donde el movimiento de las placas toma en algunas ocasiones la forma de un «latigazo» repentino, que provoca un terremoto).

Cuando Wegener propuso su teoría, era difícil pensar en posibles aplicaciones prácticas, o comerciales, de ella. Hoy la situación ha cambiado bastante. Los geólogos buscan nuevos depósitos de materiales no sólo en las proximidades de yacimientos bien establecidos, sino también en lo que ahora son continentes muy alejados que en el pasado estuvieron pegados a ellos. Asimismo, interpretan la formación de tales depósitos dentro del contexto de la tectónica de placas. Esto añade una dimensión y atractivo a una teoría que, aunque todavía no esté plenamente desarrollada (esto es, libre de preguntas), ha logrado que en la actualidad contemplemos nuestro planeta desde una perspectiva radicalmente nueva. Basta con pensar, para apreciar la novedad introducida por estas ideas, que desde que comenzaron, hace dos mil millones de años, los movimientos de las placas tectónicas, los continentes han viajado a una velocidad de entre 6 y 2,5 centímetros al año, recorriendo el globo terrestre al menos cuatro veces, un viaje de 160 000 kilómetros.

DETERMINISMO BIOLÓGICO. Tesis que sostiene que tanto las normas de conducta compartidas como las diferencias sociales y económicas que existen entre los grupos —básicamente, diferencias de raza, de clase y de sexo— derivan de ciertas distinciones heredadas, innatas, y que, en este sentido, la sociedad constituye un fiel reflejo de la biología. Con frecuencia, el determinismo biológico ha tomado la forma de argumentos en favor de la idea de que los miembros de las capas más bajas de la sociedad están «fabricados» con «materiales» intrínsecamente inferiores (pueden ser cerebros más pobres, genes de mala calidad, o cosas por el estilo).

La historia del determinismo biológico es larga, y me llevaría demasiado lejos intentar reconstruirla. En nuestro siglo han sido —son todavía— frecuentes los intentos por demostrar que la inteligencia, el alcoholismo, el crimen, la depresión, la homosexualidad o las características de los dos sexos, por poner algunos ejemplos, son el producto inflexible

de genes humanos, hormonas, anatomía neuronal o historia evolutiva. Es importante recordar, sin embargo, que muchos de los esfuerzos por relacionar características humanas con predisposiciones biológicas han surgido a menudo como respuestas conservadoras a movimientos de liberación. En 1969, en el clímax del activismo en favor de los derechos civiles, Arthur Jensen propuso que la media de las diferencias en cocientes de inteligencia entre blancos y negros se debía a distinciones genéticas entre las dos razas; en la década de los setenta, en la cima del movimiento feminista, el sociobiólogo y entomólogo Edward Wilson (1929) sugirió que es poco probable que las mujeres alcancen alguna vez la igualdad con los hombres en las esferas de los negocios y la ciencia, dada su adaptación evolutiva a roles sociales diferentes.

Ocurre, no obstante, que existen serias dudas sobre el rigor —científico, metodológico— de muchas de las investigaciones que se nos presentan como concluyentes. Veamos algunos ejemplos. El comprobar la inteligencia individual de niños o adultos es una tarea extremadamente difícil cuando no conocemos las contribuciones de las denominadas inteligencia potencial y cinética. Esto es, cuando desconocemos cuánto de la contestación que se ofrece en un test se debe a conocimientos previos, y cuánto se ha generado en el momento. El almacén de conocimientos que es el cerebro (incluyendo reglas o algoritmos para resolver problemas) es tan vasto que oscurece diferencias en el procesamiento de la inteligencia cinética. Una heredabilidad elevada del coeficiente de inteligencia, puede indicar nada más que en su determinación el ambiente familiar, el grupo social a que se pertenece, continúa siendo más importante que la educación recibida. Más aún, el hecho de que un rasgo dado sea altamente heredable en un medio determinado, nos dice poco acerca de si tal heredabilidad será alta en un medio diferente.

Junto a la medida de la inteligencia, la comprensión de las diferencias entre hombres y mujeres ha sido otro de los temas frecuentes en el mundo del determinismo biológico. Entre los múltiples recursos utilizados figura el hecho, fisiológico, de que por la sangre de los varones circula mayor volumen de la hormona testosterona que por la de las mujeres. Esta innegable realidad se ha esgrimido para proclamar que los varones son congénitamente más agresivos que las mujeres, lo que, a su vez, ha servido como base para diferentes conclusiones sobre sus respectivos papeles sociales. Ahora bien, ni siquiera la pretendida base científica para relacionar niveles de testosterona con la agresividad está clara, a pesar de ejemplos evidentes como la pérdida de bravura de los toros castrados. En los seres humanos la castración reduce o elimina la pulsión y potencia sexual, pero tiene escasos o nulos efectos disuasorios sobre la agresividad. Con el desarrollo de la corteza cerebral, las influencias hormonales sobre el comportamiento de los primates no se pierden, pero pueden ser sustituidas. Como ha recordado el antropólogo Marvin Harris (1927-2001), las mujeres pueden aprender a ser más agresivas que los hombres si las exigencias de la vida social reclamaran papeles sexuales agresivos para las mujeres y comportamientos más pasivos para los varones.

Es importante indicar que los puntos que estoy señalando no se deben entender en el sentido de que sea preciso considerar que investigaciones de esta clase sean algo, en principio, censurable o que no tengan sentido. Pero, en este tipo de problemas mucho más que en otros, no es posible olvidar preguntas como: ¿cuál es el propósito de tal investigación?, ¿cómo se empleará y quiénes ganarán o perderán con sus resultados?

Por último, ¿y qué, aunque se demostrase que alguna raza, género o colectivo transporta en su acervo genético características que le sitúan en una cierta condición desventajosa? Semejantes situaciones no son imposibles, aunque yo diría que sí

improbables. ¿Debe ser nuestro mundo uno en el que la norma sea la máxima rentabilidad? ¿Un mundo en el que conclusiones extraídas mediante análisis científicos se impongan sobre las convicciones morales? Ni la ciencia está para eso, ni debemos olvidar que el progreso científico no ha sido el único progreso. La historia de la especie humana es pródiga en esfuerzos por acomodar en la vida comunal los derechos de los «otros», lo que significa también ayudar a los desfavorecidos. En la actualidad también incluimos entre esos «otros» a los animales, y muchos lo hacen no porque les gusten, acaso ni siquiera porque les den lástima, sino porque lo creen justo. «Cualquiera que sea su grado de talento —escribió Thomas Jefferson refiriéndose a los negros— éste no constituye medida alguna de sus derechos». (Por cierto, una cosa es lo que se dice y otra lo que se hace: Jefferson, uno de los autores de la Declaración de Independencia de Estados Unidos, en la que se puede leer esa hermosa frase que dice «todos los hombres nacen iguales», poseía esclavos negros; de hecho, tuvo por lo menos un hijo con una sierva-esclava de color, con el que se quedó como criado personal).

DIGITAL. Estrictamente, en electrónica y computación, término que significa «codificado como números». Un sistema digital utiliza *bits* para codificar, recibir y transmitir información. Una pantalla digital muestra valores discretos, mientras que una analógica se basa en indicadores continuos. Digitalizar una señal es tomar muestras de ella de modo que, poco espaciadas, puedan utilizarse para producir una réplica casi perfecta.

Una de las, aparentemente imparables, tendencias de nuestro tiempo es digitalizar todo tipo de información, la auditiva y la visual en particular. Entre las ventajas de esta técnica se encuentra la alta resolución que se puede lograr en la preparación de la primera copia, que, a su vez, puede repetirse, en principio, con fiabilidad total tantas veces como se desee. Por otra parte, los canales de transmisión de información de que se dispone en la actualidad (como la fibra óptica) permiten transmitir enormes cantidades de *bits* por segundo.

El mundo digital es el reino de las terminales, de los CDROM (*compact disc-read only memory*) y DVD (*digital versatil disk*), cables coaxiales, *módems* (modulación-demodulación; aparatos que convierten las señales analógicas en digitales y viceversa), de ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), de Internet, del correo electrónico, los servidores, las redes, las memorias plenas de *bites* (cadenas de ocho *bits*), *megabits* (millones de *bits*) o *terabits* (billones de *bits*), de Windows, Word-Perfect, MSDOS, Microsoft, IBM, Macintosh, de realidades virtuales (imágenes producidas por medios electrónicos con las que se construyen espacios bidimensionales, dotados de animación, que una persona puede recorrer y explorar, construyendo un mundo propio y exclusivo, al que efectos ópticos y fisiológicos dan la apariencia de tridimensional) y de las autopistas de información (canales electrónicos por los que circulan, y se almacenan, cantidades extraordinariamente elevadas de mensajes, que pueden ser emitidos y recibidos por todo tipo de usuarios en terminales individuales). Es, como ven, el mundo de los neologismos y acrónimos, un mundo que persigue la brevedad, la economía, para alcanzar así la abundancia y rapidez. Y lo está consiguiendo, no hay duda: en 1972 había únicamente 150 000 ordenadores en el mundo, mientras que las previsiones para dentro de menos de un lustro del fabricante de circuitos integrados Intel son expedir, él solo, cien millones cada año.

La revolución, en marcha, digital nos anuncia un futuro en el que nuestros gemelos y pendientes podrán comunicarse entre sí a través de satélites, adornos que tendrán más potencia que nuestros PC (*personal computer*) actuales (¿qué lejos parece estar el tiempo en

que PC significaba otra cosa!); en el que el teléfono recibirá, seleccionará y tal vez responderá a las llamadas; en el que podremos tener acceso, sin salir de nuestras casas, a miles de canales de televisión, a cientos de millones de libros, electrónicos, por supuesto. Estamos entrando —nos dice Nicholas Negroponte, el gran gurú de este movimiento tecnológico, fundador y director del famoso Laboratorio de Medios del Massachusetts Institute of Technology, «en una era en la que la expresión puede ser más participativa y vital», en la que los artistas llegarán a considerar Internet como la mejor galería para mostrar sus manifestaciones artísticas y difundirlas directamente al público.

Muchos de nosotros contemplamos semejante futuro con temor («en el próximo milenio [en el que, por cierto, ya estamos] hablaremos tanto o más con máquinas que con seres humanos»), pero no cabe duda de que los principales rasgos de ese tiempo venidero ya están aquí, que el futuro hace tiempo que ha comenzado. Planteando, como no podía ser menos cuando un imperio sustituye a otro, todo tipo de cuestiones, como el espinoso problema de la desregularización y distribución de espectros en los negocios de las telecomunicaciones y la información (parece que lo que hasta ahora se transmitía por aire pasará a hacerlo por cables, y viceversa, o a lo mejor termina siendo al revés; es una cuestión de cómo transportar más y mejor *bits*).

Como digo, este futuro parcialmente ya está entre nosotros, y nadie negará que nos estamos beneficiando enormemente de él. Pero todavía no en la extensión que los profetas digitales nos anuncian recurriendo a la lógica del entendimiento tecnológico. No debemos olvidar que el mundo real no es producto únicamente de la tecnología. Son personas, grupos, intereses, costumbres, industrias, culturas, naciones las que implementan, en general mediante oscuros y no siempre racionales mecanismos, la dirección que va tomando la vida. De esos mundos, nada nos dicen esos profetas, que pretenden que su lógica es la única lógica. No nos dicen, ni se preocupan, por ejemplo, por cuestiones como la de qué hacer con tanta información, cómo sobrevivir, cuando, en aras de la globalización, perdamos nuestras culturas, los últimos rasgos de nuestra identidad cultural. ¿Seremos islas entre islas, naufragos en complejos pero simples hiperespacios virtuales? Al fin y al cabo, se nos dice que «en la era de la postinformación, a veces, la audiencia es sólo de una persona».

José Ortega y Gasset escribió (en su *Meditación de la técnica*) que «Es preciso estar alerta y salir del propio oficio; otear bien el paisaje de la vida, que siempre es total. La facultad suprema para vivir no la da ningún oficio ni ninguna ciencia: es la sinopsis de todos los oficios y todas las ciencias y muchas otras cosas además. Es la integral cautela. La vida humana y todo en ella es un constante y absoluto riesgo. La media toda se va por el punto menos previsible: una cultura se vacía entera por el más imperceptible agujero». La digitalización, el mundo digital que está aquí y el que nos viene, es, y será más aún, uno de esos —en este caso completamente perceptibles— agujeros. Es simplemente imposible ir contracorriente de los cambios que estos nuevos desarrollos científico-tecnológicos están produciendo, pero sí que deberíamos estar especialmente alertas para intentar conservar aquello que consideremos más valioso, aquello que esté más intrínsecamente unido a nuestra naturaleza humana. Es fácil dejarse vencer —por pereza o ignorancia— por la técnica, pero no es en modo alguno obligado. La tecnociencia puede ser un arma cargada de ideología. En este caso, el de la tecnología e industria digitales, claramente lo es. No está de más que lo recordemos.

DÍGITO. En matemáticas, cualquiera de los números que van del 0 al 9. Diferentes bases de numeración tienen diferentes rangos de dígitos; por ejemplo, en el sistema binario

—el propio de los *bits* y sistemas digitales— los dígitos son el 0 y el 1 (el 2 y el 3, recordemos, se escriben en base 2 como 10 y 11, respectivamente). [Véase BIT].

DINOSAURIOS. Uno de mis recuerdos de cuando vivía en Oxford es un muro, cerca del Mathematical Institute y del Keble College, en el que alguien había escrito, con grandes caracteres: «Recuerda lo que le pasó a los dinosaurios». No lo he olvidado y creo que no lo olvidaré nunca. Y como lo que les pasó entra dentro del dominio de los intereses de la ciencia, afectando, además, a nuestra propia existencia como especie, quiero dedicar a esos para algunos simpáticos, para otros aterradores, animales (que tanto deben —en lo que a popularidad se refiere— a Michael Crichton y a su *Parque Jurásico*), unas líneas de este diccionario.

Los dinosaurios (por cierto que el nombre lo inventó el naturalista británico Richard Owen [1804-1892] en 1842, combinando los términos griegos *deinos* —terrible— y *sauros* —lagartos—) fueron unos reptiles que aparecieron durante el Triásico medio (hace 230 millones de años), en una época en la que el mundo terrestre estaba prácticamente aglutinado en el supercontinente Pangea, una circunstancia que facilitó el que se extendieran por toda la Tierra (las huellas de sus pasos están estampadas sobre los suelos primitivos de todos los continentes). Se diversificaron y proliferaron en una gran variedad de formas en los últimos 10-15 millones de años (m. a.) del Triásico (que, recuerdo, cubre un período de entre hace 245 y 208 m. a.), llegando a dominar la Tierra a lo largo de los periodos Jurásico (208-114 m. a.) y Cretácico (144-65 m. a.), cuando desaparecieron.

Algunos eran muy grandes (27 metros, fémures mayores que el más alto de los seres humanos, cráneos de más de 2,5 metros, mandíbulas provistas de juegos de trescientos o cuatrocientos dientes) y otros pequeños, de unos sesenta centímetros de longitud y dos o tres kilos de peso. Su aparición coincidió con un momento crucial en la historia de las faunas terrestres modernas: al mismo tiempo que ellos, surgieron las primeras tortugas, cocodrilos y mamíferos, que —estos últimos— mientras vivieron los dinosaurios eran unas criaturas diminutas, no mayores que un ratón.

La teoría actualmente más aceptada, desarrollada en gran medida por el geólogo Walter Álvarez (1940) y su padre, el premio Nobel de Física Luis Álvarez (1911-1988), y algunos colegas suyos en California, mantiene que los dinosaurios desaparecieron debido a que la Tierra fue golpeada por un gran meteorito, de unos diez kilómetros de diámetro, a finales del periodo Cretácico, y que este impacto produjo una nube de polvo o cenizas que envolvió el planeta cambiando el clima. Los dinosaurios —al igual que, parece, todo animal terrestre que pesase más de veinticinco kilos— no se pudieron adaptar a aquel nuevo ambiente y desaparecieron. Sí sobrevivieron la mayor parte de las plantas y animales terrestres como insectos, caracoles, ranas, salamandras, tortugas, lagartos, serpientes, cocodrilos y mamíferos placentarios, al igual que la mayoría de los invertebrados marinos (estrellas y erizos de mar, moluscos, artrópodos) y peces.

En favor de la hipótesis de una gran extinción de origen cósmico se encuentra un manto de rocas ricas en iridio —un elemento raro en la Tierra, pero común en algunos cuerpos extraterrestres— que data de aquella época. Existen, sin embargo, teorías alternativas, como la que sugiere que su desaparición se debió al movimiento de los continentes y variaciones de los niveles de los océanos, que provocaron cambios climáticos y mezclas de poblaciones que hasta entonces habían estado aisladas, con el subsiguiente resultado de un incremento de la competitividad al igual que de enfermedades, o la que propone que la nube de polvo que afectó al medio ambiente procedió de una gran actividad volcánica.

Si los mamíferos han proliferado tanto, llegando un grupo de ellos, los humanos, la especie *homo sapiens*, a dominar la Tierra es, por tanto, como consecuencia de un suceso tan imprevisto e incontrolable como el que se cruzase en el camino cósmico de nuestro planeta un gran meteorito. Somos, en definitiva, producto de la casualidad, y el comprender este hecho debería servirnos para contemplar a la naturaleza y nuestro lugar en ella desde una perspectiva más modesta. Ésta es la lección a la que me refería antes: lo que les pasó a los dinosaurios —que vivieron durante 120 millones de años, mientras que nosotros sólo lo hemos hecho por el momento 250 000 años (100 000, *homo sapiens*)— nos puede pasar, y seguramente nos pasará, a nosotros en algún momento del futuro (hace poco leí una noticia —no se crean, sin embargo, todo lo que leen— según la cual es bastante probable que en el año 1 140 000 un asteroide, Eros, del tamaño doble del que puso fin a los dinosaurios, choque con la Tierra).

De hecho, las grandes extinciones han sido frecuentes en la historia de la vida en la Tierra. A finales del Ordovícico (505-438 m. a.) desapareció más de una quinta parte de las familias existentes. También están las extinciones del Triásico tardío, que despejaron el camino a los dinosaurios. Pero ninguno de estos episodios (incluyendo el que corresponde a la desaparición de los dinosaurios) alcanza la magnitud de la extinción ocurrida en el Pérmico (286-245 m. a.) tardío: desaparecieron tantas especies, que su holocausto significó el término de la era paleozoica, la era de la vida primitiva. Tanto en la tierra como en el mar, las desapariciones pérmicas constituyeron el mayor exterminio global que el mundo haya contemplado jamás, como mínimo dos veces más severo que cualquier otro, y posiblemente cinco o incluso diez veces más extenso. Se estima que sólo sobrevivió el cinco por ciento de las especies, cuando en el peor de los demás episodios la cifra fue cercana al cincuenta por ciento. Acaso la extinción sea el destino último de todas las criaturas.

DIOS. Preguntado por Napoleón cómo es que había escrito un libro acerca del sistema del mundo «sin mencionar una sola vez al autor del universo», el matemático y físico francés Laplace (1749-1827) contestó: «Sire, no he tenido necesidad de semejante hipótesis».

Puede que Laplace dijese y pensase esto, pero muchos otros científicos a lo largo de la historia no se han comportado de manera análoga. La idea de que existe un Dios ha condicionado numerosos trabajos científicos.

Isaac Newton, el más grande de todos los científicos, es un magnífico ejemplo en este sentido. Para él, el objetivo último de la ciencia no era otro que llegar a Dios. Así, en una de las «Cuestiones» que incluyó en uno de sus libros, la *Óptica* (1704), se lee: «El objetivo básico de la filosofía natural [esto es, la ciencia] es argumentar a partir de los fenómenos, sin imaginar hipótesis, y deducir las causas a partir de los efectos hasta alcanzar la primerísima causa que ciertamente no es mecánica».

Aparentemente, este propósito le guió incluso en la composición de su obra magna, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) al menos esto es lo que él mismo señaló en una carta que escribió el 10 de diciembre de 1692 a Richard Bentley, a quien se debe el que Newton autorizara la publicación de una segunda edición de los *Principia* (1713): «Cuando escribí mi tratado acerca de nuestro Sistema [los *Principia*] —señaló en aquella ocasión— tenía puesta la vista en aquellos principios que pudiesen llevar a las personas a creer en la divinidad, y nada me alegra más que hallarlo útil a tal fin».

Ahora bien, una cosa son las intenciones, y otra, en general bastante diferente, lo que se hace finalmente. Así, cuando se analiza el contenido de los *Principia* nos

encontramos con Newton el científico, el físico y el matemático, no con el teólogo. Rastros de este último aparecen en muy escasos lugares. En dos, de hecho. El primero es una referencia, breve y no demasiado afortunada, a Dios en el libro tercero de la primera edición de los *Principia*, en el Corolario 5.º a la proposición VIII, Teorema VIII. Se lee allí: «Por tanto Dios situó a los planetas a diferentes distancias del Sol para que cada uno, según el grado de densidad, disfrutase de un grado mayor o menor de calor solar». Sin embargo, en la segunda edición, Newton eliminó esta nota.

Como si tratase de compensar esa pérdida teológica en los *Principia*, en la segunda edición Newton decidió cerrar su gran monografía con unas páginas dedicadas a la divinidad. Se trata del célebre «Escolio General», en el que Newton pretendía poco menos que definir a Dios: «Es eterno e infinito, omnipotente y omnisciente, es decir, dura desde la eternidad hasta la eternidad y está presente desde el principio hasta el infinito: lo rige todo; lo conoce todo, lo que sucede y lo que puede suceder. No es la eternidad y la infinitud, sino eterno e infinito; no es la duración y el espacio, sino que dura y está presente. Dura siempre y está presente en todo lugar».

Muy diferente es el caso de Charles Darwin, que tuvo que luchar, consciente e inconscientemente, muchísimo con sus ideas religiosas mientras daba forma a su teoría evolucionista y escribía *Sobre el origen de las especies*. Sabemos que cuando preparó este libro todavía era un teísta (esto es, creía en un Dios que no sólo crea sino que también cuida y sostiene al universo; un deísta cree únicamente en un Creador remoto y despreocupado). Por esto, y porque no deseaba alarmar —y enfrentarse— a la conservadora sociedad victoriana, Darwin puso mucho cuidado en minimizar los aspectos materialistas de su teoría al presentarla públicamente, y dar la impresión de que la evolución natural opera a la larga en beneficio de los seres vivos. Incluso llegó a manejar la idea de presentar la selección natural como manifestación de un poder cuasi divino supervisor que podía seleccionar las variantes útiles tal como un criador de animales lo hace con especies domésticas. Algunos biógrafos de Darwin han llegado incluso a la conclusión de que detrás de las dudas religiosas producidas por sus investigaciones científicas se encuentra el origen de las tensiones emocionales que pudieron exacerbar su predisposición a sufrir trastornos estomacales y palpitaciones cardíacas, trastornos que le impedían trabajar durante largos periodos, y que contribuyeron a hacer de él casi un recluso en su finca de Down.

Otro lugar, entre los muchos posibles, en el que se detecta con facilidad un, para muchos, posible punto de encuentro entre ciencia y religión se halla en la cosmología y astrofísica contemporáneas. El descubrimiento de la expansión del universo, movimiento que extrapolado hacia el pasado conduce a la idea —también tratada en otro lugar de este diccionario— de que se produjo una gran explosión con la que se *creó* el universo, ha sido utilizada para defender la idea de un Dios creador del mundo. Científicos de profundas convicciones cristianas, como el sacerdote belga George Lemaître ([1894-1966], uno de los creadores de la imagen del universo surgido de una gran explosión; en su caso de un «átomo primitivo»), Edward Milne (1896-1950) o Edmund Whittaker (1873-1956) no ocultaron su satisfacción con el modelo del *big bang*, debido a, precisamente, su posible acuerdo con la visión sostenida en el *Génesis*. En concreto, las manifestaciones de Whittaker fueron utilizadas por el papa Pío XII en 1951 como evidencia científica de la visión católica del mundo. De hecho, el Vaticano ha mantenido durante los últimos cincuenta años un cierto interés en la astrofísica y cosmología (teórica y experimental), no siendo infrecuente que la Academia Pontificia de Ciencias reúna a especialistas en estos campos.

En este punto habría que recordar a todos aquellos que pretenden usar —y abusar— de la ciencia con fines claramente partidistas, en este caso en asuntos religiosos, que pretenden probar la existencia de un Dios a partir de la teoría del *big bang* es, cuando menos, poco riguroso. El argumento que se emplea es que todo debe tener una causa, y que, por consiguiente, debe existir una causa —o un *antes*— para la «creación» del universo en el *big bang*. Ahora bien, cualquiera que pueda aceptar el concepto de una deidad a la que no se le puede asociar una causa, podría, y tal vez debería, aceptar la idea de que el universo es, o puede ser, él mismo una causa sin causa, al menos hasta donde llega nuestro entendimiento, que no creo todopoderoso. Sorprende, asimismo, que aquellos que pretenden utilizar con propósitos deístas esta particular instancia de la física en la que se utiliza el concepto de creación, no se esfuercen —o sorprendan— por hacer lo propio en otros apartados de esta ciencia en los que también se recurre a creaciones (y aniquilaciones), como sucede en la teoría cuántica de campos, en donde la creación y aniquilación de partículas es parte integrante —y no problemática— de la teoría.

Argumentos como éstos socavan la relevancia posible de Dios en la ciencia. En ocasiones, sin embargo, se manejan otras razones para intentar dar la impresión de que la ciencia favorece un cierto concepto de religiosidad. En este sentido, es frecuente que se citen las siguientes frases de Albert Einstein: «La experiencia más bella y profunda que pueda tener el hombre es el sentido de lo misterioso [...] percibir que, tras lo que podemos experimentar se oculta algo inalcanzable a nuestros sentidos, algo cuya belleza y sublimidad se alcanza sólo indirectamente y a modo de pálido reflejo, es religiosidad. En este sentido, yo soy religioso».

Es ésta, no obstante, una pobre, semántica, escapatoria para aquellos que desean ver introducida la religión en la ciencia.

Ante la falta de argumentos que permiten defender con buenas razones la confesionalidad, deíctica o teística, de la ciencia, está muy extendida la opinión de que la práctica de la ciencia ni aleja ni acerca a los seres humanos de Dios, que es neutra respecto a la religión, y que la decisión de creer o no se toma por otros motivos, ajenos a la actividad científica. Aunque puedo comprender perfectamente este punto de vista, ya que no es sino otra manifestación de la desoladora sensación de indefensión que nos invade cuando nos planteamos preguntas eternas como ¿de dónde venimos?, ¿hacia dónde vamos?, encuentro que esa postura neutra concede escaso valor educativo, epistemológico, a la ciencia. No nos engañemos, cuando hablamos de un Dios creador del mundo, le estamos asignando, directa o indirectamente, atributos (la misma facultad de crear) extraídos de nuestra experiencia y características mentales; la experiencia de una especie improbable, y desde luego no obligada, desde el punto de vista de la evolución natural.

En este punto no resisto la tentación de ofrecer dos pasajes extraídos de la autobiografía de Charles Darwin, de la sección «Creencia religiosa», que su hijo Francis eliminó al publicarlas, ya muerto su padre (serían recuperadas en la segunda mitad del siglo XX). Recordando épocas en las que al contemplar, por ejemplo, la grandeza de la selva brasileña llegaba al «firme convencimiento de la existencia de Dios y de la inmortalidad del alma», el autor de *Sobre el origen de las especies* escribía en sus memorias, ya próximo su fin: «No concibo que esas convicciones y sentimientos íntimos tengan valor alguno como evidencia de lo que realmente existe. El estado mental que las escenas grandiosas despertaban en mí años atrás, y que estaba íntimamente relacionado con la creencia en Dios, no difería en su esencia de lo que a menudo denominamos sentido de lo sublime; y por difícil que sea explicar el origen de este sentido, mal puede ofrecerse como un

argumento a favor de la existencia de Dios; pues no lo es más que los poderosos, aunque indefinidos sentimientos similares evocados por la música».

Refiriéndose a continuación al argumento de la extrema dificultad, o casi imposibilidad, de concebir el universo como resultado de la casualidad o necesidad ciegas, Darwin ofrecía una posible explicación que no se apartaba del razonar científico, y que preludiaba la esencia de los argumentos de la sociobiología de la segunda mitad del siglo XX: «Al reflexionar sobre ello me siento compelido a considerar una Causa Primera con una mente racional análoga en cierto grado a la del hombre; y merezco ser llamado teísta. Pero entonces surge la duda, ¿se puede confiar en la mente del hombre —que, estoy convencido, se desarrolló a partir de una mentalidad tan primitiva como la que poseía el más primitivo de los animales— cuando infiere conclusiones tan sublimes? ¿No pudieran ser éstas el resultado de la relación entre causa y efecto, que aunque nos parece necesaria probablemente depende sólo de la experiencia heredada? Tampoco podemos pasar por alto la probabilidad de que la inculcación constante de la creencia en Dios en la mente de los niños produzca un efecto tan pronunciado, y quizás heredado, en sus cerebros no totalmente desarrollados, que les resulta difícil liberarse de su creencia en Dios, como a un mono liberarse de su miedo y aversión a una serpiente».

Desde semejante perspectiva, penosamente solitaria y desamparada, uno puede comprender mejor palabras como aquellas con las que Steven Weinberg (1933) concluía su famoso libro de divulgación *Los tres primeros minutos del universo*: «Cuanto más comprensible parece el universo, tanto más desprovisto de sentido parece también. Pero si no hay consuelo en los frutos de la ciencia, hay al menos cierto consuelo en la ciencia misma [...] El esfuerzo por entender el universo es una de las muy escasas cosas que eleva la vida humana un poco por encima del nivel de la farsa y le confiere algo de la gracia de la tragedia».

[Véase DISEÑO INTELIGENTE].

DIÓXIDO DE CARBONO. CO₂. Uno de los productos químicos más temidos de nuestro tiempo. Gas al que se le hace responsable de algunos de los mayores riesgos medioambientales, como el calentamiento global de la atmósfera (véase EFECTO INVERNADERO).

El dióxido de carbono se produce de diversas maneras: siempre que quemamos algo que contiene carbono, ya sea un cigarrillo, rastrojos vegetales en la trasera de nuestro jardín o gasolina en un automóvil. Y con frecuencia lo hacemos aunque no lo veamos directamente; como cuando encendemos la luz, que puede ser producida en una central movida quemando carbón. Es difícil, en otras palabras, no producir CO₂ (cuando se genera electricidad en una central nuclear no se emite, pero, como sabemos muy bien, entonces se producen los muy peligrosos y duraderos residuos radiactivos).

No somos, de todas maneras, los únicos productores de este gas: la mayor parte del dióxido de carbono que existe en la atmósfera procede de fuentes naturales (de los suelos y profundidades subterráneas, al igual que de los mares, que contienen cantidades ingentes de él). Se estima que existen entre dos y tres billones de toneladas de CO₂ en la atmósfera, que corresponde a una concentración en el aire de 0,035 por ciento, o, como se suele expresar, 350 partes por millón (ppm). Al comienzo de la revolución industrial, hace 250 años, la concentración era, probablemente, de 280 ppm. Ha sido durante el siglo XX, especialmente durante su segunda mitad, con la creciente industrialización y la proliferación de automóviles, cuando ha aumentado drásticamente la concentración, y sigue haciéndolo (al ritmo de 1 ppm por año).

La pregunta que usted, lector amigo, se estará haciendo es si es cierto que tal aumento es muy peligroso para nuestra salud y la de nuestro planeta. Sí, pero déjeme decirle también que es una pregunta complicada. Y aprovecho para hacer un inciso, toda vez que con frecuencia, cuando se dirige con una pregunta urgente a un científico, se encontrará con lo que a usted le parecerán evasivas. Ocurre que las variables que maneja la ciencia son muchas, demasiadas para controlarlas todas, o, por lo menos, para pronunciarse de manera definitiva, sin añadir numerosas —y para el que escucha, acaso exasperantes— coletillas («salvo que», «si», «en caso de que», «pero habría que tomar en consideración»). Las posibles relaciones entre fenómenos, en principio apartados, son incontables; las causas —o responsabilidades— ocultas, frecuentes, y al científico le gusta, es el vicio de su profesión, estar seguro, no equivocarse. Dicen que Dante reservaba el lugar más caliente del infierno que imaginó en *La divina comedia* para aquellos que no toman partido en tiempos de crisis; probablemente sería pedir demasiado a los profesionales de la ciencia que se arriesguen a extraer conclusiones definitivas, cuando no están seguros (otra cosa es cuando están seguros, pero no quieren comprometerse), aunque sea en tiempos de crisis. Para eso está la sociedad. Si establecemos canales de transmisión de información adecuados entre ciencia y sociedad, podremos —y deberemos—, todos, decidir ante situaciones que nos parezcan graves, o críticas. Sabemos muy bien que en la vida pocas veces procedemos con todos los datos, con todas las seguridades, a nuestro alcance. Es el riesgo —para algunos el placer, para otros la angustia— que conlleva vivir consciente, responsablemente.

Pero estábamos hablando sobre si el aumento actual de dióxido de carbono atmosférico es malo o no. Probablemente para usted, lector, ésta es la cuestión más importante, pero le remito a otra entrada, ya muy próxima, de este diccionario, la que corresponde al efecto invernadero. Como verá usted ahí, después de algunas idas y venidas de opinión, en la actualidad existe un gran consenso en que el aumento en las emisiones de CO₂ a la atmósfera es uno de los mayores responsables de ese tan temido efecto. De hecho, en planetas muertos, como Venus y Marte, casi toda la atmósfera está compuesta de CO₂. Tenga usted, de todas maneras, paciencia y considere esta entrada algo así como una introducción.

A lo que sí me voy a referir ahora es a la posible incidencia del dióxido de carbono sobre otros aspectos del ciclo vital del planeta, con la intención de mostrar que en ciencia, como en casi todo, suelen existir dos caras de la misma moneda, en este caso el CO₂. Para ello hay que hacer hincapié en que el propio ciclo del dióxido de carbono es complejo; solamente una parte del CO₂ que emitimos permanece en la atmósfera: una parte es tomada por las plantas, otra es absorbida por el mar y otra se disuelve con la lluvia. De hecho, los propietarios de invernaderos comerciales descubrieron hace tiempo que las plantas recién sembradas crecen con mayor rapidez cuando el aire del invernadero está enriquecido con dióxido de carbono. También se ha comprobado que para las plantas que crecen en condiciones de sequía, el CO₂ es un sustituto del agua. Datos como estos han llevado a algunos a plantearse preguntas —y posibilidades— que sonarán terribles en los oídos de muchos. El físico Freeman Dyson (1923) es uno de ellos: «¿Es más importante —apuntaba en uno de sus libros— el efecto directo del aumento de dióxido de carbono sobre la producción de alimentos y sobre los bosques que el efecto sobre el clima? ¿Necesita la especie humana, ya habituada al dióxido de carbono, un continuado aumento de la combustión de carburantes fósiles para fertilizar nuestros cultivos? Cuando el carbón y el petróleo se hayan agotado, ¿quemaremos piedra caliza para mantener una atmósfera rica en

dióxido de carbono al nivel al que la biosfera se habrá habituado? No estoy diciendo que las respuestas a estas preguntas deban ser afirmativas. Pero tenemos que ser conscientes de que no poseemos elementos de juicio para contestar confiadamente con un no».

¿Nos podríamos convertir —horror entre los horrores— en dióxido de carbono-adictos? La verdad es que uno no vive para sustos, ni para sorpresas. Pero para su alivio, y también para añadir más complicación, la complicación, o, mejor, la complejidad de la ciencia, citaré de otro texto más reciente, uno del historiador de la ciencia estadounidense Spencer Weart: «Algunos científicos [...] sostenían que la fertilización debida a un incremento del CO₂ en la atmósfera beneficiaría tanto a la agricultura y la silvicultura que compensaría cualquier posible daño debido al cambio climático. Según algunos estudios, la biomasa del planeta en conjunto absorbería en total más CO₂ que en décadas anteriores. Sin embargo, las consecuencias no eran sencillas. En algunas circunstancias, por ejemplo, el CO₂ adicional podía ser más beneficioso para las malas hierbas y las plagas de insectos que para los cultivos deseables. En cualquier caso, conforme el nivel del gas siguiera subiendo, las plantas alcanzarían (aunque nadie podía decir con qué rapidez) un punto en que serían incapaces de consumir más carbono fertilizador. Era bastante probable que un aumento del calor propiciara finalmente la descomposición orgánica, provocando la emisión neta de gases de efecto invernadero».

En definitiva, no parece que las ideas de Dyson sean realistas, así que no hay peligro de que nos convirtamos, a través de la vegetación, en dióxido de carbono-adictos. Sin embargo, desaparece un peligro (o una esperanza) y surgen otros, mucho peores.

DIRAC (Paul Adrien Maurice). 1902-1984. Paul Dirac fue uno de los creadores de la mecánica cuántica, y uno de los físicos más distinguidos de nuestro siglo. Como tal podría perfectamente figurar en el presente diccionario, pero no es por su protagonismo en el desarrollo de la física que me ocupo ahora de él, sino por la forma como llegó a algunas de sus aportaciones; porque ilustra de manera paradigmática un estilo de entender la investigación en física teórica que tiene que ver con uno de los problemas más profundos que en mi opinión existen: el de la relación entre la naturaleza y las matemáticas.

Se trata de un problema con diferentes caras. Veamos la primera, y más básica. Para cumplir con su objetivo de describir los fenómenos que tienen lugar en la naturaleza, y predecir las condiciones en que se volverán a producir, y cómo lo harán, la ciencia —y a la cabeza la física— recurre a leyes que se expresan matemáticamente. Ahora bien, las estructuras matemáticas posibles son —lo comento también en otro lugar de este libro [véase REDUCCIONISMO]— infinitas, no así las leyes que esperamos formular para describir la naturaleza. Si la física se distingue de la matemática es precisamente porque en aquélla es preciso seleccionar, eliminar relaciones matemáticas para las que no encontramos correlatos en la naturaleza. Dicho de otra manera: las leyes de las ciencias naturales son un subconjunto de las expresiones y estructuras matemáticas; lo que es matemáticamente posible, no tiene por qué serlo físicamente. Podría haber sido de otra forma: que ambas coincidiesen, pero parece que no es así. Aunque también podríamos pensar —¡arriesgado pensamiento!— que coinciden realmente, pero que todavía no se han descubierto los fenómenos naturales a los que aguarda su estructura matemática.

Otra manera, no exactamente idéntica, pero relacionada, de ver este problema surge ante el hecho de que no todas las soluciones de las leyes/ecuaciones (matemáticas) de la física tienen por qué poseer significado físico, o, lo que es lo mismo, plasmarse en la naturaleza (esto es particularmente claro en la cosmología: las ecuaciones que se tienen en la cosmología relativista tienen infinitas soluciones posibles, pero, al menos en principio

[véase MUCHOS UNIVERSOS, TEORÍA DE LOS], el universo es uno). Es tarea del científico averiguar cuáles de esas soluciones tienen realidad física. Ahora bien, ¿cómo averiguar cuáles son las físicamente reales y cuáles no?, ¿no podríamos dar la vuelta al procedimiento, y conocida una solución matemática buscar si el fenómeno que parece representar existe en realidad? Si siguiésemos este mecanismo, estaríamos guiándonos por la matemática para estudiar la naturaleza. Otra variante de este procedimiento heurístico es adoptar algún criterio de selección de estructuras matemáticas, y una vez aplicado éste, buscar en las seleccionadas su «manifestación física».

No abundan en la historia de la física científicos que hayan adoptado, con éxito, procedimientos de este tipo, en los que la matemática asume un papel tan protagonista. Paul Dirac fue uno de esos pocos, y el que más logros alcanzó. Veamos en qué consistieron algunos de esos logros.

Al ser preguntado, en el año 1955, cuando era profesor visitante en la Universidad de Moscú, cuál era, resumida brevemente, su filosofía de la física, Dirac escribió en la pizarra:

Las leyes físicas deben tener belleza matemática.

En esta frase, que expresa uno de los criterios de selección a los que me acabo de referir, se encuentra una de las claves del éxito, singular, de Dirac como físico. Sus trabajos científicos tuvieron, en efecto, como elemento destacado, con frecuencia primordial, las matemáticas, y no sólo las matemáticas, sino las expresiones matemáticamente «bellas». (Este rasgo de su metodología científica se acomoda también perfectamente a su carácter humano, forjado en condiciones de gran dureza: su padre lo obligaba a hablar en un idioma, el francés, con el que no se sentía cómodo, por lo que optó por reducir al mínimo sus conversaciones; también lo apartó de su madre y hermanos, que, por ejemplo, comían en otro lugar de la casa, mientras que él lo hacía con su padre. Fruto de aquellas experiencias, Dirac tendió a vivir en un mundo mental independiente, centrado en sí mismo. No es de extrañar, por consiguiente, que diese tanta importancia a la matemática en su aproximación a la física; al fin y al cabo la matemática es uno de los ejemplos más limpios de objetos ideales, platónicos, que obedecen a una lógica propia, al margen, en principio, del mundo fenoménico; fuera, se podría incluso decir, de las miserias de la vida real. Ya ven, amigos lectores, que es posible introducir también consideraciones de tintes psicoanalíticos a la hora de intentar comprender los comportamientos «técnicos» de los científicos).

El primer ejemplo de cómo Dirac utilizó esa filosofía científica se encuentra en la que fue también su primera gran contribución a la física, por la que le fue concedido el premio Nobel, en 1933 (lo compartió con Erwin Schrödinger [1887-1961]). Se trata de sus trabajos de 1926 sobre las ecuaciones fundamentales de la mecánica cuántica.

Dirac tuvo acceso a las pruebas del artículo en el que Werner Heisenberg (1901-1976) desarrollaba su mecánica matricial [véase MECÁNICA CUÁNTICA]. Su primera reacción ante aquel amasijo de expresiones, de las que era difícil extraer alguna estructura matemática, fue poco favorable, necesitando alrededor de diez días para poder dominar su contenido. Uno de los aspectos del trabajo de Heisenberg que más le chocaban era la no conmutatividad (el que $A \times B$ no fuese igual a $B \times A$) que se transparentaba de sus principales expresiones matemáticas. No podía comprender de dónde, o por qué, surgía. Y él buscaba lo auténticamente básico, lo estrictamente característico y definitorio, y no lo perseguía a la manera del paciente recolector de datos, sino, como Einstein, intentando

desvelar las armonías secretas de la naturaleza, las notas ocultas de la «música natural».

La solución le vino en octubre de 1925, durante uno de sus largos paseos dominicales. A solas consigo mismo, reflexionando, buscando analogías con las ricas estructuras que brinda por doquier la matemática, recordó ciertos pasajes de uno de los libros de texto por entonces habituales en Cambridge: *Analytical Mechanics*, de Edmund Whittaker (1873-1956). La mecánica analítica forma parte de lo que también se denomina, significativamente, mecánica *racional*. Es algo así como la esencia matemática de la mecánica, de la ciencia del movimiento; es la disciplina que se ocupa de las estructuras que subyacen detrás de la descripción teórica de esos movimientos (en principio en el nivel clásico, no cuántico).

Dirac recordó que en la formulación que el matemático francés Siméon-Denis Poisson (1781-1840) había realizado, y que el texto de Whittaker recogía, figuraba una expresión: los denominados «corchetes de Poisson», no conmutativos. Ésa fue la leve pista, pero para él fundamental, que lo lanzó en pos de utilizar las estructuras de la mecánica clásica, a la manera de Poisson, en la descripción de los fenómenos cuánticos. No intervino ningún indicio empírico, ninguna pista extraída de algún experimento, como gustan de imaginar los campeones del inductivismo, sino el mero poder sugestivo de una estructura matemática, para Dirac de gran belleza, que compartía con el contenido de un artículo de Heisenberg una propiedad: la no conmutatividad.

El otro ejemplo al que quiero referirme es la célebre ecuación relativista del electrón, que Dirac encontró en 1928. Fue, después de los trabajos que acabo de citar, su contribución más importante a la física.

Dirac, al igual que algunos de los físicos y matemáticos contemporáneos más originales y capaces (como Wolfgang Pauli [1900-1958] o Hermann Weyl [1885-1955]) estaba fascinado por la teoría especial de la relatividad. Creía que sin ella no es posible entender la auténtica esencia de la naturaleza. Ahora bien, las ecuaciones básicas de la mecánica cuántica, la ecuación de ondas de Schrödinger en particular, no cumplía tal requisito.

Existía, es cierto, una ecuación relativista que generalizaba la de Schrödinger, la denominada ecuación de Klein-Gordon, pero Dirac no creía en ella. Y no creía, no porque hubiese demostrado, o, siquiera intuido, que conducía a predicciones experimentales erróneas, sino porque ciertos rasgos matemáticos de ella no se adecuaban a la idea que Dirac tenía de las propiedades que debían caracterizar a una ecuación cuántica relativista.

Ante el estupor de sus colegas, que no entendían por qué no le satisfacía la ecuación de Klein-Gordon, en solitario, sin intercambiar ideas o preguntas con otros físicos (su método de trabajo habitual), Dirac se dedicó en el otoño de 1927 a buscar una teoría que satisficiera sus expectativas para el caso de una partícula tan básica como el electrón. Y la encontró. Le costó unos pocos meses, pero la encontró. En uno de los artículos en los que, muchos años después, recordó aquel hallazgo, Dirac señaló el rasgo fundamental que le llevó a la nueva ecuación: «Fue un problema duro durante algunos meses, y la solución llegó, diríamos, como llovida del cielo, uno de mis éxitos inmerecidos. Llegó jugando con las matemáticas».

Probando con diferentes expresiones matemáticas, buscando expresiones analíticas que, de alguna manera, expresasen las ideas que Dirac mantenía sobre cuál *debía* ser el comportamiento de la naturaleza, encontró una ecuación sorprendente, probablemente la más, en diversos sentidos, sorprendente de la física desde las ecuaciones de la relatividad general que Einstein formulara en 1915.

Se trataba de una ecuación —relativista por supuesto— poco habitual, que utilizaba matrices 4×4 ; esto es, objetos matemáticos formados por cuatro filas y cuatro columnas de números o funciones. Esto significaba que la función incógnita, el objeto matemático que describía la ecuación y que debía representar al electrón, tenía cuatro componentes. Dirac se dio cuenta de que esos cuatro componentes correspondían a, por un lado, dos posibles orientaciones del espín, uno de los atributos básicos de las partículas cuánticas, y que hasta entonces no había podido ser explicado (se había introducido porque era necesario para explicar resultados experimentales), y, por otro, a valores positivos y negativos de la energía.

En cuanto al espín, tal predicción fue entendida inmediatamente como un gran éxito: se tenía una ecuación relativista de una partícula elemental, el electrón, que «producía» su espín (en este sentido, era razonable concluir que el espín era un atributo eminentemente relativista).

El que la nueva ecuación predijera estados negativos de energía no satisfacía tanto a Dirac. ¿Qué era eso de energías negativas? Para intentar remediar este hecho, Dirac introdujo una de sus ideas más célebres: la teoría de los «agujeros», en la que todos los estados de energía negativa se encuentran normalmente ocupados, de manera que el «vacío» (que en esta imagen no es tal) contiene un número infinito de electrones. Las vacantes en ese mar de estados negativos se comportarían, según Dirac, como cargas positivas, con energía negativa.

De repente, lo que parecía ser un obstáculo, se convertía en una magnífica promesa; la matemática rendía frutos, guiaba a la física. Ahora bien, existían problemas. Por entonces (1928) no se conocían más que dos partículas «elementales»: el electrón (de carga negativa) y el protón (de carga positiva); el neutrón (sin carga) vendría más tarde (en 1931). Las cargas positivas que predecía Dirac deberían ser, parecía razonable suponer, protones, pero éstas tienen una masa mucho mayor que los electrones, y la ecuación relativista del electrón imponía que la nueva partícula positiva debía tener la misma masa que la negativa.

Dirac intentó durante bastante tiempo encontrar posibles mecanismos que explicasen tal diferencia de masas. No se atrevió a hacer lo más obvio: una lectura sencilla, directa, de su nueva y bella ecuación. Ni siquiera él tuvo tanta fe en el poder de la matemática en la física; no osó, en suma, interpretar aquellas vacantes, aquellos «huecos» como manifestaciones, o imágenes teóricas de un nuevo tipo de partícula elemental: antielectrones, de carga positiva pero idéntica masa que los electrones.

En 1931, y no sin evidentes precauciones, Dirac se arriesgó a dar aquel paso: predijo la existencia de tales partículas, que al ser descubiertas en los rayos cósmicos por Carl Anderson (1905-1991), en 1932, fueron denominadas «positrones».

Dirac nunca olvidaría aquella lección, la lección de, utilizando una expresión de Eugene Wigner (1902-1995) —la empleo también en otro lugar de este diccionario—, la «no razonable efectividad de la matemática en las ciencias naturales», sólo que para Dirac el calificativo wigneriano de «no razonable» estaba fuera de lugar. La física era —pensaba— matemática, aunque no cualquier tipo de matemática; las expresiones matemáticas «bellas» eran, para él «razonablemente», «intrínsecamente» eficaces en las ciencias naturales.

La fe, la pasión de Dirac por la eficacia y poder de la matemática en la física se vio, de esta manera, reforzada hasta límites que pocos —si alguno— físicos compartieron. Así, no aceptó la tremendamente fructífera electrodinámica cuántica porque incluía —y sigue incluyendo— procedimientos (de renormalización) para eliminar los infinitos que se dan en

las ecuaciones de esta teoría. Para Dirac esto era una «chapuza matemática», y por consiguiente también física.

Semejante actitud le separó de muchos de sus colegas, que no compartían sus puntos de vista. En este punto, la figura de Dirac se hermana con la de Einstein, ya que aunque éste nunca poseyó la fe que aquél tenía en la matemática, y mucho menos en las matemáticas «bellas», en su búsqueda de una teoría unitaria de campos que explicase, simultáneamente, las fuerzas gravitacional y electromagnética, adoptó un programa en el que le guiaba también la heurística matemática. Pensaba que serían las matemáticas, salpicadas de alguna consideración física, las que le guiarían para encontrar el Santo Grial de una ecuación universal, suprema ambición a la que fue ajeno Paul Dirac.

La idea diraciana del papel de la belleza matemática en la física no es, como cualquiera se puede imaginar, compartida por todos los físicos. Steven Weinberg, por ejemplo, manifestó en cierta ocasión lo siguiente: «A veces [...] he oído opiniones que me ponen nervioso, porque hablan acerca de que la belleza de la matemática inspira a la física. Bien, esto puede ser cierto para algunos físicos, pero me parece que en este punto se produce una ligera confusión. Lo que a veces inspira al teórico es la belleza de un principio teórico. Los principios teóricos que subyacen en la termodinámica son bellos. No creo que la formulación matemática particular en términos de $dS = dQ/T$ inspire algún afecto».

Enfrentado a un universo tan ambiguo y resbaladizo, el físico teórico se puede considerar como el protagonista de la historia del borracho que ha perdido una moneda. No tiene ni idea de dónde la ha perdido, pero está buscando debajo de un farol porque es allí donde la luz es buena. La matemática, algunas técnicas y expresiones matemáticas más que otras, son uno de esos faroles.

DISEÑO INTELIGENTE. Esta entrada no aparecía en la primera edición de este diccionario. La esencia de lo que en realidad voy a decir aquí se encontraba en la voz Dios. Me veo obligado, sin embargo, a volver al tema, esta vez bajo un nuevo término, de hecho un eufemismo con el que algunos pretenden introducir de nuevo la cuestión del creacionismo.

La lucha contra las ideas evolucionistas es ya vieja. El 30 de junio de 1860, menos, por tanto, de un año después de que Darwin publicase *El origen de las especies*, un obispo anglicano de triste recuerdo (el de Oxford, Samuel Wilberforce) intentó menospreciar la teoría de la selección natural con unas vergonzosas palabras dirigidas al distinguido biólogo y defensor de las ideas darwinianas Thomas Huxley (1825-1895). «Querría preguntar al profesor Huxley», dijo entonces aquel personaje, «acerca de su creencia de que desciende de un mono. ¿Procede esta ascendencia del lado de su abuelo o del de su abuela?». Palabras a las que Huxley contestó con la dignidad que él mismo, Darwin y la ciencia merecían: «No sentiría ninguna vergüenza de haber surgido de semejante origen; pero sí que me avergonzaría proceder de alguien que prostituye los dones de la cultura y la elocuencia al servicio de los prejuicios y la falsedad».

Hace casi 150 años que disponemos de uno de los instrumentos científicos que mejor nos han ayudado en la tarea de conocer cuáles fueron nuestros orígenes. Y el mismo tiempo ha transcurrido desde que la idea de la evolución de las especies que pueblan la Tierra (entre las que, guste o no guste, figura la especie humana) comenzó a ser atacada por motivos entre los que las creencias religiosas ocupan un lugar preferente.

Estados Unidos, la nación más poderosa del planeta, líder en el avance de la ciencia, se ha distinguido a lo largo de una parte del siglo XX en luchar contra la teoría de la evolución, no obstante haber vivido allí algunos de los evolucionistas más notables, como

Ernst Mayr o Stephen Jay Gould. A comienzos de la década de 1920 varios estados prohibieron la enseñanza de la evolución, prohibición que fue anulada en 1968, por anticonstitucional, por el Tribunal Supremo. Poco después, sin embargo, en la década de 1970, Arkansas y Louisiana introdujeron una norma que exigía que se dedicara el mismo tiempo en los colegios a enseñar una interpretación literal del *Génesis*, esto es, al creacionismo, que a la evolución (decisión que, de nuevo, fue revocada por el Tribunal Supremo, en 1987). Pero la historia no se detuvo ahí: en 1999, el Consejo Escolar de Kansas aprobó que se eliminara la evolución, así como la teoría del *big bang*, de los programas científicos del estado. No se prohibía su enseñanza, pero sí que el tema se incluyese en los exámenes que se realizaran en todo el estado.

A primeros de agosto de 2005, el presidente estadounidense George Bush volvió a la carga, esta vez utilizando una vieja táctica, la de emplear otras palabras: en lugar de «creacionismo», ahora se hablaba de «diseño inteligente» (alguien —un Dios— debió de diseñar la vida, y en particular la humana). Concretamente, lo que hizo es manifestar que el «diseño inteligente» se debería tratar al mismo tiempo que la evolución cuando se enseña a los estudiantes acerca de la creación de la vida. «Creo», dijo, «que parte de la educación es exponer a la gente a diferentes escuelas de pensamiento».

«Exponer a la gente a diferentes escuelas de pensamiento». Puede sonar bonito, incluso democrático, pero oculta falacias evidentes: en aras de semejante principio «pluralista», ¿debemos enseñar los principios de la democracia junto a los de la tiranía?, ¿dedicar el mismo tiempo a la alquimia que a la química, a la física de Aristóteles que a la de Einstein?, ¿introducir a los jóvenes en los principios de la magia al mismo tiempo que nos esforzamos en enseñarles los fundamentos de la ciencia? Por otra parte, quienes argumentan como Bush se olvidan de un detalle importante: hasta la fecha, la enseñanza de la religión —esto es, del creacionismo o del diseño inteligente— ha ocupado mucho más espacio y tiempo en los programas de estudio que la idea o teoría de la evolución. El que necesita más ayuda, no es la enseñanza de las religiones, que cuenta con todo tipo de instrumentos de promoción, dentro y fuera de la escuela, sino el evolucionismo.

Hay otro argumento, que casi es vergonzoso recordar: el creacionismo, el «diseño inteligente», puede consolar nuestras existencias (lo que es perfectamente comprensible), pero jamás ha explicado nada. Nos protege ante el desamparo de una existencia cuyo origen y sentido desconocemos, pero en modo alguno ilumina nuestro entendimiento, esa facultad que tanto valora nuestra especie. Por el contrario, la idea de la evolución, ya sea a la manera de Darwin o en otras versiones, no explica todo, por supuesto, pero sí muchas cosas, y cada vez más.

En realidad el señor Bush no es sino la punta más notoria de un enorme iceberg del que forman parte instituciones como The Discovey Institute, fundado en 1991 por un alto oficial de la administración Reagan. El diseño inteligente se ha convertido en una parte tan importante de las actividades de este instituto que ha creado una división, el Centro para la Renovación de la Ciencia y la Cultura, que dedica todo su tiempo a esa causa. Su táctica ha sido resumida con las siguientes palabras: «Utilizar el diseño inteligente como un instrumento para combatir la evolución y así promover una agenda político-religiosa conservadora».

En 1983, con ocasión del fallecimiento de Kirthely Mather —quien en 1925 había testificado a favor de la evolución en un juicio que se celebró en Tennessee contra John Scopes, un profesor de instituto que fue condenado por enseñar la teoría de la evolución— el gran naturalista y divulgador científico Stephen Jay Gould escribió: «Cuando pienso que

estamos de nuevo enzarzados en la misma lucha por uno de los conceptos mejor documentados, más convincentes y excitantes de toda la historia, no sé si reír o llorar». Pues eso, pero otros veinte años después.

[Véase: DARWIN, DIOS].

DOLLY. Hasta el 27 de febrero de 1997, cuando la revista *Nature* publicó un artículo que había llegado a su redacción el 25 de noviembre de 1996, titulado «Descendencia viable derivada de células fetales y adultas de mamífero», que estaba firmado por Ian Wilmut, el líder del grupo formado por, A. E. Schnieke, J. McWhir, A. J. Kind y Keith H. S. Campbell, en el que se anunciaba que se había clonado una oveja, yo siempre asociaba el nombre Dolly al de la maravillosa canción de Louis Armstrong (1901-1977) en la película de 1969 titulada, *Hello Dolly!* Después de aquel artículo de 1997 cuando escucho ese nombre pienso en una oveja, en Dolly, el animal que Wilmut y Campbell clonaron.

El artículo de Wilmut y sus colaboradores no era un artículo cualquiera, uno más de los miles que constantemente irrumpen en la literatura científica, sino uno en el que se anunciaba que se había conseguido traspasar una frontera muy especial: la reproducción de un mamífero, una oveja —Dolly, nacida en julio de 1996— transfiriendo la carga genética (el ADN, los cromosomas) del núcleo de una célula de una glándula mamaria (es decir, una célula somática, no germinal) de una oveja adulta a un óvulo no fecundado y al que se le había extraído su núcleo. Se había, en suma, *clonado* un mamífero.

Como es posible que los lectores deseen algún detalle más, les diré, más concretamente, que lo que hicieron los creadores de Dolly es obtener un óvulo de oveja, eliminar su núcleo, sustituirlo por el de una célula (tomada de las mamas) de oveja adulta, y, finalmente, implantarlo en una tercera oveja, que es la que «quedó embarazada» y llevó a término el embarazo dando a luz a la graciosa (las fotos los demuestran) Dolly, que, como vemos, no tiene padre y sí tres madres: la que suministró el óvulo, la que donó el núcleo y la que hizo de madre adoptiva.

En realidad, Dolly no fue el primer clon de un mamífero; estrictamente, los gemelos son clones, pero lo son de un tipo muy diferente: en su caso se trata de una clonación natural, y más absoluta, por cierto, ya que al surgir de una escisión embrionaria, poseen no sólo idéntico ADN sino también el mismo citoplasma (la sustancia, recordemos, que rodea al núcleo, en donde se encuentra el ADN), mientras que clones como Dolly sólo tienen el mismo ADN que la célula que aporta la carga genética (en la medida en que el ADN no opera aislado, sino que se halla en constante «diálogo» con su entorno citoplasmático —en el que existen mitocondrias, que también tienen alguna carga genética—, Dolly no es, por tanto, un verdadero clon de la oveja original, sino simplemente un clon del ADN, o «clon genómico»).

Antes, en agosto de 1995, el grupo de investigación que *creó*, porque de una creación se trata, Dolly había producido dos ovejas clónicas de raza Welsh Mountain —Megan y Morag—. La diferencia con Dolly es que procedían de células que, recogidas de embriones de nueve días, fueron cultivadas, diferenciándose en el cultivo: habían sido clonadas a partir de células embrionarias, no de células adultas como en el caso de Dolly. Después de Megan, Morag y Dolly, los investigadores del Instituto Roslin de Edimburgo (que es donde trabajaban estos científicos) continuaron «apretando la tuerca de la creación», dando una vuelta más, una vuelta que mostraba con claridad lo que vendría en el futuro: en 1997 nació otra oveja, Polly, clonada a partir de células cultivadas y transformadas genéticamente (se les añadió un gen humano durante el proceso).

Una vez que se abren las puertas de un nuevo mundo científico, éste será —salvo que los poderes públicos introduzcan restricciones legales— visitado, explorado, utilizado, incluso, si es realmente atractivo y fecundo, expoliado. Así es la ciencia, que nadie se engañe. Y así parece que está ocurriendo, y promete seguir ocurriendo, con la clonación. Un momento especialmente significativo en este sentido tuvo lugar cuando el 25 de noviembre de 2001 la empresa estadounidense de investigación genética, Advanced Cell Technology (ACT), anunció en una revista de la red (*e-biomed: The Journal of Regenerative Medicine*) que había clonado un embrión humano con una técnica similar a la empleada con Dolly. La investigación, se añadía, no tenía por objetivo la duplicación de un humano, sino la obtención de células madre (de las que también hablo en este diccionario), el nuevo El Dorado de la investigación biomédica, las células que, no se sabe por qué o cómo, poseen la capacidad de convertirse en todo tipo de tejidos de órganos, lo que las hace especialmente susceptibles de ser utilizadas en el tratamiento de muchas enfermedades. «Las entidades que estamos creando», manifestaba Michael West, el fundador de ACT, «no son individuos, ni científica ni biológicamente. Es sólo vida celular, no una vida humana».

Se abre, en definitiva, un mundo nuevo, que nos llevará, más pronto que tarde, a territorios que nuestros abuelos —y, para los más mayores, también nuestros padres— jamás soñaron. Nuestros hijos, o, a lo más tardar, los hijos de éstos, transitarán por ellos. Deberíamos, no obstante, tener cuidado, e imponer algunos límites, el de la clonación humana entre ellos. Pero si les digo la verdad, no estoy seguro que se respete esta barrera, entre otros motivos porque algunos tipos de «clonación» —o variantes relacionadas— humana pueden servir para producir niños cuya carga genética sirva a hermanos suyos que padecen graves males. El futuro dirá, pero estemos alerta y procuremos influir en el proceso con nuestras opiniones. La ciencia, recordemos no es la reina suprema, el Dios al que debemos obedecer sumisos. Los reyes somos nosotros.

Dolly, por cierto, dio a luz (el 13 de abril de 1998) a una oveja a la que se puso el nombre de Bonnie, y el 14 de febrero de 2003 recibió una inyección letal tras haberse descubierto en ella signos de enfermedad pulmonar progresiva. Tenía seis años y había contribuido a cambiar el mundo. ¡Pobre Dolly!

E

EFECTO INVERNADERO. La vida en la Tierra depende de la energía que recibimos del Sol. Sin ella no sería posible.

De la energía que emite el denominado astro rey (no lo es tal; cósmicamente hablando es una estrella bastante vulgar) hacia nuestro planeta, no toda llega a su superficie. Las nubes y los océanos reflejan, como si fueran unos espejos, cerca del 30 por ciento. Otro 25 por ciento es absorbido por la propia atmósfera. Al suelo llega, por tanto, un 45 por ciento. Ahora bien, también esta energía (que se encuentra en la banda espectral que corresponde al infrarrojo) debe terminar abandonando la Tierra, volviendo al espacio. Si fuésemos almacenando al menos parte de esta energía, terminaría aumentando la temperatura del planeta (la energía no puede desaparecer, sólo se transforma). Pero para retornar al espacio exterior, el calor radiado debe, naturalmente, atravesar de nuevo la atmósfera y sucede que algunas moléculas pueden atrapar esa energía calorífica, devolviéndola a la superficie. Los rayos solares pueden entrar, pero el calor transportado por el aire no puede salir tan fácilmente. Exactamente como si fuese un cristal. Éste es el famoso efecto invernadero.

Una pregunta inmediata es qué hace que un gas atrape energía. Y otra no menos relevante, por qué hablamos solamente de unos pocos gases cuando nos referimos al efecto invernadero y no de otros, más abundantes en la atmósfera terrestre, como el nitrógeno y el oxígeno, que constituyen casi el 99 por ciento de nuestra atmósfera, o el argón, que ocupa la mayor parte del 1 por ciento restante. La respuesta a estas cuestiones procede de la química: el que una molécula absorba energía radiante depende de su estructura. En primer lugar, debe poseer enlaces químicos que vibren al recibir la energía calorífica; y esto es justo lo que no ocurre con los denominados gases nobles (el argón es uno de ellos; también lo son el helio, el neón, el kriptón o el xenón), que aparecen en la atmósfera como átomos, no como moléculas.

Pero la condición de poseer un enlace tampoco es suficiente para absorber rayos infrarrojos. Si el enlace es entre dos átomos del mismo elemento químico, no se produce la interacción en cuestión. Por ello, ni el nitrógeno, ni el oxígeno, ni el hidrógeno, que existen en la atmósfera en la forma N_2 , O_2 y H_2 son gases de invernadero. Afortunadamente, ya que, dada su abundancia, si lo fuesen esta Tierra nuestra sería un horno insostenible. De nuevo nos encontramos aquí con una manifestación del débil, improbable equilibrio que ha hecho y hace posible la existencia de la vida tal y como la conocemos.

Moléculas que sí atrapan energía son, entre otras, el agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O) o el monóxido de carbono (CO). Pero, como es natural, no todas estas moléculas capturan los rayos infrarrojos con idéntica eficacia. Unas interaccionan, o «responden», a un rango mayor de longitudes de ondas de esa radiación infrarroja que otras, y dejan, por tanto, escapar menos energía que las que reaccionan a menores frecuencias. El agua es, en este sentido, mucho más eficaz que el dióxido de carbono. Y también encontramos agua, bajo forma de vapor, en la atmósfera. Si a esto le añadimos el que mientras la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera es, como ya vimos, del 0,035 por ciento, la del vapor de agua varía entre el 1 por ciento, en un día seco, y el 4 en un día caluroso y húmedo, tendremos motivos suficientes para temer del agua más que del dióxido de carbono, en lo que al efecto invernadero se refiere. De hecho, hasta hace poco no faltaban quienes argumentaban que

existe poca relación entre la cantidad de CO₂ que existe en la atmósfera y su temperatura media; y que el aumento del 25 por ciento que se ha producido de dióxido de carbono atmosférico durante el último siglo ha contribuido en una parte muy pequeña a la subida de la temperatura de nuestra atmósfera. Tales especialistas estimaban que se tardaría alrededor de doscientos años en doblar la concentración de CO₂, y que tal aumento produciría una subida de la temperatura de 1 °C. En la actualidad, tras haber desarrollado complejos y poderosos modelos matemáticos del ciclo del carbono que tienen en cuenta la interacción entre el CO₂ del aire y los océanos y la vegetación terrestre, se estima que el resultado de duplicar la cantidad de dióxido de carbono existente en la atmósfera sería un aumento de temperatura de la Tierra de no menos de 1 °C y de no más de 9 °C. Es, ciertamente, un rango amplio, pero incluso los límites inferiores son peligrosos, no digamos la media. Y lo peor es que ya hay quienes dicen que la cantidad de CO₂ en la atmósfera no se duplicará sino que se triplicará. Estamos, es patente, moviéndonos en el filo de una navaja muy cortante.

Aun si creen que las predicciones científicas en este complejo dominio no son seguras, no se escuden, por favor, en tales consideraciones para seguir atentando contra el medio ambiente. Algunos tipos de vida se mueven en un margen muy estrecho, y aunque pueden ser cuantitativa y relativamente pequeñas las alteraciones que provoquen en algunos parámetros el aumento en la atmósfera de algunos gases, las consecuencias que pueden acarrear en otros acaso no lo sean tanto. Recuerden el caos, y aquello de la sensibilidad a las condiciones iniciales. Decía entonces que el caos es una característica de muchos sistemas no lineales; pues bien, si existe algún sistema no lineal es el que constituye el conjunto de la naturaleza.

[Véase DIÓXIDO DE CARBONO].

EINSTEIN (Albert). 1879-1955. Albert Einstein fue un gran físico, uno de los dos —el otro es Isaac Newton— mejores de todos los tiempos. Llegó, además, a lograr una popularidad social descomunal, que no desapareció ni siquiera tras su muerte. Su nombre es, todavía hoy, familiar incluso para aquellos —probablemente la mayoría— que ignoran a qué se debe realmente su fama.

Aunque alemán de nacimiento, no consiguió soportar la filosofía educativa germana, y en diciembre de 1894 abandonó Alemania, siguiendo a su familia que se había instalado, por motivos laborales, en Milán. El año siguiente reanudó sus estudios en Suiza, el único país por el que mostró algún apego a lo largo de su vida, y en cuya Escuela Politécnica de Zúrich se graduó en Física y Matemáticas en 1900.

En una época en la que la ciencia ya se había profesionalizado, en la que una carrera académica se iniciaba al terminar los estudios universitarios, convirtiéndose el recién graduado en ayudante de algún científico establecido, o, si acaso —en aquellos países suficientemente desarrollados—, vinculándose a un laboratorio industrial de investigación, el caso de Einstein es, al igual que su obra, singular. Incapaz de encontrar un lugar —o lo que era prácticamente equivalente— un protector, el joven Albert tuvo que aceptar, en 1902, un empleo en la Oficina de la Propiedad Intelectual de Berna, que mantuvo hasta 1909. Fue allí, mientras evaluaba solicitudes de patentes, en donde Einstein comenzó realmente su carrera científica. En 1905, su *annus mirabilis*, publicó en la revista *Annalen der Physik* tres trabajos que terminarían conmoviendo los pilares de la física: «Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz», en el que extendió la discontinuidad cuántica que Max Planck (1858-1947) había introducido en la física cinco años antes; «Sobre el movimiento requerido por la teoría cinético-molecular del

calor para partículas pequeñas suspendidas en fluidos estacionarios», en el que, a través de un análisis teórico del movimiento browniano, demostraba la existencia de átomos de tamaño finito; y «Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento», el artículo con el que creó la teoría de la relatividad especial [véase RELATIVIDAD]. Por cierto, tanto el trabajo sobre el movimiento browniano, como el de la producción y transformación de la luz se basan en consideraciones estadísticas; y es que Einstein forma, junto a Ludwig Boltzmann (1844-1906) y Josiah Williard Gibbs (1839-1903), el gran triunvirato de los físicos estadísticos de la historia de la ciencia (si ampliamos un poco el ámbito temporal, habría que incluir a Maxwell).

Aunque no inmediatamente, el mundo académico comenzó a advertir la presencia de aquel oficinista de Berna. En 1909 consiguió su primer puesto universitario, en Zúrich. Luego vendrían, en rápida sucesión, cátedras en Praga (1911), Zúrich (1912), de nuevo, y Berlín (1914), el sanctasanctórum de la física mundial, junto a colegas del calibre de Planck o Walther Nernst (1864-1941). En la capital prusiana, precisamente, llegó, en 1915, a lo que sería su mayor logro científico (aunque no está claro que sea el más permanente): la formulación de una teoría de la interacción gravitacional radicalmente nueva, la relatividad general [véase RELATIVIDAD]. Casi inmediatamente, en 1916 y 1917, Einstein aplicaba su nueva teoría al conjunto del universo, formulando un modelo de universo estático de densidad uniforme con el que creó la cosmología, entendida como disciplina auténticamente científica, frente a las no completamente analíticas, escasamente predictivas, cosmogonías anteriores.

En 1919, una expedición británica confirmó —midiendo las trayectorias de la luz de algunas estrellas durante un eclipse de Sol— que se verificaba una de las predicciones de esta nueva teoría, la que dice que los rayos de luz cambian de dirección en las proximidades de un cuerpo de gran masa (como el Sol). Cuando aquellos resultados se hicieron públicos, en una célebre reunión de las sociedades británicas de física y astronomía que tuvo lugar el 6 de noviembre de aquel mismo año, Einstein pasó a convertirse en una figura mundialmente célebre. Rara vez tuvo a partir de entonces la paz que siempre dijo buscar. Tampoco le ayudó la trágica historia política de nuestro siglo. Pacifista convencido, vio cómo incluso los colegas a los que más estimaba (como Planck) defendían que la primera guerra mundial era para Alemania una guerra justa. Su progresismo y origen judío, combinado con el prestigio internacional de que gozaba, tampoco le ayudaron cuando, en enero de 1933, Adolf Hitler se convirtió en canciller alemán (no fue, por cierto, Einstein un sionista militante, por mucho que llegase a colaborar con ellos; significativas son estas frases que escribió en 1929: «Hace quince años, al llegar a Alemania, descubrí por primera vez que yo era judío y debo ese descubrimiento más a los gentiles que a los judíos»). Afortunadamente, cuando Hitler llegó al poder Einstein se encontraba en Pasadena (Estados Unidos), invitado por el California Institute of Technology. Aunque regresó a Europa, nunca volvería a pisar suelo alemán. El manifiesto que hizo público en marzo de 1933 contiene la esencia de la filosofía que defendió a lo largo de su vida en cuestiones sociales. Es apropiado reproducirlo aunque esto sea un diccionario de ciencia:

Mientras se me permita elegir, sólo viviré en un país en el que haya libertades políticas, tolerancia e igualdad de todos los ciudadanos ante la ley. La libertad política implica la libertad de expresar las propias opiniones políticas verbalmente y por escrito; la tolerancia implica el respeto por todas y cada una de las creencias individuales.

Estas condiciones no existen en Alemania hoy. Quienes más han hecho por la causa

de la comprensión internacional, entre quienes se encuentran muchos artistas, sufren, en ella, persecución.

Todo organismo social puede equilibrarse psicológicamente, tal como ocurre con los individuos, en especial en tiempos difíciles. Las naciones, por lo común, sobreviven a esas enfermedades. Tengo la esperanza de que bien pronto la normalidad vuelva a imponerse en Alemania y de que en el futuro sus grandes hombres, como Kant y Goethe, no sean recordados de cuando en cuando, sino que los principios que ellos defendieron y enseñaron se tomen en cuenta en la vida pública y penetren en la conciencia general.

No le faltaron a Einstein, como era de esperar, ofertas de puestos académicos. Las universidades de París y Madrid fueron las que más pugnaron por obtener sus servicios, aunque finalmente aceptó la oferta del recién creado Institute for Advanced Study de Princeton. Nunca abandonaría el suelo norteamericano (de hecho, en 1940 adoptó la nacionalidad estadounidense).

El éxito científico y la fama popular que obtuvo, o las causas sociales en que se involucró, no impidieron que Einstein continuase investigando el resto de su vida; al fin y al cabo ése era el mundo en el que él quería vivir y por ello adoptó siempre que pudo filosofías trascendentalistas como las que menciono en mi introducción. El mundo de la relatividad general fue su tema preferido; en especial, lo que llamó «teoría del campo unificado». Una denominación esta con la que se refería a una formulación que incluyese, junto a la gravitacional, a la otra interacción conocida entonces, la electromagnética, dentro del mismo tipo de construcción, geométrica, que caracteriza a la relatividad general. Fue éste un problema que le llevó (como apuntaba a propósito de Dirac) a introducirse en un camino en el que eran las posibilidades matemáticas —estructuras formales suficientemente ricas como para, en principio, dar cabida a las variables electromagnéticas— las que dirigían sus esfuerzos. Fue la suya una lucha titánica y solitaria, ya que la gran mayoría de sus colegas no compartían sus esperanzas, ni siquiera una de las ideas esenciales detrás de sus intentos: lograr explicar, dentro del marco de una teoría hasta cierto punto «clásica», en la que no se renunciase a la continuidad y al determinismo, los fenómenos de que daba cuenta la teoría cuántica («una teoría verdaderamente racional —escribió Einstein a su amigo Michele Besso en septiembre de 1952— debería permitir *deducir* las partículas elementales [...] y no estar obligada a *postularlas a priori*»). Y es que Einstein, que junto con Planck había sido uno de los originadores del movimiento que condujo a la mecánica cuántica, nunca aceptó esta teoría. Entendía que no se la podía considerar una formulación completa. No aceptaba su carácter estadístico, situación un tanto peculiar, toda vez que también fue él quien, en 1917, introdujo realmente tal rasgo en la física cuántica. Sus manifestaciones en contra de la mecánica cuántica abundan en sus escritos. Ahora bien, tal oposición no le impedía reconocer que se trataba de la teoría física de más éxito de su tiempo, en tanto que permitía comprender unitariamente las experiencias relativas al carácter cuántico de los procesos micromecánicos, poseyendo, además, una forma lógica consistente.

El rasgo específico de la física cuántica que más chocaba a Einstein era el que en ella el resultado de una medida dependiese del proceso de medición; pensaba que tal característica de la interpretación más ampliamente aceptada de la mecánica cuántica —la interpretación de Copenhague— era incompatible con una definición aceptable del concepto de «lo físicamente real». Lejos de limitarse a expresar una oposición de carácter

meramente programático o metodológico, Einstein expresó su rechazo mediante argumentos que utilizaban situaciones experimentales posibles. La manifestación más conocida de sus ideas es el artículo que publicó en 1935, en colaboración con Boris Podolsky y Nathan Rosen, en la revista *Physical Review*: «¿Puede considerarse completa la descripción mecánico-cuántica de la realidad?».

En este trabajo, Einstein y sus colaboradores comenzaban definiendo —nada más y nada menos— la noción de «realidad». Cualquier atributo de un sistema físico que pueda ser determinado con precisión sin perturbar el sistema es —afirmaban— un «elemento de la realidad física», y una descripción de un sistema se considerará completa únicamente cuando incluya todos los elementos de la realidad que puedan ser asociados a ella.

El efecto del artículo de Einstein, Podolsky y Rosen fue inmediato. Niels Bohr (1885-1962), el gran patrón de la física cuántica y, en particular, de la interpretación de Copenhague (ciudad en la que se encontraba su Instituto de Física), que de hecho había mantenido vivas discusiones con Einstein sobre estos temas durante el Congreso Solvay de 1930, publicó inmediatamente, con el mismo título y en la misma revista, una respuesta a las objeciones de Einstein, abriendo un debate que todavía no se ha cerrado completamente, aunque pocas dudas quedan ya de que la mecánica cuántica ha resultado vencedora.

Hasta el final de sus días, Einstein continuó manteniendo sus opiniones acerca de lo incompleto de la teoría cuántica, e intentando encontrar una teoría en la que basándose en, únicamente, campos continuos se dedujesen todas las características cuánticas. El éxito, sin embargo, no le acompañó. Pero él no perdió la fe en la validez final de sus ideas. El tiempo, sin embargo, parece haber demostrado que en esta ocasión su tantas veces genial intuición no señaló la dirección correcta.

$E = MC^2$. No podía faltar en una obra que tiene que ver con la ciencia la expresión matemática (muy simple en este caso) que resume una ley física. Las «fórmulas», como popular y yo creo que inapropiadamente se dice (más correcto es hablar de «ecuaciones» o «expresiones» matemáticas; a veces, incluso, «leyes»), constituyen casi la esencia de la ciencia. Son la condensación suprema de ideas, conceptos y observaciones; la expresión analítica de comportamientos uniformes, constantes, que nos sirve, además, para predecir el resultado de fenómenos a observar o manejar en el futuro.

Existen miles, acaso millones, de ecuaciones importantes en la ciencia, pero pocas son tan populares como $E = mc^2$. Por ello, sin desdeñar o minusvalorar su importancia intrínseca, la he seleccionado para este diccionario.

Se trata de una ecuación que se obtiene a partir de la teoría especial de la relatividad [véase RELATIVIDAD]. De hecho, Einstein llegó a ella, en septiembre de 1905, apenas dos meses después de haber completado la estructura de esa teoría. Relaciona la energía (E), de cualquier objeto o sistema físico, con su masa (m), y el cuadrado de la velocidad de la luz (c), que, en las unidades más frecuentes, tiene un valor de aproximadamente trescientos mil kilómetros por segundo. En la presentación que de ella realizó Einstein, podemos trasladarla a palabras como: «La masa de un cuerpo es una medida de su contenido de energía; si la energía cambia en E , la masa cambia en el mismo sentido en E/c^2 ».

$E = mc^2$ es una ecuación válida universalmente, aunque solamente en los fenómenos nucleares son los cambios de masa lo suficientemente grandes (aunque minúsculos en cualquier caso para nuestras escalas de experiencia habituales) para poder medirlos y relacionar la producción de energía con las variaciones másicas. Cuando aún no se había encontrado esta fórmula, los fenómenos radiactivos, descubiertos en 1896 por

Antoine Henri Becquerel (1852-1908), en los que elementos químicos emitían energía de manera aparentemente inagotable, resultaban incomprensibles. Esta pequeña y, en cuanto a complicación, insignificante expresión explica, asimismo, en parte la razón de fenómenos absolutamente esenciales para nuestra vida; como por qué las estrellas —el Sol entre ellas— radian energía durante tanto tiempo, tan abundantemente. Y también de otros fenómenos que aunque no sean tan esenciales, sí han ejercido una cierta influencia en la historia reciente: la emisión de cantidades descomunales de energía en una bomba atómica, aunque, como se explica en otro lugar de este diccionario (FISIÓN NUCLEAR), para entender completamente procesos como éste hay que recurrir también a otros elementos (teorías y conceptos).

ENERGÍA. Término que, sin ningún adjetivo (como pueden ser «mecánica», «nuclear» o «eólica»), empleamos con gran frecuencia. De hecho, de tanto emplearlo creemos entenderlo. El concepto de energía es, efectivamente, uno de los más básicos que aparecen, pero también uno de los más profundos, y por ello contiene aspectos que no son tan inmediatos como normalmente se cree.

Aquellos que hayan pasado por un curso elemental de física, recordarán, probablemente, la manera en que se introduce en la física básica la energía: de una forma estrechamente relacionada con la noción de trabajo (fuerza por camino recorrido). Aparece así primero la «energía cinética» (vinculada con la velocidad, lo cual es muy satisfactorio para la idea de que «energía» y «esfuerzo» son casi formas diferentes de decir lo mismo), y luego la «energía potencial», que representa la contribución a la energía de la fuerza con la que estamos relacionándonos (por ejemplo, la gravitacional).

Pero esta energía «mecánica», intuitivamente próxima, no cubre todos los tipos de energía de los que hablamos y que con tanto éxito relacionó Hermann von Helmholtz, cuando en 1847 introdujo en la ciencia el principio de conservación de la energía [véase HELMHOLTZ], con el que dotó a la ciencia del siglo XIX de un poderosísimo instrumento de análisis de la naturaleza. ¿Qué queremos decir, por ejemplo, cuando nos referimos a la energía electromagnética?, ¿disponemos de una manera «mecánicamente intuitiva» para introducir semejante concepto? No. Lo que conocemos, como insistió el propio Helmholtz, y otros como James Prescott Joule (1818-1889), es que fenómenos electromagnéticos producen efectos mecánicos, esto es, trabajo. Pero esto no permite introducir, en términos cuantificables, el concepto de energía electromagnética. Éste surge de la interpretación de una ley (o teorema) de conservación existente en el electromagnetismo: el teorema de Poynting. *Interpretamos* esa ley de conservación diciendo que representa la conservación de la energía electromagnética. Procedimientos similares, más o menos indirectos, se utilizan para hablar de otros tipos de energía.

Pero basta ya de explicaciones técnicas, que no es éste mi propósito. Lo que pretendo es transmitir la idea de que incluso uno de los conceptos científicos que nos resulta más familiar, como es el de energía (algo, por otra parte, real), termina, según se desarrolla y penetra en nuevos ámbitos el conocimiento científico, alejándose del agradable y confortable reino de lo intuitivamente próximo. En esto consiste la ciencia: en ir construyendo, a partir de conceptos familiares, nuevas estructuras, en las que mantenemos aquellas viejas ideas pero ahora en nuevos constructos. A lo largo de semejante proceso puede ocurrir que nos veamos obligados a prescindir de aquellas ideas, pero nos resistiremos tanto como podamos, puesto que nada hay tan perturbador, incluso en ciencia, como abandonar ideas, conceptos, teorías que creíamos entender.

Así, la física contempla en la actualidad el concepto de energía primariamente desde

la perspectiva de las leyes de conservación. Se han desarrollado técnicas matemáticas (como las elaboradas por la matemática germana Emmy Noether [1882-1935]) que relacionan simetrías y leyes de conservación. En la mecánica elemental tradicional, es posible llegar a la conservación de la energía como una consecuencia de haber asumido la homogeneidad temporal; esto es, que las propiedades de nuestro sistema no cambian cuando efectuamos una traslación del origen que se ha tomado para el tiempo (Leibniz habría estado muy feliz de ver estos planteamientos). Si el sistema es invariante bajo traslaciones temporales, habrá conservación de energía (en realidad, las cosas son algo más complicadas). Asimismo, existen otras relaciones; por ejemplo: conservación del momento lineal —masa por velocidad— con invariancia bajo traslaciones espaciales.

Ahora bien, ¿existe alguna razón por la que las simetrías o las leyes de conservación deban verificarse?, ¿hay algo de «sagrado», científicamente hablando, en ellas? La respuesta a esta pregunta, tan fundamental, depende de algo tan resbaladizo como son las convicciones metafísicas (en el buen sentido —«más allá de la física»— de esta originalmente magnífica palabra) de quien se la está planteando. A muchos espíritus les encantaría que la naturaleza estuviese obligada a verificar (o que su estructura fuera, de alguna manera, equivalente a) simetrías, o leyes de conservación, «fundamentales». Pero ¿por qué el espacio, por ejemplo, debe ser homogéneo?, ¿por qué debería conservarse la energía, sea este concepto el que sea? O ¿está la naturaleza obligada a ser invariante bajo cambios especulares (paso de x a $-x$)?

De hecho, la física contemporánea ha tenido ya que renunciar a algunas simetrías en las que creía profundamente. ¿Por qué no iba a ocurrir lo mismo con la energía? Durante algún tiempo, cuando se buscaba con afán una mecánica cuántica, Niels Bohr se mostró dispuesto, deseoso incluso, de abandonar el requisito de la conservación de la energía en el nivel cuántico. Argumentaba que este principio de conservación sólo tenía validez estadística, para grandes números de átomos, esto es, para la materia tal y como la vemos, pero que no se verificaba a nivel atómico. Y no se limitó a planteamientos generales, de intenciones: propuso, junto con otros dos físicos, Hendrik A. Kramers (1894-1952) y John Clarke Slater (1900-1976), una teoría en la que no se conservaba la energía. A otros físicos —como a Einstein o a Planck— les repugnaba semejante posibilidad. Era cuestión de gustos. La experiencia, aunque metodológicamente ambigua, es más directa. Y en aquel caso un experimento, realizado por Arthur Holly Compton (1892-1962) e interpretado como el choque, acorde con la conservación energética, de un fotón con un electrón, dio la razón a los que, en aquel contexto, creían en la validez del principio de conservación de la energía.

¿Será igual en el futuro? No lo sabemos. No hay nada sagrado en el contenido de la ciencia, únicamente lo son los procedimientos que emplea.

(Nótese que aquí únicamente he hablado de la energía como un concepto teórico científico, no de la energía producida por combustibles u otros medios. Algo de esto digo en la siguiente entrada: ENERGÍA NUCLEAR).

ENERGÍA NUCLEAR. Entre las novedades que ha aportado la ciencia —y la tecnología— a la segunda mitad del siglo XX, pocas son tan conocidas como la energía nuclear, que se encuentra detrás de otras entradas de este diccionario. En ésta quiero ocuparme de la utilización con fines pacíficos de esa energía (la que procede de la fisión, no de la fusión), aunque, como veremos, no es posible separar neta y radicalmente este ámbito del militar.

La energía, a secas, ha sido, es y seguirá siéndolo en el futuro, protagonista de

nuestro mundo. La necesitamos para prácticamente todo: no hay vida sin energía. Y si tenemos en cuenta el crecimiento exponencial que por el momento experimenta la población mundial, y la mejora del nivel de vida en muchas sociedades, la consecuencia es inmediata: la demanda de energía ha aumentado, aumenta y seguirá aumentando.

Pero, lo sabemos todos, los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas...) son limitados, y, más pronto o más tarde —¿qué son unos cientos de años comparados con la vida que le queda todavía a la Tierra?— se agotarán. No nos preocupemos demasiado —se argumenta a menudo—, el avance del conocimiento científico proveerá; se descubrirá algo que permitirá a nuestros descendientes resolver el problema energético. Éste es un primer punto —el del papel providencial de la ciencia— que quiero comentar.

Es cierto que a lo largo de los últimos siglos la ciencia —y la tecnología más o menos dependiente de la ciencia— ha estado detrás de la enorme multiplicación de recursos, en última instancia energéticos, de que ha dispuesto la humanidad, y que esta tendencia no ha disminuido durante las últimas décadas, aunque haya sido fundamentalmente no mediante el descubrimiento de nuevas fuentes de energía, sino vía el desarrollo de nuevos procesos y materiales más eficientes (esto es especialmente evidente en el caso de las telecomunicaciones, no, de todas maneras, las más onerosas desde el punto de vista del consumo energético). Existen, además, algunas ideas sobre nuevos mecanismos para producir energía; pero la mayoría (energía eólica, solar, mareomotriz...) no parece que puedan resolvernos excesivos problemas. El caso es diferente con la posibilidad de energía de fusión [véase FUSIÓN NUCLEAR], pero aún no es más que una promesa. La energía nuclear, obtenida a partir de la fisión de elementos como el uranio o el plutonio, es la otra gran posibilidad de que tenemos evidencia; es, al contrario que la fusión, una realidad, no una promesa.

Es posible que el avance de la ciencia produzca en el futuro otros mecanismos, pero es preciso dejar claro que no existe ninguna seguridad de que así sea. Tendemos a pensar en la ciencia como si fuera la chistera de un mago supremo, de la que será posible extraer siempre nuevas maravillas; puede tardar algo, pero nos terminará resolviendo cualquier problema. No sé si será así, y desde luego nadie lo sabe, pero tiendo a pensar que aunque todavía esperan innumerables sorpresas científicas a la especie humana, no todo será posible. No todo es, de hecho, posible. Una de las misiones de la ciencia es, precisamente, distinguir lo posible de lo imposible. Jugar, por consiguiente, con la posibilidad de que la ciencia del futuro proveerá para justificar así los abusos que podamos estar cometiendo, es algo que no sustenta ni la historia, ni la lógica (el sentido común, me atrevería a decir). Lo que sucede es que nos escudamos en la ciencia, la utilizamos ideológicamente, para defender nuestros intereses, unos intereses en los que apenas desempeñan algún papel las necesidades futuras de nuestros descendientes.

Es por este motivo que considero importante detenerme en el tema de la energía nuclear, intentando separar el grano de la paja, aun a sabiendas que no es, precisamente, un tema fácil de analizar desapasionadamente. Al mismo tiempo que se vieron las posibilidades militares de la fisión del uranio [véase MANHATTAN, PROYECTO], se vislumbró su utilidad para la producción de energía con fines pacíficos. Sin embargo, el éxito de las bombas atómicas de agosto de 1945 hizo que las técnicas nucleares permaneciesen como secretos de Estado, una situación poco favorable para el establecimiento de una industria civil. Por ello, la historia de la energía nuclear tras la segunda guerra mundial constituye un complicado entramado: control o limitación de armamentos nucleares; desarrollo de la industria nuclear con fines pacíficos; creación de

nuevas instituciones para asegurar el secreto, el control o la utilización industrial de la energía nuclear; campañas como «Átomos para la Paz», que el presidente Dwight Eisenhower presentó ante la Asamblea General de Naciones Unidas en diciembre de 1953, pocos meses después de la muerte de Josef Stalin (marzo) y del final de la guerra de Corea (julio); y también ideas, hoy sabemos que «locas», como la utilización de reactores nucleares para propulsar aviones (se estimó que el blindaje necesario pesaría entre cincuenta y cien toneladas), un proyecto denominado «Aircraft Nuclear Propulsion», en el que se gastaron mil millones de dólares.

Si en el transporte aéreo la energía nuclear fracasó, no ocurrió lo mismo en el marítimo (militar). En agosto de 1951, la Marina estadounidense firmó un contrato con la Electric Boat Company para la construcción de un submarino impulsado por un reactor de agua a presión. El resultado fue el *Nautilus*, que entró en funcionamiento en 1954. Este reactor constaba, esencialmente, de placas del isótopo 235 del uranio (U-235), moderado (esto es, controlado para evitar que se produjese una reacción en cadena) y enfriado por agua ordinaria. No era la única elección posible, ni, desde el punto de vista de la industria civil, la mejor, toda vez que estos reactores convierten únicamente alrededor del tres por ciento de su combustible en energía utilizable.

Ahora bien, en este punto hay que darse cuenta de que los científicos e ingenieros, la mayoría formados durante el proyecto Manhattan, que, a partir de los años cincuenta, se dedicaron a la tarea de diseñar reactores nucleares se encontraban con un número enorme de posibilidades, ya que existen muchas variantes para cada componente de un reactor (combustible, refrigerante, moderador). El material fisionable puede ser, por ejemplo, no sólo U-235, sino también U-233 o, por supuesto, plutonio-239; el refrigerante, agua ordinaria, agua pesada, gas o metal líquido; el moderador, grafito, berilio, agua ordinaria, agua pesada o, como en el reactor rápido de neutrones, ningún moderador. Se ha llegado a afirmar que si se cuentan todas las combinaciones posibles de combustible, refrigerante y moderador, se pueden identificar alrededor de mil reactores diferentes. Las elecciones que se tomaban al inicio pesaban gravemente en los caminos a seguir en el futuro. «Cuando miro hacia atrás —ha señalado en sus memorias Alvin Weinberg, director del Oak Ridge National Laboratory entre 1955 y 1973, y una de las figuras más prominentes en el campo de la tecnología de reactores— me doy cuenta de que la actual preponderancia de reactores de agua a presión surge no de ninguna característica superior del agua, sino de la decisión [...] de propulsar el *Nautilus* [...] con una versión presurizada del reactor construido en Oak Ridge para hacer pruebas sobre diferentes materiales. Una vez el agua a presión tomó esta ventaja inicial, otras posibilidades fueron descartadas ya que ponerlas a prueba era demasiado caro». Nos encontramos aquí con el eterno problema de las condiciones iniciales y de las vías que en sus innovadores movimientos de apertura también —dramática paradoja— cierra.

En el reactor del *Nautilus*, del que, de hecho, surgió la energía nuclear comercial, lo que se ha denominado «seguridad intrínseca» o superconfinamiento (diseñar mecanismos que hagan que el reactor no pueda llegar a estar fuera de control) no era muy importante; al fin y al cabo se trataba de un barco de guerra, en donde convivir con el riesgo es una realidad asumida. Este menosprecio —relativo, por supuesto— en lo referente a introducir medidas que asegurasen una seguridad completa del reactor también afectó inicialmente a la tecnología civil de reactores. Es cierto que se alzaron algunas voces en defensa de medidas que favoreciesen una seguridad absoluta. Edward Teller (1908-2003), el mismo que defendía a ultranza la necesidad de fabricar la «superbomba», la todopoderosa bomba

(de fusión) de hidrógeno, advocó desde el principio por que se colocasen los reactores bajo tierra, y Sam Untermyer diseñó un reactor de agua en ebullición intrínsecamente seguro. Pero estas ideas no fueron tomadas en serio. Nadie sabía, por ejemplo, si los reactores de agua ligera ordinaria podrían alguna vez producir potencia que fuese competitiva con la obtenida a partir de combustibles fósiles. Tampoco se tomó en serio la cuestión de la eliminación de los desechos. «No podíamos —añade Weinberg, en una tan sincera como, sin duda, dolorosa declaración— imaginar que el público se vería afectado por una radiación-fobia [...] Y como los desechos, una vez solidificados, no podían imponer una carga radiactiva ni siquiera del orden de la natural, nos cogió de sorpresa la violencia de la reacción pública».

Es curiosa esta sorpresa. Probablemente no era sino una consecuencia del optimismo desbordante que surgió en torno al mundo de la ciencia y la tecnología nucleares. La energía nuclear —se pensaba— haría posible el advenimiento de un mundo auténticamente feliz, energéticamente hablando, por supuesto.

Ahora bien, cuando se observa con más detenimiento aquella época, se encuentra que el entusiasmo no alcanzaba a todos por igual. El mayor nivel de intensidad se localizaba entre los políticos. La energía nuclear era, evidentemente, un instrumento militar incomparable, pero también podía convertirse en una eficaz arma propagandística, como demuestra el caso del programa «Átomos para la Paz».

Los ejemplos de las esperanzas que se depositaron en la energía nuclear son innumerables. En 1954, Lewis Strauss (1896-1974), un financiero convertido en director de la exclusiva y por entonces todopoderosa Comisión de Energía Atómica norteamericana, dibujaba un horizonte, que a lo más tardaría unos quince años, en el que «no será excesivo esperar que nuestros hijos disfruten en sus casas de energía eléctrica demasiado barata como para ser medida en el contador; en el que sabrán de hambres regionales endémicas en el mundo únicamente a través de [los libros] de historia; en el que viajarán sin esfuerzo por los mares o bajo ellos y por el aire con un mínimo de peligros y a grandes velocidades; y en el que gozarán de una expectativa de vida mucho más larga que nosotros». Y todo esto llegaría gracias a la energía nuclear. ¡Qué ilusos eran!

Para hacer posible que este futuro feliz llegase a ser realidad, era necesario, por supuesto, su concreción industrial. Para favorecer este paso, el Congreso norteamericano aprobó una ley en 1957. Un aspecto interesante de esta ley es que minimizaba las responsabilidades en caso de posibles accidentes. Existían precedentes: los autores del Acta para la Energía Atómica de 1954, que habían copiado gran parte de su texto del Acta de Comunicaciones Federales de 1934, únicamente habían incluido vagas especificaciones acerca de requisitos de seguridad. Imperdonable desliz, fruto sin duda del optimismo y de la ansiedad, ya que no es lo mismo, lo sabemos muy bien —y ellos lo deberían haber sabido también—, una comunicación telefónica o telegráfica, o una emisora de radio que una central nuclear.

Pero ni siquiera teniendo en cuenta que inicialmente los requisitos de seguridad no fueron demasiado exigentes, las empresas se animaron a introducirse en este nuevo universo comercial. Serían General Electric y Westinghouse las que, en fecha tan, en principio, tardía como 1963, se lanzaron con entusiasmo —un entusiasmo que impulsaba la competencia entre ellas, tanto o más que sensatas evaluaciones tecnológicas y económicas— a la tarea de construir centrales nucleares. Aquel año, General Electric firmó un contrato, a precio fijo, con Jersey Central Power and Light para suministrarle una planta de 515 megawatios. Sería la primera de las doce centrales nucleares que General Electric y

Westinghouse venderían en los tres años siguientes y por las que en conjunto perderían unos mil millones de dólares. Éste es uno de los grandes problemas de las centrales nucleares: no son rentables si se hacen bien las cuentas, y el público ha tenido que pagar mucho por ello.

No es necesario, sin embargo, profundizar en esta dirección. Simplemente indicar algunos puntos de especial importancia.

Los problemas de la industria nuclear civil estadounidense se debieron a un conglomerado de razones, entre las que figuran graves errores en la estimación del aumento de la demanda de energía eléctrica (el embargo de petróleo de 1973 tuvo como una de sus consecuencias la de, al subir los precios, reducir el consumo); un absolutamente exagerado optimismo sobre la naturaleza de las dificultades tecnológicas a encontrar, o el ya mencionado cambio en la sensibilidad medioambiental social.

Hay que tener en cuenta, además, que la industria de las centrales nucleares constituye un ámbito que se ajusta con dificultad a las estructuras imperantes en nuestras sociedades, en las décadas de los años sesenta o setenta, al igual que en el momento presente. Si se desea alcanzar no sólo la mayor seguridad posible, sino también minimizar el riesgo de los residuos radiactivos, se necesita más tiempo, y por consiguiente muchos más recursos económicos (inversiones de capital) que los que están al alcance del mundo de la empresa privada. Éstas, por razones obvias, han elegido fundamentalmente caminos ya desbrozados en parte. Esa, podríamos decir, «acumulación primitiva de capital tecnológico» no es, como no lo es ninguna acumulación primitiva, inocua.

Es oportuno, no obstante, recordar en este punto que existen tipos de reactores nucleares que reducen sustancialmente el problema de los residuos radiactivos y que ofrecen, al mismo tiempo, un futuro más dilatado en lo que al combustible se refiere. Se trata de los denominados «reproductores» (*breeders*), cuyo concepto, no es ocioso ofrecer este dato, se remonta a comienzos de la década de los cincuenta.

En un reproductor, el combustible fisionable, U-233 o plutonio-239, se quema en el núcleo del reactor. Este núcleo está rodeado de torio-232 o U-238 no fisionables y muy abundantes en la naturaleza, que cuando capturan neutrones que se escapan del núcleo se transforman en U-233 o plutonio-239, con lo que comienza de nuevo el ciclo. En un reproductor se podría, en principio, llegar a utilizar el uranio y torio de las rocas graníticas. En este sentido, tal vez sería una fuente inagotable de energía, al igual que el deuterio del mar lo podría acaso ser para reacciones term nucleares controladas (la fusión nuclear).

La idea de los reproductores fue apreciada inicialmente, cuando se estimaba que las reservas mundiales de uranio eran de unos pocos miles de toneladas (un reactor nuclear de gran tamaño requiere durante toda su vida una carga de alrededor de cuatro mil toneladas de uranio). Pero cuando se fueron conociendo más yacimientos de uranio, la viabilidad de los reproductores se planteó en términos económicos. Todo depende de cuánto estemos dispuestos a pagar por un kilogramo de uranio (es una cuestión de extracción y purificación). Si estamos dispuestos a pagar cien dólares, entonces las reservas mundiales se estiman en veinte millones de toneladas. Si se pretende pagar quinientos dólares, entonces la reserva pasa a ser astronómica. Teniendo en cuenta lo que costaría desarrollar la tecnología de los reproductores (en éstos el precio estimado de un kilo de uranio es de trescientos dólares), existe suficiente uranio para utilizar en reactores no reproductores que queman U-235. Las previsiones pueden, no obstante, cambiar rápidamente ya que tanto Francia como Japón han puesto en marcha programas activos para desarrollar reactores reproductores eficaces y seguros.

Los reactores reproductores constituyen un ejemplo de las posibilidades todavía sin desarrollar completamente en el horizonte de la energía nuclear procedente de la fisión. Pero, como es bien sabido, no es única, ni siquiera principalmente en el dominio de la tecnología donde se hallan las dificultades que encuentra esta fuente energética. La ya aludida oposición popular, que, como es natural y obligado, ha encontrado manifestación en las políticas gubernamentales de la mayoría de las naciones desarrolladas, figura prominente entre los problemas que halla el desarrollo e implementación de esta energía.

Los motivos de esta oposición son variados. El problema de los residuos radiactivos es, sin duda, el principal. Emplear uranio como combustible de reactores utilizándolo una sola vez, como se hace en una buena parte de la industria nuclear, es no sólo extremadamente ineficaz, sino muy peligroso también. Ya indiqué que sólo alrededor del tres por ciento del U-235 se quema en semejante régimen, y el plutonio generado por el U-238 —la parte más abundante del combustible— forma parte del desecho (si es que no se dirige a la fabricación de bombas). Cientos de toneladas de elementos de combustibles «gastados» yacen en los lugares donde se almacenan los productos de estos reactores comerciales. Una posibilidad es que se los reprocese, salvando una buena parte de esos combustibles, con lo que, finalmente, se reduciría de manera radical el volumen de material que se necesitaría enterrar como desecho. Pero el reprocesado tiene mala fama, y pocos países poseen plantas para llevar a cabo este proceso (Francia reprocesa sus desechos, al igual que los de Japón, Alemania, Suiza, Bélgica y Holanda; en Estados Unidos, sin embargo, la última planta construida a tal efecto cerró sus puertas hace veinte años). Y esta escasez de plantas empeora la situación, toda vez que hay que recurrir a transportes a otros países, lo que implica riesgos obvios.

Los defensores del reprocesado argumentan que de esta forma el residuo de productos radiactivos que se obtiene disfruta de una vida media mucho menor (alrededor de seiscientos años) que las del plutonio y uranio sin procesar, cuya vida media alcanza las decenas de miles, si no millones de años, lo que implica, al estar fuera de toda escala de experiencia humana, que la solución practicada de enterrarlos es poco aceptable. Pero aun así, es obligado reconocer que seiscientos años tampoco son poca cosa, y es que para manejar propiamente la energía nuclear se necesita de las instituciones sociales una vigilancia y una longevidad a las que no estamos acostumbrados. Simplemente, no hemos desarrollado instituciones de tales características. La escala temporal de los desechos nucleares no parece corresponder a la de las instituciones humanas.

La situación puede, no obstante, cambiar para la energía nuclear, que suministra en la actualidad alrededor del seis por ciento de la energía primaria mundial (en Japón cerca del treinta por ciento). En 1989, ante una audiencia de 1500 estudiantes del Instituto de Tecnología de Virginia, Paul Ehrlich, uno de los más firmes y constantes enemigos de la energía nuclear durante las últimas décadas, anunció que, en vista del efecto invernadero, estaba dispuesto a apoyar la energía nuclear si ésta se basaba en nuevas tecnologías intrínsecamente seguras. A veces la fe es producto de la necesidad.

Con los datos y argumentos precedentes, no he pretendido hacer ni una crítica, ni una apología de la energía nuclear aplicada a fines industriales. Me inclino a suponer que, en conjunto, ha experimentado un desarrollo incontrolado y, a pesar de lo que pueda parecer, excesivamente rápido. Pero entiendo con claridad que constituye *una* de las esperanzas energéticas para el futuro. Próximo o lejano, eso no lo sé. El que no estemos acostumbrados a pensar en términos de semejante lejanía temporal, no es óbice para suponer que ese futuro no existirá; ni para hacer dejadez de responsabilidad hacia nuestros

descendientes. Y no olvidemos que la energía nuclear no produce el tan temido dióxido de carbono del efecto invernadero.

Existe mucho de bueno en la oposición popular que surgió —y que se mantiene— ante la energía nuclear. Algunos datos mencionados favorecen la idea de que, sin tal oposición, habrían sido múltiples los desmanes cometidos (el que el desastre más grave en una central nuclear —Chernobil— se produjese en una nación, la Unión Soviética, en la que las libertades políticas y los controles democráticos dejaban demasiado que desear, apunta en esta misma dirección). Pero, si somos sinceros, no deberíamos limitarnos a cuestionar únicamente lo nuclear. ¿Por qué no hemos seleccionado también —o con parecida intensidad— como objeto de nuestras críticas y luchas la industria química, con su vasta producción de desechos tóxicos?, ¿o la industria del automóvil, que con los nocivos gases que desprende produce una cantidad enorme de muertes cada año?, ¿o la utilización del carbón como fuente de producción de energía, que ocasiona daños evidentes con la lluvia ácida que mata a miles de personas todos los años al contaminar el aire que respiramos? Ya sé que existen bastantes respuestas posibles a estas preguntas, muchas —es importante reconocerlo— entroncadas con la utilización con fines militares de la energía nuclear, pero, de nuevo, ¿son tales respuestas completamente razonables? Si se trata de riesgos, es apropiado mencionar algunos datos calculados no hace mucho. En Estados Unidos, la expectativa de días de vida perdidos se cifran en 3500 debido a la pobreza, 2300 al tabaco, 2000 por ser de color (¡o por no estar casado!), 1100 si se es minero, 230 por consumo de alcohol, 80 por accidentes de coche, y lo mismo por la contaminación, 35 por el radón existente en las casas. Por vivir cerca de una central nuclear, la pérdida es de 0,4 días.

Toda cifra es, por supuesto, relativa (sin duda que cerca de Chernobil las estadísticas son otras), y yo no cito estas para reclamar, basándome en ellas, la utilización de la energía nuclear. Tampoco le estoy recomendando, querido lector, que se mantenga libre de críticas a esta controvertida fuente energética. Lo que estoy pidiendo es que si insistimos en continuar derrochando energía, tomemos la mínima precaución de conocer los auténticos límites de la energía nuclear aplicada a usos pacíficos, algo que requiere de programas de investigación y desarrollo apropiados. Que distingamos, en definitiva, la herencia de la historia, de las posibilidades que acaso puede ofrecer la naturaleza.

ENVEJECIMIENTO. Véase MUERTE; también NEURONA.

ESPECIE. Conjunto de individuos capaces de dar origen a hijos que puedan tener descendencia fértil. Definiciones algo más concretas, hablan de «especie evolutiva», entendida como —siguiendo la definición del naturalista George G. Simpson (1902-1984)— una stirpe (o secuencia de poblaciones de ancestros-descendientes) que evoluciona separadamente de otras y que tiene un papel y unas tendencias de evolución propias y de carácter unitario.

En realidad, el concepto de especie tiene mucho de ambiguo. Generalmente, las poblaciones vecinas de un determinado animal pueden cruzarse, pero entre poblaciones de áreas geográficas más alejadas puede producirse una disminución de la fertilidad si intentan el cruzamiento, hasta llegar a la imposibilidad entre poblaciones muy distantes. Se puede entender esta reducción progresiva de la fertilidad como debida a la posesión de dotaciones cromosómicas que se van diversificando a medida que aumenta la distancia. Ahora bien, los miembros de esas poblaciones distantes e infértiles por cruzamiento, ¿pertenecen a la misma especie o a especies diferentes? Como no pueden cruzarse, habría que asignarlos a especies diferentes. Pero como están conectados por una serie continua de poblaciones

cruzables, se podría considerar que, a fin de cuentas, pertenecen a la misma especie. Desde este punto de vista, el concepto de especie tiene algo de relativo, aunque, por otra parte, no deja de ser consecuente con el gradualismo histórico darwiniano.

Además, el concepto moderno de especie, basado en el aislamiento reproductivo, no es fácil de aplicar a aquellos organismos eucariotas (dotados, recuerden, de núcleos) que se reproducen sin apareamiento, de modo que cada miembro de la especie está aislado reproductivamente. Problemas parecidos los plantean aquellas especies que se reproducen de forma vegetativa (por fisión del progenitor), por partenogénesis (desarrollo a partir de óvulos no fertilizados) o por autofertilización de un hermafrodita. En esos casos hay que recurrir a otros criterios de clasificación.

A mí esta indeterminación lógico-científica me satisface. La verdad, no encuentro ningún placer en estos tipos de diferenciación que con más frecuencia de la deseada han conducido —aunque sea indirectamente— a la discriminación, a contemplar a «los otros» como enemigos, o como esclavos (esto es patente con los «otros animales», los no humanos, que nuestra especie maltrata a menudo innecesariamente). Encuentro un mayor consuelo en los análisis de parentesco —de los que hablo en otra entrada [véase PROTEÍNA]— entre especies diferentes que se realizan analizando las cadenas de aminoácidos de algunas de sus proteínas, y que nos hablan de la cercanía que nos une a, por ejemplo, los caballos. Me doy cuenta de que estos argumentos míos son, en este punto, poco científicos, pero, lo repito una vez más: no doy la espalda a encontrar en los resultados de la investigación científica algún que otro apoyo para causas morales.

EUGENESIA. Movimiento iniciado en las últimas décadas del siglo XIX, que sostenía que la mayoría de las características humanas eran estrictamente hereditarias y que había que mejorar la especie humana, favoreciendo la reproducción de los mejores especímenes y dificultando la de aquellos con deficiencias.

Los eugenistas mantenían que no sólo los rasgos físicos, como el color de los ojos y la altura, sino también los atributos de la personalidad estaban determinados genéticamente (en un sentido mendeliano) y que para elevar el nivel de la población había que proceder poco más o menos como los ganaderos: favorecer la reproducción de los «buenos» sujetos y aminorar, o incluso detener, la reproducción de los «malos». A finales del siglo XIX y comienzos del XX, ayudado por la credibilidad que le otorgaba una presunta base científica, el programa eugenésico se extendió ampliamente, en especial en Estados Unidos y en algunos países de Europa. Fue en Estados Unidos donde la fe en la genética mendeliana aplicada a los seres humanos se llevó a la práctica por vez primera: en 1907 el estado de Indiana aprobó las primeras leyes que permitían la esterilización de los enfermos mentales y criminales patológicos; a finales de la década de 1920 veintiocho estados y una provincia canadiense habían introducido legislaciones parecidas.

Detrás de las ideas eugenésicas, se encuentra la convicción de que la vida humana puede reducirse a la biología y que las instituciones humanas se conducirán mejor teniendo en cuenta las «realidades» del determinismo biológico. Ahora bien, semejante idea es cuestionable, y ello independientemente de que el punto de partida científico sea correcto o no (ya señalaba esto a propósito del determinismo biológico), de que, por ejemplo, las ideas eugenésicas hubieran resultado ser correctas desde el punto de vista científico. El problema es que el universo en el que se mueven los seres humanos no coincide exacta, ni siquiera necesariamente, con el universo del conocimiento científico. Aldous Huxley (1894-1963) expresó de manera magnífica tal diferencia cuando escribió:

El mundo al que se refiere la literatura es el mundo en el que los hombres son

engendrados, en el que viven y en el que, al fin, mueren. El mundo en el que aman y odian, en el que triunfan o se los humilla, en el que se desesperan o dan vuelos a sus esperanzas. El mundo de las penas y las alegrías, de la locura y del sentido común, de la estupidez, la hipocresía y la sabiduría. El mundo de toda suerte de presión social y de pulsión individual, de la discordia entre la pasión y la razón, del instinto y de las convenciones, del lenguaje común y de los sentimientos y sensaciones para los que no tenemos palabras... [Por el contrario], el químico, el físico, el fisiólogo son habitantes de un mundo radicalmente diverso —no del mundo de los fenómenos dados, sino de un mundo de estructuras averiguadas y extremadamente sutiles; no del mundo experiencial y de los fenómenos únicos y de las propiedades múltiples, sino del mundo de las regularidades cuantificadas.

EVOLUCIONISMO. Véase DARWIN.

EXTINCCIONES. Véase DINOSAURIOS.

F

FERMAT. (Pierre de). 1601-1665. Fermat fue un matemático y jurista francés que ha pasado a la historia por sus contribuciones a la matemática, y sobre todo por una, el denominado «Último teorema de Fermat». En realidad, más que un teorema, esto es, una demostración acabada, inapelable, se trata de una conjetura, que Fermat propuso en 1637, en el margen de su ejemplar del Libro II de la *Aritmética* escrita hacia el año 250 por Diofante de Alejandría (c. 250 a. C.). Lo que afirma esta conjetura es que si n es un entero mayor que 2, la ecuación $x^n + y^n = z^n$ no tiene solución si x, y, z son enteros positivos. Fermat sostenía que sabía demostrarlo, y escribió en su anotación que: «el margen [del libro] es demasiado pequeño para contenerla».

Muchos matemáticos, legiones de ellos, han intentado a lo largo de los años demostrar esta conjetura, pero sin éxito. En 1780, por ejemplo, uno de los grandes de la matemática, de los verdaderamente grandes, Leonhard Euler (1707-1783), demostró el teorema para $n = 3$; más tarde otros demostraron lo propio para $n = 5, 7$ y 13 , y con la introducción de los computadores se probó con exponentes hasta 4 000 000 sin encontrar ninguna violación en el supuesto teorema. Pero la demostración rigurosa, universal, teórica, absolutamente fiable, a la manera que distingue a los resultados matemáticos de los de cualquier otra disciplina científica, de cualquier, de hecho, disciplina humana, eso era algo que nadie conseguía obtener. Y sin esa demostración, no vale para mucho que se demuestre que el resultado es cierto en cualquier número de casos concretos, aunque ese número sea inimaginablemente grande: siempre existirá la posibilidad de que no se cumpla en el caso siguiente.

En septiembre de 1994, sin embargo, un matemático, afincado en Princeton (Estados Unidos), Andrew Wiles (1953), lograba demostrar el teorema. Y el que lo lograra posee, al menos para mí, un significado especial. No sólo demuestra el poder de la mente humana, sino, asimismo, la constancia de ésta, entendida como mente «de la colectividad», histórica. La demostración de Wiles es un gran logro matemático, sin duda, pero también un momento histórico especial. Es el triunfo de la voluntad de los humanos, y de su voluntad aplicada a la investigación científica más pura, aquella que trata con ideas, conceptos y resultados matemáticos, que tal vez no tienen ningún correlato «real» en la naturaleza.

En cuanto a su protagonista principal, Wiles, diré que hay personas que parecen destinadas a conseguir un fin determinado desde pequeños. «Parecen», digo, porque semejantes juicios siempre se hacen *a posteriori* y llevan asociado un claro elemento subjetivo. En cualquier caso, la expresión «destinado» no es demasiado inapropiada para Wiles, al menos si nos atenemos a lo que él mismo ha recordado: «Tenía diez años y un día estaba en la biblioteca local y encontré un libro de matemáticas que contaba algo de la historia de este problema. Y yo, con diez años, podía entenderlo. Desde aquel momento intenté resolverlo por mí mismo. Era tamaño desafío, un problema tan bello. Se trataba del Último Teorema de Fermat».

Hermosos deseos, pero ¡cuántos jóvenes no se habrán propuesto lo mismo a lo largo de los siglos! Para intentarlo con las imprescindibles, mínimas, garantías es preciso en primer lugar formarse como matemático. Esto es lo que hizo Andrew Wiles, primero en Oxford (en el Merton College), donde entró en 1971. Una vez obtenida su licenciatura, en 1974, pasó a Cambridge, doctorándose allí en 1980, el mismo año que se trasladó a Bonn,

para al final del año siguiente pasar a Estados Unidos, al Instituto de Estudio Avanzado de Princeton. Un año después era nombrado profesor de la Universidad de Princeton.

Un momento trascendental en su carrera tuvo lugar durante el curso 1985-1986, que pasó en París, en el Instituto de Altos Estudios Científicos y en la Escuela Normal Superior. Fue entonces cuando supo que Ken Ribet había demostrado, inspirado en una idea de otro matemático, Gerhard Frey, que el Último Teorema de Fermat se deducía de una conjetura (de nuevo algo propuesto, pero no demostrado) de Shimura y Taniyama, que tenía que ver con curvas elípticas, uno de los temas que Wiles había estudiado antes.

A partir de entonces Wiles decidió abandonar todos sus trabajos e intentar demostrar la conjetura de Shimura-Taniyama. Prácticamente desapareció de la vida profesional, excepto para dar sus clases en Princeton, o para cumplir con las mínimas obligaciones que tuvo que aceptar durante los dos años que pasó en Oxford (1988-1990) como *Royal Society Research Professor*, esto es, catedrático de investigación (sin, por tanto, obligaciones docentes) financiado por la Royal Society, institución que le acogió en sus selectas filas (como *fellow*) por entonces, en 1989. Fueron siete años de reclusión en el ático de su casa de New Jersey o en los lugares que ocupó en Oxford, sin que nadie —salvo un colega de Princeton, Nicholas Katz— supiese a que se estaba dedicando. «Me di cuenta», explicaría más tarde, «de que era imposible hablar de manera informal con la gente sobre Fermat, porque generaba demasiado interés y uno no podía centrarse durante años a menos de que tuviera esta clase de concentración total que demasiados espectadores destruirían». Hasta su vida familiar se vio afectada: «Mi esposa sólo me ha conocido mientras he estado trabajando en Fermat. La informé unos pocos días después de que nos casásemos. Decidí que realmente solamente tenía tiempo para mi problema y mi familia, y encontré que mientras estaba concentrado muy duramente lo mejor para relajarme eran los niños pequeños. Cuando uno está hablando con niños pequeños no está interesado en Fermat».

Pero disfrutó en aquella situación: «Amé todos los minutos de los primeros siete años que trabajé en este problema, a pesar de lo duro que fue. Hubo retrocesos, cosas que parecían insuperables, pero se trataba de una especie de batalla privada y muy personal en la que yo estaba involucrado». Precisamente por esa capacidad de, y disposición a, aislarse del mundo en una empresa gigantesca, arriesgada en grado sumo, he incluido a Wiles aquí. Representa una *rara avis* en el mundo de los investigadores; un mundo que busca publicar, resolver problemas cuanto más interesantes y difíciles mejor, sí, pero no a costa de aislarse del mundo, no refugiándose en un solitario ático. Si hay algo que merezca la pena llamar «pureza científica», el solitario esfuerzo de Wiles durante siete años pertenece a esa clase.

Desgraciadamente, no siempre la pureza es recompensada, pero en este caso sí lo fue. El 23 de junio de 1993, al final de la última de una serie de tres conferencias que pronunció en el Isaac Newton Institute de Cambridge, Wiles anunciaba a sus colegas que había completado la prueba de la conjetura de Shimura-Taniyama, esto es, que había logrado demostrar el Último Teorema de Fermat. Huidizo hasta el extremo, no había anunciado el tema del que se iba a ocupar en las conferencias. Sin embargo, una vez iniciadas estas, se fue propagando el rumor de que hablaría también de la conjetura de Fermat, y así en la última de sus conferencias la sala estaba abarrotada. Era, o podría ser, una ocasión histórica, y la gente así lo entendió.

Pero la felicidad no fue completa: un manuscrito de su demostración circuló entre algunos colegas seleccionados, y pronto se descubrió un sutil error en la prueba. No obstante, Wiles no cejó: no había llegado hasta aquel punto, empleando siete años de su

vida, para detenerse allí, para simplemente rozar la gloria inmortal. Trabajó duramente durante el siguiente año, con la ayuda ahora de Richard Taylor. El 19 de septiembre de 1994 estaba a punto de abandonar cuando, utilizando sus propias palabras, «de repente, de forma totalmente inesperada, tuve esta increíble manifestación. Fue el momento más importante de mi vida laboral. Nada de lo que haga jamás [será parecido], fue tan indescriptiblemente bello, tan simple y elegante. Primero, durante veinte minutos no lo creí, después durante el resto del día fui de un lado a otro por el departamento. Volvía a la mesa de mi despacho para ver si todavía seguía allí. Y aún estaba».

El resultado apareció finalmente publicado en dos artículos en 1995 (el segundo en colaboración con Richard Taylor). Aquellos que creen que los resultados matemáticos fundamentales que se pueden enunciar de forma sencilla, como ciertamente ocurre con el Último Teorema de Fermat, también se demuestran de igual manera, con simplicidad, se desengañarán sin más que estudiar la demostración de Wiles. Su artículo básico ocupa casi ciento veinte páginas de *Annals of Mathematics*. Ciento veinte páginas cuya comprensión no está al alcance de cualquiera, ni siquiera de cualquier matemático. Nada parecido a esas demostraciones, sencillas, simples y hermosas, que han servido durante siglos para iluminar a millones de espíritus. Demostraciones como las del teorema de Pitágoras (el teorema de Fermat para $n = 2$) o la de la existencia de números irracionales, como la raíz cuadrada de 2. Existe, parece, algo así como una esquizofrenia en el universo matemático (y acaso también en el de la física): por un lado proposiciones que percibimos y entendemos nítidamente, como la luz que rompe la oscuridad, y por otro lado, la constatación de que la demostración de, al menos algunas de esas verdades transparentes no son, en modo alguno, o no parecen ser, ni sencillas ni simples. En este sentido, no podemos decir que el universo de la matemática, de las verdades matemáticas, sea sencillo o simple. En cierta ocasión, Albert Einstein pronunció una frase que se haría famosa: «*Raffiniert ist der Herrgott aber boshaft ist er nicht*», que se puede traducir como «El Señor es sutil, pero malicioso ciertamente Él no es». No estoy seguro que Wiles, o todos aquellos que han siquiera intentado comprender su demostración del ahora ya sí Teorema y no Conjetura de Fermat, piensen lo mismo. Que no piensen, en términos metafóricos, por supuesto, que el Señor también es malicioso. De hecho, parece que el propio Einstein cambió de opinión posteriormente, y que dijo a uno de sus colaboradores en Princeton: «He tenido segundos pensamientos. Tal vez Dios es malicioso».

FÍSICA versus MATEMÁTICA. Véase DIRAC.

FISIÓN NUCLEAR. Escisión de un núcleo pesado que da lugar a dos núcleos de tamaño medio, liberando al mismo tiempo una gran cantidad de energía, mucho mayor que la que procede de reacciones químicas (esto se debe a que la interacción que une los elementos nucleares es mucho más intensa que la fuerza electromagnética que rige la formación de enlaces químicos).

La primera fisión nuclear fue detectada en diciembre de 1938, por Otto Hahn (1879-1968) y Fritz Strassmann (1902-1980), en el laboratorio de Química de la Asociación Kaiser Guillermo que dirigía el primero en Dahlem, cerca de Berlín, mientras exploraban ideas introducidas no hacía mucho por Enrico Fermi (1901-1954) en Roma (éste había bombardeado algunos elementos pesados con neutrones que habían pasado a través de una capa de parafina —esto es, neutrones lentos—, encontrando que se creaban elementos situados más allá del uranio —transuránicos— en la tabla periódica). Hahn y Strassmann lanzaron neutrones lentos sobre uranio, un elemento utilizado con frecuencia en las primeras investigaciones en el campo de la radiactividad. Y lo que observaron fue que

obtenían bario, un elemento mucho más ligero —casi la mitad— que el uranio (éste tiene número atómico 92 y el bario, 56). Parecía que el núcleo de uranio se había partido en dos, que se había *fisionado*. Pero jamás se había observado algo parecido; las transmutaciones atómicas descubiertas hasta entonces involucraban transformaciones de un elemento a otro cercano a él en la tabla periódica. El 6 de enero de 1939 publicaban el correspondiente artículo en el que manifestaban sus dudas ante sus «peculiares resultados [...] Como químicos debemos afirmar que el nuevo producto es bario [...] Sin embargo, como “químicos nucleares”, que trabajan muy próximos al campo de la física, no podemos decidirnos a dar un paso tan drástico que va en contra de todos los experimentos realizados anteriormente en física nuclear. Acaso se hayan dado una serie de coincidencias poco habituales que nos han proporcionado indicaciones falsas».

No era éste el caso, como explicaron, desde Estocolmo, Lise Meitner (1878-1968), colega durante treinta años de Hahn, pero que debido a su origen judío había tenido que abandonar Alemania, y el sobrino de ésta, Otto Frisch (1904-1979), otro exiliado, que trabajaba en Copenhague. De todas maneras la explicación más completa de la fisión llegaría un poco más tarde, en un trabajo de Niels Bohr y John Wheeler (1911), quienes también señalaron que además del uranio (estrictamente el isótopo U-235, el menos abundante en la naturaleza) también podía fisiónar un isótopo del plutonio (el plutonio-239). Comenzaba de esta manera la historia de la energía nuclear, que habría de marcar la historia de una parte importante del siglo XX.

La clave para que la fisión del uranio terminase alcanzando semejante protagonismo se encuentra en un pequeño detalle de la reacción: pronto se hizo patente que si en la fisión se producía más de un neutrón, entonces era imaginable pensar que se podía desencadenar una reacción en cadena (los neutrones liberados podían colisionar con otros núcleos de uranio, liberando en cada caso energía y neutrones, y así sucesivamente). Igualmente, era posible pensar que se podría producir en fracción de segundos una gran cantidad de energía, que permitiese, en el caso de una reacción en cadena más o menos incontrolada, fabricar un arma tremendamente poderosa, o, si se pudiese controlar y liberar poco a poco, una fuente energética, un reactor nuclear, utilizable con fines pacíficos.

La historia peculiar de aquellos años, los años en los que tuvo lugar la segunda guerra mundial, explica el que aquella idea, que la mayoría de los físicos veía lejana y no demasiado segura, terminase centrando los esfuerzos de un proyecto, el Manhattan, del que me ocupo en otro lugar de este diccionario, y del que surgió un arma de potencia descomunal: la bomba atómica. [Véase ENERGÍA NUCLEAR y MANHATTAN, PROYECTO].

FRACTAL. El siglo XIX nos enseñó que la geometría matemática podía ser bastante diferente de la que había desarrollado, en acabada forma, Euclides. Los trabajos de Karl Friedrich Gauss (1777-1855), Nikolai Lobachevski (1793-1856), János Bolyai (1802-1850) y Bernhard Riemann (1826-1866) mostraron que la geometría euclidiana, en la que se cumplen las relaciones métricas y trigonométricas con las que nos hemos familiarizado desde niños (el teorema de Pitágoras, por ejemplo), no es la única posible, desde el punto de vista de la lógica matemática, existiendo otras «curvadas». Y también nos revelaron que es posible pensar, sin ninguna dificultad, en espacios matemático-geométricos de dimensiones superiores a las familiares (1 para una línea, 2 para un plano y 3 para el «espacio»). A comienzos del siglo XX, Minkowski y Einstein completaron el nuevo cuadro, dando sustancia física a semejantes posibilidades con el espacio-tiempo relativista no euclidiano de cuatro dimensiones.

Ahora bien, todavía había algo que permanecía detrás de aquellos cambios: el carácter entero de las dimensiones. Podíamos hablar de espacios de 4, 5, 10 o 22 dimensiones, o, en general, n , pero n tenía que ser entero, no fraccionario, o irracional.

Sin embargo, y al igual que tantos otros puntos de apoyo que fueron desvaneciéndose según ha ido progresando la ciencia, el carácter entero de la dimensionalidad no ha resultado ser obligado. Existen, en efecto, entes geométricos que pueden tener, además de dimensiones enteras, otras fraccionarias (como $1/2$ o $7/9$), o irracionales (π o $\log 4/\log 3$). El matemático francés, de origen polaco, Benoît Mandelbrot (1924), el gran experto mundial en este tipo de objetos, introdujo —en 1975— para ellos el afortunado nombre de «fractales» (del latín, *fractus*, interrumpido, irregular).

En realidad, ya durante el siglo XIX y comienzos del XX algunos matemáticos (Cantor, Peano, von Koch, Sierpinsky, Richardson) estudiaron curvas con propiedades fractales, pero no ha sido hasta las últimas décadas que ha surgido una teoría para los objetos fractales, entes que tienen otras propiedades singulares que, en principio, no se refieren a la dimensionalidad. Como la «autosimilitud». De hecho, una definición intuitiva de fractal es aquel objeto que tiene una forma, bien sea sumamente irregular, bien sumamente interrumpida o fragmentada, y sigue siendo así a cualquier escala que se examine. «Entre el dominio del caos incontrolado —ha escrito Mandelbrot— y el orden excesivo de Euclides, hay a partir de ahora una nueva zona de orden fractal».

Al igual que otros constructos matemáticos, los fractales también pueden cobrar vida en algunas áreas de la naturaleza: en la geometría de las costas, en el movimiento browniano o en la turbulencia.

FREUD (Sigmund). 1856-1939. En la historia del pensamiento no es demasiado frecuente encontrarse con personas que hayan construido prácticamente desde sus cimientos, grandes e innovadores esquemas conceptuales. Individuos a los que podemos hacer responsables, con nitidez, sin apenas ambigüedades, de descubrir nuevos ámbitos y formas de entender la realidad. Sigmund Freud fue, sin duda, uno de esos pocos.

La línea de demarcación que va del *antes* al *después* de Freud, es la misma que separa dos maneras radicalmente diferentes de comprendernos a nosotros mismos. Es difícil que volvamos alguna vez a contemplar, después de Freud, nuestras pasiones, fobias, filias o, simplemente, inclinaciones, como producto del momento, de la circunstancia imprevisible, como resultado de situaciones o historias perfectamente comprensibles o, por el contrario, desesperanzadoramente inexplicables. Freud cambió todo esto. Abrió un nuevo mundo, centrado en nosotros mismos, en nuestra hasta entonces insondable naturaleza. Introdujo innovaciones radicales como el reconocimiento del inconsciente y la influencia que fuerzas psicológicas fuera de nuestro control racional ejercen sobre nuestros comportamientos, deseos, fantasías y motivaciones. Creó conceptos como la «libido» o el «complejo de Edipo». Llamó la atención sobre la importancia de los fenómenos psicológicos, desde los sueños y fantasías hasta los meros deslices lingüísticos, dando un papel primordial a la sexualidad en el desarrollo psicológico de las personas desde la infancia (una de sus primeras aportaciones en este sentido fue su defensa —que lo apartó del neurofisiólogo vienés Joseph Breuer (1842-1925)— de que en todos los neuróticos, ya se tratara de neurosis histéricas o de neurosis orgánicas, como la ansiedad o la neurastenia, la causa de la enfermedad radicaba en dificultades de orden sexual; más tarde llegó a la conclusión de que todas las neurosis se reducen a vivencias sexuales infantiles). Incluso llegó a atreverse con la idea de cultura o con los orígenes de las religiones.

No obstante, con relativa frecuencia se ha negado a Freud la categoría de *científico*,

y a su obra psicoanalítica de *ciencia*. Karl Popper, por ejemplo, seleccionó el psicoanálisis freudiano, junto al marxismo, como uno de los prototipos de teoría no científica, por irrefutable. Se olvidaba, creo yo, el filósofo austriaco que él también escribió: «Lo que realmente hace que la ciencia progrese son las ideas nuevas, incluso las falsas». (En cuanto a Marx, me resisto a ser tan poco generoso con alguien que escribió [*Crítica del programa de Gotha*; 1875] aquellas hermosas —sean científicas o no— palabras: «De cada cual según sus habilidades, a cada cual según sus necesidades»). Ciertamente, existen diferencias notables entre los métodos utilizados en el psicoanálisis y los propios de las ciencias más establecidas, más tradicionales, como la física, la química o la fisiología, pero, en última instancia, ¿qué es la ciencia sino exploración sistemática, haciendo uso de hipótesis —arriesgadas con frecuencia—, de *fuerzas* que, de una u otra manera, nos afectan?

Hay que tener en cuenta, además, que tampoco es el propio psicoanálisis un edificio coherente y único. La correspondencia entre Freud y Carl Jung (1875-1961) muestra —al menos en mi opinión— la diferencia entre las aproximaciones psicoanalíticas de ambos: no es sólo que Freud fuese, claramente, el más inteligente y original, sino que era también más abierto a mirar a la realidad y a sí mismo de manera similar a como lo hace un buen científico de disciplinas consolidadas. Jung estaba construyendo un sistema mitológico, una visión de la realidad y de nuestra relación con ella que le agradaba y halagaba, a él al igual que a todos nosotros. Freud, por el contrario, se esforzaba por no escoger ángulos amables para contemplarnos a nosotros o al mundo en que vivimos.

Es más que probable que el edificio freudiano no se sostenga en un futuro muy próximo, si no actual, o que deba ser revisado drásticamente, eliminando en particular las ligaduras que la fuerte personalidad y el poder creativo e imaginativo de Freud han impuesto a la mayoría de sus seguidores, pero la esencia de su visión, la idea de que existen, de que es necesario describir —y, en ocasiones, actuar sobre ellos— mundos individuales y colectivos inconscientes que afectan profundamente nuestra vida, percepciones y culturas, es algo que difícilmente perderemos. Y yo quiero incluir a Freud en este diccionario como homenaje a su atrevimiento, procedimientos y esfuerzos analíticosintéticos, que ciertamente considero «científicos», aunque no olvido, ay, que como diversos estudios históricos han mostrado, también hizo trampas en ocasiones. Y es que no existen personas perfectas, si acaso ideas perfectas... o casi.

FUSIÓN NUCLEAR. Unión de núcleos ligeros para formar núcleos de tamaño medio, que libera grandes cantidades de energía. Las reacciones de fusión más conocidas —pero no las únicas— son aquellas que se producen entre núcleos de hidrógeno (H) y sus isótopos deuterio (D) y tritio (T) (el núcleo del D tiene un protón y un neutrón; el de T un protón y dos neutrones, mientras que el H ordinario posee un único protón). La reacción de fusión más accesible para ser lograda en un laboratorio es la que se produce entre el D y el T, formando un núcleo de helio más neutrones.

Mediante reacciones de fusión es como las estrellas obtienen la energía que con tanta abundancia emiten. Nuestro Sol, por ejemplo, transforma cada segundo alrededor de 650 millones de toneladas de hidrógeno en helio mediante fusiones nucleares. Precisamente por esta eficacia energética es que uno de los objetivos de la ciencia y tecnología actuales es lograr reacciones de fusión controladas que sirvan para obtener energía. Frente a mecanismos basados en la fisión nuclear, las ventajas de la fusión son notables: los combustibles básicos son abundantes en la naturaleza; las reacciones no producen gases nocivos, como sucede en la combustión de materiales fósiles; los riesgos radiactivos son

mucho menores que en los reactores nucleares de fisión (aunque los materiales de un reactor de fusión se vuelvan radiactivos por el flujo de neutrones y el tritio sea radiactivo, mediante una elección apropiada de materiales y dado que la vida media del tritio es sólo de doce años y medio, no se producirán residuos radiactivos de vida larga); por último, un reactor de fusión es seguro en el sentido de que al detener el suministro de combustible se para instantáneamente la combustión.

Para que se produzca una reacción de fusión, los dos átomos que deben interaccionar han debido desprenderse de sus electrones y sus núcleos aproximarse entre sí hasta distancias extremadamente pequeñas, algo que requiere temperaturas enormes (superiores a los cien millones de grados). El combustible debe estar, por consiguiente, en lo que se denomina un estado de *plasma*. Formar este plasma caliente, y *confinarlo* de alguna manera, constituyen problemas básicos para comenzar siquiera a plantearse el posible aprovechamiento energético de la fusión (mantener un plasma en un contenedor formado por materiales convencionales parece imposible: en caso de que las paredes no se derritiesen instantáneamente, se producirían fusiones locales que deteriorarían las paredes, y además en la interacción entre plasma y pared, aquél se enfriaría). Los métodos de confinamiento en los que más se confía son dos: magnético e inercial. El primero se basa en la utilización de campos magnéticos y el segundo en láseres de potencia o haces de partículas. Particularmente prometedores son los denominados Tokamak (de *Toroidal Kamera Magnetik*; cámara magnética toroidal en ruso). Con uno de ellos investigadores soviéticos consiguieron en 1969 mantener un plasma de cinco millones de grados centígrados durante algunas decenas de milisegundos. Desde entonces se ha avanzado notablemente con Tokamak más desarrollados, habiéndose producido en la década de 1990 cantidades importantes de energía de fusión de forma controlada, aunque todavía durante breves instantes. Si avances como éstos presagian un futuro próximo en el que la energía proceda de reacciones de fusión, es un punto sobre el que existen opiniones muy dispares. No parece, en cualquier caso, imposible que *en algún momento* del futuro —probablemente a medio plazo— dispongamos, industrialmente, de este procedimiento de obtención de energía, con lo cual las perspectivas para nuestra especie mejorarían sin duda.

G

GALILEI (Galileo). 1564-1642. Seguramente muchos de mis lectores se habrían decepcionado si no encontrasen en este diccionario al ilustre pisano, uno de los pocos pensadores conocidos por su nombre y no por su apellido. Sería, efectivamente, injusto olvidarse de él, aunque su recuerdo siempre ha suscitado en mí sentimientos de tristeza. Me lo imagino humillado, admitiendo lo que no pensaba («*Eppur si muove*»: «Y sin embargo se mueve»), dicen que murmuró cuando se vio obligado a declarar que la Tierra no se movía, como pensaban los aristotélicos y ptolemaicos y defendía la Iglesia católica). Ya sé que la historia le terminó dando la razón, haciéndole ganador de una desigual guerra que nunca debió tener lugar. Y también sé que un papa hace poco reconoció formal y pomposamente —¿oportunistamente?— la injusticia de que había sido objeto, pero la historia es el consuelo de los demás, no de los que la hacen, y yo prefiero la vida a la historia.

Como científico, Galileo realizó aportaciones que permitieron ver que el cosmos era muy diferente a la armonía de los cinco elementos (cuatro —aire, fuego, tierra y agua— imperfectos, y uno —el éter, la quintaesencia— perfecto), organizados en dos capas, la del mundo sublunar y la del supralunar, mundano y contingente aquél, inmutable y esféricamente perfecto éste, como lo imaginaban los aristotélico-ptolemaicos. Con un tosco telescopio que él mismo construyó, observó —en noviembre de 1609— la Luna, y en su superficie contempló la misma desigual geografía que existía en la Tierra. Vio manchas, que interpretó, correctamente, como producidas por las sombras de «las crestas de las montañas y los abismos de los valles» (*Sidereus nuncius*, 1610). El mundo supralunar no se distinguía, por tanto, del terrestre, una conclusión esta que sus posteriores observaciones de Júpiter, en enero de 1610, confirmaron: en las proximidades de este planeta detectó cuatro satélites —planetas mediceos, los bautizó, buscando favores de los Medici—, que ofrecían una versión en miniatura del universo copernicano. Los satélites orbitaban en torno a Júpiter, mientras que el sistema aristotélico-ptolemaico sólo admitía revoluciones alrededor de una estática Tierra. Desaparecía de esta manera uno de los obstáculos que se erigían delante de la tesis que Nicolás Copérnico (1473-1543) había defendido en su libro inmortal: *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (1543), en el que situaba al Sol, y no a la Tierra, en el centro del universo.

Aquellas observaciones —y otras, como la detección de manchas solares— dieron a Galileo una extraordinaria notoriedad en el pequeño mundo de los astrónomos y filósofos de la naturaleza de su época, notoriedad que se afianzó cuando publicó en 1632 el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Pero no debemos olvidar que como científico la fama de Galileo está también sólidamente asentada en las aportaciones que realizó a la ciencia de la mecánica, de los movimientos de los cuerpos, que condensó en textos tan notables como *El movimiento*, *Sobre la mecánica*, *Discurso acerca de los cuerpos flotantes*, y, sobre todo, el *Discurso y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias* (1638). Sus dos *diálogos*, el de los dos sistemas del mundo y el de las dos nuevas ciencias son, además, obras maestras de la literatura científica, escritas en lengua vernácula, el italiano, en una época en la que el latín era el idioma utilizado en este tipo de textos. Los tres personajes creados por Galileo para protagonizar esos diálogos, Salviati, Sagredo y Simplicio, copernicano el primero, neutral el segundo y aristotélico el último, son para la cultura universal parecidos, salvando las distancias, a don

Quijote y Sancho Panza, esto es, personajes mucho más vivos, a pesar de no haber existido más que en la mente de un escritor, que muchos de los que pululan, constantemente, a nuestro alrededor.

GEN. Neologismo introducido por Wilhelm Johannsen (1857-1927) en 1909 para designar las unidades de material heredado (o de transmisión genética). Proviene del griego *genesis* (generación). Situado, en los organismos superiores, en los cromosomas, un gen es una secuencia de pares de bases a lo largo de un trozo de ADN, que tiene una función específica conocida. Los genes son, en consecuencia, tiras de nucleótidos separadas entre sí por otras tiras de ADN, denominadas también «secuencias intervinientes» o «intrones». José Sanmartín ha señalado, pertinentemente, que estas secuencias son como los espacios publicitarios de las películas de televisión, pero que mientras que sabemos cuál es la función de la publicidad, ignoramos todavía para qué valen realmente los intrones.

En los seres humanos existen unos 30 000 genes diferentes, cada uno agrupando entre 2000 y 2 000 000 de pares de nucleótidos. Pequeños cambios (mutaciones) en la estructura química de los genes pueden tener consecuencias muy importantes. Como la anemia falciforme, una enfermedad hereditaria bastante frecuente. Los hematíes de las personas con este tipo de genes sufren grandes alteraciones de formas cuando se exponen a bajas concentraciones de oxígeno. Como consecuencia, a los hematíes les es entonces muy difícil pasar a través de los capilares sanguíneos, con el resultado de grandes dolores e incluso la muerte (por razones evidentes, en las academias de las Fuerzas Aéreas de algunas naciones se efectúan exámenes genéticos para detectar esta anemia). Se conocen más de cuatro mil defectos en los que un solo gen provoca trastornos en los seres humanos. Y la mayoría son letales, abundando, además, los casos en los que las víctimas son preferentemente niños.

Estos ejemplos y nociones, tan sencillos y elementales, sirven perfectamente para apreciar con claridad parte de la importancia de la genética y biología moleculares. Con ellas es posible plantear la tarea de identificar el defecto genético responsable de enfermedades (se estima que un recién nacido de cada trescientos es portador de una anomalía genética). En 1986, por ejemplo, un equipo de investigadores norteamericanos identificó el defecto genético responsable de un tipo de distrofia muscular. En 1989, un grupo de biólogos anunció el descubrimiento de la situación del gen que, cuando sale defectuoso, produce la fibrosis quística, una enfermedad que afecta a los pulmones, páncreas y otros órganos.

A partir de entonces, los avances en esta dirección son constantes. En 1993, por ejemplo, se localizó el gen de la corea de Huntington, un trastorno que produce una degeneración progresiva del cerebro, que viene acompañada de la aparición de fuertes movimientos incontrolados y que conduce, inevitablemente por el momento, a la muerte (habitualmente ataca a las personas de alrededor de 35 años).

De esta manera, será posible (es ya posible en bastantes casos) al menos identificar a los padres que pueden transmitir el defecto, o hacer pruebas a la mórula —el primer esbozo del embrión— para comprobar si el ser humano que surgirá de él será portador o no de la anomalía. Y no sólo eso: en algunos casos será factible también remediar lo que antes parecía irremediable, curar las enfermedades. El primer paso en esta dirección se dio en septiembre de 1991, cuando se practicó a una niña de cuatro años el primer trasplante genético. La experiencia tuvo éxito.

Básicamente, el objetivo principal de las terapias génicas es aportar un gen normal para paliar la insuficiencia de un gen. De hecho, existen dos tipos de terapias génicas: la

terapia génica somática, que no se transmite a la descendencia, y la terapia de células germinales, que sí se transmite. Esta última se aplica con cierta extensión en la actualidad a ratones y animales de granja. Su utilización con la especie humana no es técnicamente imposible, pero podría conducir a prácticas eugénicas. Y también está la clonación, de la que me ocupo en otro lugar de este diccionario.

Los avances en el conocimiento de la estructura de los genes afectan al universo de los comportamientos y valores sociales, éticos, de manera que no es deseable limitar el tratamiento de las cuestiones que se refieren a la genética, biología molecular o ingeniería genética a aspectos puramente científicos o tecnológicos. Veamos a continuación algunos posibles temas que se pueden —y deben— analizar en tal sentido.

El que podamos averiguar la situación, en las secuencias de ADN que constituyen los genes, de los defectos que producen muchas enfermedades, constituye una información que se puede utilizar en numerosas direcciones. Tomemos como ejemplo a la corea de Huntington. La detección de esta enfermedad en un óvulo recién fecundado puede ser utilizada para que la mujer embarazada decida abortar, evitándose de esta manera un problema dramático. Pero pensemos en otro ejemplo que conduce a situaciones muy diferentes. Una familia estadounidense tenía un hijo que padecía de fibrosis quística. El joven recibía atención médica a través de un seguro privado. Cuando su madre quedó embarazada de nuevo, se le exigió someter al feto a una prueba genética para averiguar si su hijo padecería el mismo trastorno. El resultado fue positivo, pero la mujer decidió continuar con su embarazo. El seguro se planteó entonces la posibilidad de anular o limitar sus prestaciones a la familia.

Tenemos que darnos cuenta de que de lo que se está hablando aquí es de una situación nueva y compleja. Es evidente, especialmente dada la naturaleza de la cobertura médica en Estados Unidos, que la compañía de seguros —esta u otra cualquiera, en distintas o parecidas circunstancias— podía intervenir condicionando muy seriamente las posibilidades de esta familia, que, de esta manera, vería limitada gravemente su libertad. ¿Qué hacer en este tan notorio —y en muchos aspectos paradigmático— caso de conflicto de intereses? He aquí uno de los problemas que el desarrollo del conocimiento científico plantea al presente y al futuro.

El mercado laboral puede verse también condicionado por la información genética. Hay que señalar en este sentido que uno de los hallazgos de la biología molecular es que existen secuencias de bases sensibles a la acción de factores ambientales determinados. Como los que se pueden encontrar en algunos puestos de trabajo.

Aquí surgen, de nuevo, diferentes posibilidades. El poseer semejante información es, evidentemente, bueno para la persona, en tanto que elimina riesgos para su salud, pero también puede conducir a que las empresas en cuestión encaminen sus esfuerzos no a modificar las circunstancias medioambientales de sus centros de trabajo, ni a introducir cambios estructurales, sino, simplemente, a buscar empleados genéticamente resistentes, lo que tal vez conduciría a nuevas «clases —o *castas*— sociales», definidas por características biológicas, una idea esta ante la que muchos retrocederíamos.

[Véase INGENIERÍA GENÉTICA, CLONACIÓN y DOLLY].

GRAN CIENCIA. Tipo de práctica científica que se inició y desarrolló durante el siglo XX y que requiere de grandes recursos de infraestructura y personal, y, por consiguiente, económicos. Por este motivo, es necesario tomar decisiones políticas de cierta envergadura para iniciar o mantener proyectos de Gran Ciencia. No estaría de más, por consiguiente, que todos —científicos, políticos o simples ciudadanos (no sé muy bien por

qué escribo «simples», cuando ser un buen ciudadano es realmente bastante complicado)— deberíamos conocer no sólo la existencia e importancia de este tipo de ciencia, sino sus mecanismos más notorios. Para contribuir a esta labor de educación social, en una era en la que la ciencia es cuestión de Estado, incluyo aquí este concepto.

El nacimiento de la Gran Ciencia tiene que ver especialmente con la física de las partículas elementales (ahora denominada de altas energías). Buscando instrumentos que fuesen capaces de suministrar cada vez mayor energía a partículas atómicas, para que éstas pudiesen chocar con el núcleo atómico, lo que a su vez debería permitir ahondar en su estructura y en la de los elementos que lo forman —esto es lo que había hecho Ernest Rutherford (1871-1937) en 1911 cuando propuso su modelo atómico: lanzó núcleos de helio sobre láminas delgadas de oro—, físicos británicos primero, y estadounidenses después abrieron la puerta de la Gran Ciencia. En 1932, John Cockcroft (1897-1967) y Ernest Walton (1903-1995), del Laboratorio Cavendish en Cambridge, utilizaban un multiplicador voltaico que alcanzaba los 125 000 voltios para observar la desintegración de átomos de litio. En realidad no era una gran energía: cuatro años antes Merle Tuve (1901-1982) había utilizado un transformador inventado por Nikola Tesla (1856-1943) para alcanzar, en el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington, los tres millones de voltios. En 1937, Robert J. Van de Graaff (1901-1967) logró construir generadores de cerca de cinco metros de altura, que producían energías de cinco millones de voltios. Fue, sin embargo, Ernest O. Lawrence (1901-1958) el principal promotor de la Gran Ciencia en la física de partículas elementales.

A partir de 1932, Lawrence comenzó a construir ciclotrones, máquinas circulares en las que las denominadas partículas elementales iban ganando energía durante cada revolución, lo que les permitía acumular suficiente energía. El primer ciclotrón medía apenas treinta centímetros de diámetro. Pero aquello sólo era el comienzo: en 1939 Berkeley ya contaba con un ciclotrón de metro y medio de diámetro, en el que los electrones podían alcanzar una energía equivalente a dieciséis millones de voltios (16 Mev). Y en septiembre de ese año Lawrence anunciaba planes para construir uno nuevo que llegase a los 100 MeV. En abril de 1940, la Fundación Rockefeller donaba 1,4 millones de dólares para la construcción de aquella máquina, el último de sus ciclotrones, que iba a tener más de cuatro metros y medio de diámetro. En la actualidad los grandes aceleradores tienen kilómetros de radio, y cuestan miles de millones de dólares. Aquí tenemos una de las características que con mayor frecuencia se encuentra en la Gran Ciencia: mayor tamaño, mayor potencia, mayor costo económico.

No sólo es el tamaño de las máquinas implicadas lo que caracteriza a la Gran Ciencia. Alrededor de los ciclotrones de Lawrence se agrupaban físicos, químicos, ingenieros, médicos y técnicos de todo tipo. En varios sentidos el laboratorio de Berkeley se parecía más a una factoría que a los gabinetes y laboratorios de otras épocas, el de Lavoisier (1743-1794) en París, el de Liebig (1803-1873) en Giessen o el de Maxwell (1831-1879) en Cambridge.

La segunda guerra mundial dio un nuevo impulso a este modo, «gigantesco», de organización de la investigación científica. Para llevar adelante proyectos como el del radar o el Manhattan se necesitaban científicos, por supuesto, pero no bastaba sólo con ellos. Era imprescindible también disponer, además de otros profesionales (ingenieros, muy en particular), de una estructura organizativa compleja, en la que no faltase el modo de producción industrial.

Los grandes recursos económicos que requiere la Gran Ciencia no siempre están a

disposición de naciones aisladas. En la Europa posterior a la segunda guerra mundial, la construcción de grandes aceleradores de partículas era demasiado costosa como para que cualquier nación pudiese permitirse el lujo de construir uno lo suficientemente potente como para poder aspirar a producir resultados científicos de interés. Así nació el Centre Européen de Recherches Nucléaires (CERN) de Ginebra, fundado en 1952 por doce naciones europeas. La Gran Ciencia fomentaba en este caso la internacionalización. De hecho, el CERN sirvió de experiencia de asociación política europea; el ambiente político estaba listo para este tipo de experiencias, que culminarían años más tarde en la creación de la Comunidad Económica Europea, que con el tiempo se convertiría en la actual Unión Europea.

La Gran Ciencia puede llegar a ser tan grande que incluso naciones del potencial económico e industrial de Estados Unidos se vean obligadas a abrir algunos de sus proyectos científicos a otros países. Esto ha ocurrido, por ejemplo, con el telescopio espacial Hubble construido por la National Aeronautics and Space Administration (NASA). El telescopio Hubble fue lanzado el 24 de abril de 1990, utilizando para ello una de las aeronaves Discovery, pero la idea de poner un gran telescopio en órbita alrededor de la Tierra para evitar la pantalla de radiaciones que es la atmósfera terrestre había surgido cuatro décadas antes. En esos cuarenta años hubo que vencer muchas dificultades; algunas de carácter técnico, por supuesto, pero otras de orden financiero y político. En 1974, por ejemplo, la Cámara de Representantes estadounidense eliminó del presupuesto el proyecto del telescopio, a pesar de que ya había sido aprobado en 1972. El motivo es que era demasiado caro. Tras muchas gestiones se llegó al compromiso de que el proyecto saldría adelante únicamente si se internacionalizaba, involucrando a la Agencia Espacial Europea (European Space Agency; ESA). Por supuesto, no se dio este paso por un repentino ataque de fervor ecuménico de los representantes estadounidenses, sino porque la ESA se debería hacer cargo del quince por ciento del presupuesto, con lo que éste se abarataría sustancialmente para Estados Unidos. Finalmente la agencia europea, formada por un consorcio de naciones entre las que se encuentra España, participó en el proyecto, encargándose en particular de la construcción de una cámara para fotografiar objetos que emiten una radiación débil. En más de un sentido se puede decir que el mundo de las naciones individuales se está quedando demasiado pequeño para la Gran Ciencia. Una muestra más de esa tendencia, la globalización, que parece estar caracterizando al mundo de finales del siglo XX.

GRIPE. La gripe es una infección, contagiosa, de las vías respiratorias causada por un virus, que daña la mucosa de las vías respiratorias y que permite a agentes patógenos penetrar en nuestros cuerpos, provocando fiebre, dolores de cabeza y de las articulaciones y una fuerte tos que dura varias semanas. Como el sistema inmunológico se debilita con ella, a la gripe le pueden seguir otras infecciones.

Al ser contagiosa, la gripe puede convertirse en un gran peligro, dando lugar a epidemias que se extienden a numerosos países o que atacan a muchos de los individuos de una localidad o región. Viva está aún en el recuerdo de la humanidad la epidemia de marzo de 1918 a febrero de 1919, denominada, injustificadamente, «gripe española», en la que murieron más de veinte millones de personas.

Al igual que otras enfermedades que afectan a los humanos, la gripe es un producto del contacto que mantenemos, a través de la ganadería, con animales domésticos: la gripe nos llegó de los cerdos, el sarampión y la tuberculosis de las vacas y la viruela probablemente de los camellos. De hecho, como el virus que provoca la gripe se mezcla a

menudo con los virus de la gripe animal, surgen nuevas variaciones para las que no disponemos de vacunas, siendo, por consiguiente, preciso desarrollar constantemente nuevas vacunas. En algunas granjas de Asia, por ejemplo, donde las personas conviven con patos y cerdos, y donde los distintos virus de la gripe pueden intercambiarse mutando sus genes, surgen nuevas cepas. Tal es el origen de una variedad de gripe que cuando escribo estas líneas (2006) nos está preocupando mucho: la denominada «gripe aviar», que se teme atacará con mortal dureza a los humanos. Los expertos nos dicen que la presente situación no representa ninguna sorpresa y que si la epidemia no tiene lugar ahora, será en los próximos pocos años; que las semillas ya están sembradas y en camino de fructificar, y que nada puede parar su aparición. Y lo peor es que, efectivamente, tienen razón: no hay nada nuevo, o difícil de imaginar, en lo que se nos avecina, aunque, claro, ahora estamos mejor preparados para enfrentarnos a ello porque sabemos más. No olvidemos, de todas maneras, que para producir vacunas o antivirales, primero tiene que haber surgido el virus mutante.

Otro problema, acaso el gran problema, es el de ¿qué fronteras se pueden establecer ante virus, como el de la gripe, que viajan con el aire que respiramos (no estamos hablando ahora, recordemos, del sida, del ébola o de la hepatitis C, que se propagan a través del contacto personal)? Añadiré que muchos de estos males surgen sobre todo en países pobres, con lo que se hace más evidente que nunca la necesidad de luchar contra la pobreza. Y no sólo contra la pobreza, también contra la ignorancia. No es suficiente, en efecto, con que los países ricos destinen una parte de sus presupuestos a los países más pobres; también tienen que ayudar a educarlos, a que sus sistemas educativos, sanitarios e industriales sean mejores.

[Véase ANTIBIÓTICO y VIRUS].

H

HAWKING (Stephen). Seguramente son muchas las personas a lo largo y ancho del mundo que con dificultad pueden mencionar un nombre de un científico vivo (y acaso también muerto) que no sea el del físico inglés Stephen W. Hawking (Oxford, 1942). Es por esta razón que he decidido incluirlo en este diccionario. En mi opinión, ni es ni ha sido uno de los físicos más importantes del siglo XX o comienzos del XXI. No es, desde luego, como a veces se ha dicho y escrito (especialmente en los textos publicitarios de las contraportadas de sus libros de divulgación), «el sucesor de Einstein». Es cierto que se ha dedicado a uno de los campos de investigación que éste creó, el de la relatividad general, y también que ha realizado contribuciones notables a él, pero de eso a considerarle de la talla de Einstein va un mundo.

Efectivamente, Hawking ha sido —ya lo es menos— un magnífico físico. Sus trabajos de mediados de la década de 1960 (algunos en colaboración con Roger Penrose) sobre singularidades —como pueden ser el *big bang* o los agujeros negros— en el espacio-tiempo de la relatividad general fueron no sólo importantes en sí mismas, sino también para dar impuso, incluso para «crear», a un campo de investigación que no ha hecho sino crecer desde entonces.

Otros trabajos de Hawking que es obligado recordar son los que dedicó a lo que se conoce como «evaporación de agujeros negros». Durante un simposio dedicado a la «Gravedad cuántica» que se celebró en Oxford en 1974, Hawking sorprendió al mundo de los relativistas presentando la demostración de que los agujeros negros, que previamente se habían contemplado como incapaces de emitir nada, sólo de absorber, podían radiar debido a un mecanismo mecánicocuántico, en el que se producían parejas de partícula-antipartícula, y que permitía hablar de la «temperatura» del agujero negro. Y temperatura está asociada a «calor», y éste a «emisión térmica». Semejante emisión térmica conduce a una lenta disminución de la masa de un agujero negro. Si la disminución es continua, es evidente que el agujero negro puede terminar desapareciendo. Sin embargo, para agujeros negros «normales», cuya masa es varias veces la masa del Sol, esto no ocurre. En el caso, por ejemplo, de un agujero negro de una masa solar, su temperatura es menor que 3 grados kelvin, la temperatura, aproximada, del fondo de microondas, la radiación «fósil» o, mejor, «residual» del *big bang*. Esto quiere decir que agujeros negros de ese tamaño absorberán radiación más rápidamente de la que emitirán, lo que significa que continuarán aumentando de masa. Sin embargo, Hawking argumentó que además de los agujeros negros formados en un colapso gravitacional de grandes cantidades de materia, cabe suponer que se formarían otros, mucho más pequeños, en los primeros instantes del universo, debido a las fluctuaciones de densidad de materia-energía que se produjeron entonces. Estos mini-agujeros negros tendrían una temperatura mucho mayor y radiarían más energía de la que absorberían. Perderían masa, lo que les haría todavía más calientes, y acabarían estallando en una gran explosión de energía. Su vida sería tal, que podríamos observar esas explosiones ahora. No obstante, aún no han sido detectadas.

Fue el gran momento de Hawking como científico, aunque no, en modo alguno, su final. Sin embargo, por entonces apenas era conocido fuera del mundo científico. Todo cambió con la publicación de su libro de carácter popular, o de divulgación: *A Brief History of Time* (1988), traducido al español no como *Una breve historia del tiempo*, sino como *Historia del tiempo*. De él se han vendido más de diez millones de ejemplares (se mantuvo

durante cuatro años en la lista de superventas del *London Sunday Times*), y probablemente ha sido traducido a todas las lenguas del mundo con un mínimo de hablantes. Es un buen libro, imaginativo y muy especulativo, y está escrito con un gran sentido del humor, y también de la oportunidad. Del humor me quedo con unas frases que aparecen en los «Agradecimientos»: «Alguien me dijo que cada ecuación que incluyera en el libro reduciría las ventas en la mitad. Al final, sin embargo, sí que incluí una ecuación, la famosa ecuación de Einstein, $E = mc^2$. Espero que esto no asuste a la mitad de mis potenciales lectores». Me encuentro a menudo con personas que me dicen que no lo han entendido, algo que, por otra parte, no parece disminuir su entusiasmo y admiración por libro y autor. Dejando aparte el sentido del humor que he mencionado, y también el que el universo tiene para nosotros un atractivo especial, acaso atávico, y que la *Historia del tiempo* trata de eso, Hawking atrae la atención del público por la situación física en que se encuentra desde hace mucho.

En 1963, poco después de graduarse en Oxford y trasladarse a Cambridge, con el propósito de hacer una tesis doctoral en cosmología, desarrolló una gravísima enfermedad: la esclerosis lateral amiotrófica, también conocida como enfermedad de Lou Gehrig, un mal que destruye lentamente los nervios que controlan los músculos del cuerpo y que deja que éstos se consuman uno tras otro hasta quedar paralizados. Normalmente, este tipo de enfermedad conduce con cierta rapidez a la muerte, y Hawking pensó que eso le ocurriría a él, por lo que perdió durante algún tiempo interés por la ciencia. No obstante, hacia el invierno de 1964-1965 se hizo patente que la suya era una variante más lenta, y recuperó las ilusiones (de hecho se casó en 1965 y tuvo dos hijos y una hija; bastantes años más tarde, ya célebre y mucho más incapacitado, se divorció y volvió a casarse). Cuando yo vivía en Oxford, entre 1975 y 1978, recuerdo haberle escuchado —y entendido lo que decía— en algún seminario suyo en el Instituto de Matemáticas. Hoy no sólo no puede hablar, sino que lo único que le conecta al mundo es un dedo, un mero dedo, con el que maneja un ordenador que produce una fría voz sintética, metálica.

No creo que sea irreverente o exagerado decir que la presencia física de Hawking, sentado, desmañado, incapaz de sujetarse, en una silla de ruedas, con cada vez más dificultades para hacerse entender, ha sido muy, muy importante en la atracción que el público ha sentido y siente por él y, subsiguientemente, por sus libros (después de *Historia del tiempo* llegaron otros, como el magnífico *El universo en una cáscara de nuez* publicado en 2001). Con justicia, la sociedad, el mundo, ha apreciado, admirado y se ha conmovido con el esfuerzo de un científico severamente incapacitado, que puede realizar complicados cálculos en su mente, sin un papel que le ayude, y que a pesar de todo no ha perdido el sentido del humor, que en él es casi legendario, ni la ilusión de vivir (viaja, por ejemplo, muy a menudo). Es, por todo ello, un ejemplo. El ejemplo de un ser humano que quiere vivir, que ama la ciencia, y el agrandarla y transmitirla a otros. Por eso es justa su fama, aunque no sea «el sucesor de Einstein», y también que ocupe en Cambridge la cátedra («Lucasiana») universitaria que una vez fue de Isaac Newton.

[Véase AGUJEROS NEGROS].

HELMHOLTZ (Hermann). 1821-1894. No son demasiados los científicos a los que está dedicada una entrada en este diccionario, que no he querido convertir en un compendio biográfico, y posiblemente Helmholtz sea, de entre los que incluyo, uno de los menos conocidos para la mayoría de mis lectores. Es una pena, ¿qué quieren que les diga?, ya que Helmholtz fue un personaje muy, pero que muy interesante. Ludwig Boltzmann (1844-1906), uno de los grandes físicos de finales del siglo XIX, quien más contribuyó al establecimiento de la física estadística y cuya visión de la entropía —concepto

termodinámico que nos da una idea del paso, y del sentido, del tiempo— todavía conservamos, decía que Helmholtz había sido el último físico que fue capaz de tener una visión global de toda la física. En realidad, Boltzmann barría para su disciplina, ya que Helmholtz fue mucho más que un físico; de hecho terminó siendo eso, pero había comenzado como médico, distinguiéndose en primer lugar como fisiólogo. Si hubiese sido solamente un físico, no lo encontraría usted aquí, no le quepa la menor duda.

El siglo XIX, la centuria en la que vivió Helmholtz, fue un gran siglo para la ciencia. Fue, en efecto, la centuria en la que vivieron luminarias como Faraday (1791-1867), Maxwell, Darwin o Louis Pasteur (1822-1895). La época en la que la física del electromagnetismo experimentó un avance extraordinario, con enormes repercusiones sociales (transportes, iluminación, procesos industriales). Los años en los que llegó a verse la historia de la especie humana de una forma nueva, evolutiva. Un tiempo en el que el reino de la matemática euclidiana perdió su carácter monopolizador, naciendo las denominadas «geometrías no euclidianas».

Acaso menos popular, pero en modo alguno menos importante, se encuentra la profunda revolución que sufrió la fisiología. A lo largo del siglo XIX, en especial durante su primera mitad, tuvo lugar un dramático enfrentamiento entre dos planteamientos que pugnaban por acaparar la explicación de los fenómenos biológicos: «vitalismo» y «reduccionismo». Una confrontación entre los que opinaban que los procesos que tienen lugar en los cuerpos vivos están determinados por un agente no sometido a las leyes físico-químicas, al que denominaban *principio vital*, y los que defendían la idea de que las funciones fisiológicas se explican en base a las leyes de la física y la química. «Todavía a comienzos de este siglo [el XIX] —recordaba en su autobiografía Helmholtz— los fisiólogos creían que era el principio vital el que producía los procesos de la vida, y que se rebajaba la dignidad y naturaleza de ésta si alguien expresaba la creencia de que la sangre era conducida a través de las arterias por la acción mecánica del corazón, o que la respiración tenía lugar siguiendo las leyes habituales de la difusión de los gases. Por el contrario, la generación actual trabaja duramente para encontrar las causas reales de los procesos que tienen lugar en un cuerpo vivo. No suponen que exista ninguna diferencia entre las acciones químicas y las mecánicas en el cuerpo vivo y fuera de él».

El universo de los conceptos y teorías biomédicas en el que creció Helmholtz —y otros grandes fisiólogos como Johannes Müller (1801-1858), Rudolf Virchow (1821-1902), Emil du Bois-Reymond (1818-1896) y Ernst Brücke (1819-1892)— era extremadamente complejo; circulaban por él todo tipo de ideas y problemas. Teorías como la de Lavoisier (1743-1794) y Laplace (1749-1827), diseñada para explicar los fenómenos químicos asociados a la respiración y la influencia de éstos en la producción de calor en los animales. Investigaciones sobre fenómenos como la putrefacción y la fermentación, que para unos (Liebig) eran simplemente descomposiciones químicas, que ocurrían espontáneamente o con ayuda del oxígeno atmosférico, mientras que para otros (Helmholtz) estaban ligadas a la presencia de microorganismos que se producen sólo por reproducción (hasta los resultados de Pasteur, la teoría de la descomposición de Liebig mantendría su influencia). Por último, no es posible olvidar los estudios sobre el metabolismo de los movimientos musculares, que terminaron siendo relacionados con investigaciones sobre la producción de calor durante la actividad muscular.

Se trataba de un mundo especialmente adecuado para fecundar y ser fecundado por otras ciencias, a y por la física y la química en especial. Esto es lo que hizo Helmholtz, que estudió medicina y no física.

En octubre de 1843, finalizado su internado, Helmholtz fue nombrado oficial médico y destinado al hospital militar de Potsdam. Allí permaneció cinco años. Como sus obligaciones médicas no eran excesivas pudo compatibilizarlas con la investigación. Durante aquellos años trasladó el centro de sus trabajos de la putrefacción y fermentación a la producción de calor durante la contracción muscular. Se dio cuenta de que la explicación del calor animal en función de transformaciones químicas en los músculos encajaba perfectamente con los propósitos de una «física orgánica» y consiguió demostrar que el calor no era transportado a los músculos a través de los nervios o de la sangre, sino que era producido por los propios tejidos. Cuantificando estos hechos fisiológicos, dedujo un equivalente mecánico del calor que incorporó a su célebre memoria de 1847, *Über die Erhaltung der Kraft* (*Sobre la conservación de la fuerza*; todavía no se distinguía entre «fuerza» y «energía»), un trabajo que le ayudó, de la mano del influyente Alexander von Humboldt (1769-1859), a obtener permiso para abandonar —en 1848— el ejército y aceptar la oferta de enseñar anatomía en la Academia de Bellas Artes de Berlín.

La historia del principio de conservación de la energía, que encontró en la formulación de Helmholtz su expresión más general, está asociada a diversas disciplinas. No es sorprendente, en consecuencia, que a él llegasen, por caminos diferentes, personajes diversos. Si existen casos de «descubrimientos simultáneos» éste es uno de ellos. Entre 1842 y 1847, cuatro científicos, Julius Mayer (1814-1878), James Prescott Joule (1818-1889), Ludvig Colding (1815-1888) y Helmholtz, hicieron pública, de manera independiente, la hipótesis de la conservación de la energía. Asimismo, y aunque de forma menos general que los cuatro citados, otros científicos avanzaron en direcciones parecidas: Sadi Carnot (1796-1832), antes de 1832, Marc Séguin (1786-1875) en 1839, Karl Holtzmann en 1845 y Gustav Adolphe Hirn (1815-1890) en 1854, expresaron sus convicciones de que el calor y el trabajo son equivalentes cuantitativamente y calcularon coeficientes de conversión.

La fecundidad y originalidad de sus investigaciones permitieron a Helmholtz ocupar cátedras en varias universidades germanas. Continuó sus estudios en la fisiología de los nervios (midiendo, por ejemplo, la velocidad de los impulsos nerviosos), entrando, asimismo, en la óptica y acústica fisiológicas, áreas en las que permaneció trabajando durante los siguientes veinte años. Preparando una de sus clases, se dio cuenta de que las sencillas leyes de la óptica geométrica le permitían construir un instrumento de gran importancia potencial para la comunidad médica: el oftalmoscopio. Nadie antes que Helmholtz, vio los globos oculares, las retinas de los seres humanos vivos, como las contempló él.

Progresivamente fue perdiendo interés en la fisiología, adentrándose en los senderos de la física y la matemática, campos en los que también realizó contribuciones notables, como al desarrollo de la teoría electromagnética (además, Hertz (1857-1894), que detectó —en 1888— las ondas electromagnéticas, con lo que abrió un nuevo mundo científico y tecnológico, fue alumno suyo), a la teoría matemática de la estabilidad de estructuras hidrodinámicas, o a la naturaleza perceptiva de los axiomas de la geometría.

En una época dominada por los especialistas, por aquellos que nunca abandonan el restringido ámbito de *una parte de una ciencia*, el recuerdo de las magníficas contribuciones realizadas por Helmholtz nos muestra la fecundidad de lo multidisciplinar. Ya sé que los tiempos han cambiado, que la lección de Helmholtz introduciendo, por ejemplo, la física en la fisiología, no ha sido olvidada, que hoy es parte asumida en la formación de fisiólogos o biólogos moleculares, o, simplemente, médicos, pero tendemos a

olvidar el modelo del que surgió y a no recordar que si los modelos no se continúan aplicando caen en el olvido, y nos hacemos, nosotros y nuestras ciencias, mucho más pobres.

I

INFINITO. Uno de los momentos en los que creemos que empezamos a captar la esencia de la capacidad conceptualizadora y de abstracción que posee la matemática (yo prefiero el singular al plural: matemática a matemáticas) es cuando entendemos qué quiere decir el término «infinito» (definido por el astrónomo indio de la primera mitad del siglo VII, Brahmagupta, como el número cuyo denominador es cero, y que posee su propio símbolo, ∞ , introducido, parece, por el matemático inglés John Wallis [1616-1703] en 1655). Tal comprensión es, no obstante, equívoca. Compartimos realmente algo del espíritu que anima a la matemática cuando somos capaces de entender que existen diversos tipos de infinitos.

Aunque en una discusión más completa no podría olvidarse a Bernardus Bolzano (1781-1848), autor de un tratado sobre *Paradojas del infinito*, fue realmente Georg Cantor (1845-1918) quien, a fines del siglo XIX, se dio cuenta de semejante pluralidad, sentando las bases de la teoría de los conjuntos y de los números transfinitos. El «truco» está en contar los elementos de dos conjuntos poniendo en correspondencia, uno a uno, sin repetición ni omisión, los elementos de ambos. De esta manera, es inmediato ver que hay igual cantidad de números naturales (1, 2, 3, 4...) que de números pares o impares. Asimismo, todo segmento de una recta contiene el mismo número —infinito— de puntos que no importa qué otro segmento de una línea recta. También —fue el primer descubrimiento revolucionario de Cantor— hay tantos puntos en todo el plano como en una recta. Ocurre, sin embargo, que estos últimos infinitos no son de la misma naturaleza que el infinito de los números enteros (... , -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3...). Nos vemos conducidos así a hablar de «números cardinales», el número de elementos que tiene un conjunto: para conjuntos finitos, su número cardinal (o «potencia») es el número usual de sus elementos, mientras que para conjuntos infinitos es preciso introducir nuevos términos. Cantor utilizó la primera letra del alfabeto hebreo, «aleph», seguida del subíndice cero (\aleph_0), para denotar el número cardinal del conjunto de los naturales.

Este número tiene propiedades que desde la lógica habitual, aristotélica, parecen paradójicas: $\aleph_0 + 1 = \aleph_0$, $\aleph_0 + \aleph_0 = \aleph_0$, $\aleph_0^2 = \aleph_0$. Es parecido a la ley de suma de velocidades dentro de la relatividad especial, en donde $c + c = c$ (c representa la velocidad de la luz).

A cualquier conjunto cuyos elementos se pueden poner en correspondencia uno-a-uno con el conjunto de los naturales, Cantor lo denominó «numerable». Ya he indicado que los números pares y los impares son numerables, pero es posible demostrar que también lo es el conjunto de los enteros. Lo mismo sucede con los racionales. Un número racional p/q se define mediante una pareja (p, q) de enteros, por tanto la cantidad de racionales será \aleph_0^2 , pero esto es igual, como he indicado, a \aleph_0 .

Sin embargo, no ocurre otro tanto con los números reales (que podemos considerar como números decimales con una cantidad ilimitada de cifras decimales). La demostración de que hay más números reales que enteros o naturales no es inmediata, pero Cantor logró probarlo, y asignó a ese nuevo número cardinal la letra c .

Cantor también investigó la cardinalidad de otros conjuntos infinitos de números. Descubrió, por ejemplo, que los números algebraicos (aquellos que son soluciones de ecuaciones polinómicas) forman un conjunto numerable. Lo que no pudo resolver es el problema de si hay o no números transfinitos (más allá del infinito tradicional) entre \aleph_0 y c ; esto es, si existen conjuntos cuyo número cardinal es mayor que \aleph_0 pero menor que c . Esta

cuestión, que David Hilbert (1862-1943) incluyó a la cabeza de sus célebres 23 problemas en la conferencia que pronunció en el Segundo Congreso Internacional de Matemáticos (París, 1900), todavía permanece abierta. En cambio, sí que pudo demostrar que hay infinitos números transfinitos mayores que c : el resultado clave en este sentido fue la demostración de que el conjunto formado por todos los subconjuntos de un conjunto dado tiene siempre un cardinal mayor que el conjunto mismo; por tanto, el cardinal del conjunto de todos los conjuntos de números reales será un tercer número transfinito, el conjunto de los subconjuntos de este conjunto de subconjuntos determinará un cuarto número aún mayor, y así indefinidamente. Al igual que hay infinitos números naturales, hay infinitos números transfinitos.

Se trataba, obviamente, de un mundo completamente nuevo. Un mundo sorprendente para las categorías a las que nos ha acostumbrado la lógica tradicional de lo finito. Cuando uno se sumerge, como lo hizo Cantor, en el universo, racional, de las ideas que subyacen a lo que sólo aparentemente son grupos diferentes, cuando busca aquello que caracteriza a *conjuntos* de elementos, y opera con ellos, construyendo álgebras o teorías de conjuntos, se pueden descubrir nuevos y fecundos continentes matemáticos. Por eso la «teoría de conjuntos» se ha instalado de manera tan profunda en el cuerpo de la matemática de nuestro siglo.

Pero además de por estos motivos, a mí me gusta volver la mirada hacia esta maravillosa rama de la matemática por otras razones también. En el mundo de los infinitos, la vieja máxima (finita) de que «el todo es mayor que las partes», puede ser, como hemos visto, falsa, ya que el todo puede coincidir con una de sus partes, o con un conjunto todavía «más vasto» que él. Este sencillo, aunque profundo, hecho, lo podemos considerar, aunque sea mostrando un no demasiado justificado oportunismo, como una lección de humildad que nos ofrece la matemática. Como una defensa del valor y dignidad de lo «pequeño», de lo «limitado», de lo «parcial» (que ya no lo son realmente), en favor de la igualdad intrínseca, por encima de las diferencias, más aparentes que sustanciales.

¡Ah!, no les he dicho nada de Cantor, aquel gran revolucionario de la ciencia matemática. No tuvo una vida excesivamente grata: logró, es verdad, una cátedra universitaria, pero en la pequeña y poco importante Universidad de Halle. En vano esperó una oferta de universidades más importantes. Leopold Kronecker (1823-1891), desde su atalaya de Berlín, fue especialmente duro con él. «Dios creó los números naturales y el hombre creó todo lo demás», dicen que manifestó Kronecker para expresar la artificialidad que encontraba en los infinitos y transfinitos cantorianos. Frustrado, Cantor sufrió varias depresiones serias, que lo llevaron a pasar algún tiempo en hospitales. Comenzó a interesarse por la filosofía, teología, francmasonería y literatura (se esforzó por demostrar que las obras de Shakespeare no fueron escritas por él, sino por Francis Bacon). Durante la última etapa de su vida se agudizaron los trastornos mentales que padecía. Se dice a menudo, pero es muy probable que la muerte fuese un descanso para aquella mente que vio lo que nadie, antes que él, había observado.

INGENIERÍA GENÉTICA. Disciplina que se ocupa de «unir genes»; esto es, de sustituir un segmento de ADN de una célula por uno de otra (al organismo que surge de este proceso se lo denomina *transgénico*). Hasta comienzos de la década de 1970 no se conocían técnicas adecuadas para manipular el ADN en tubos de ensayo. Debido a ser las moléculas de ADN de gran tamaño, cuando se las intentaba fragmentar los cortes se producían al azar, con lo cual se descomponía la información genética contenida en ellas de forma tal que era prácticamente imposible de recomponer.

Sin embargo, a comienzos de esa década se encontraron herramientas moleculares que podían resolver muchos de esos problemas: enzimas capaces de cortar sólo por sitios determinados las moléculas de ADN; ligasas capaces de reunir con precisión molecular los fragmentos y sellar las uniones para dejarlas perfectamente reparadas, y un gran número de otras enzimas capaces de cortar, modificar, multiplicar y recomponer el ADN (se habla de ADN recombinante). Ésta es la tecnología conocida como ingeniería genética. Por medio de ella se pueden seleccionar no ya individuos, sino algunos de sus genes o porciones de ellos. Se puede, en definitiva, crear algo absolutamente nuevo: nuevas moléculas vivientes, nuevos genes y por tanto nueva vida.

Y existen otros procedimientos, más recientes, que introducen importantes novedades. Desde finales de la década de 1980 y comienzos de la de 1990 existe la posibilidad de generar animales a los cuales se les puede eliminar un determinado gen. No se trata, pues, de animales transgénicos, sino de estirpes (de ratones, por ejemplo) carentes de un determinado gen, lo que permite precisar cuál es la verdadera función de ese gen, sin más que estudiar las deficiencias que presenta el animal.

[Véase GEN].

INTELIGENCIA. Una definición, algo ambigua, es cierto, de la inteligencia que a mí me gusta es la siguiente: aptitud mental muy general que implica, entre otras cosas, la capacidad para razonar, prever, resolver problemas, pensar en abstracto, captar ideas complejas, aprender rápidamente y aprovechar la experiencia. No es sólo una capacidad escolar, una facultad estrictamente académica o una aptitud para esas pruebas denominadas test. Refleja una capacidad más amplia y profunda de comprender nuestro entorno, de dar sentido a las cosas y de imaginar soluciones prácticas.

Como decía, esta definición es ambigua y demasiado general. No parece, en consecuencia, excesivamente apta para amoldarse a los innumerables test que se han ideado para medir la inteligencia. A mí, francamente, no me importa. No soy psicólogo y, además, nadie está plenamente seguro de qué es la inteligencia (¿es lo mismo la inteligencia matemática que la de un escritor o un pintor?, porque podemos hablar de inteligencia artística, ¿no?), o de lo que realmente miden las pruebas que pretenden clasificarla. Prefiero hacer hincapié en los aspectos más difusos de esta admirable cualidad. En, por ejemplo, la, a veces, sutil y borrosa frontera que separa intuición e inteligencia. Las ciencias cognitivas nos dicen —constituye una de sus grandes revoluciones— que en todos los rincones de las ciencias de la vida se encuentran procesos inteligentes en acción, procesos que antes acostubrábamos denominar «intuiciones». Y ¿qué es la intuición sino experiencia acumulada a lo largo de la historia, una historia biológica, evolutiva?

Esta posible dimensión histórica y experiencial no desentona tampoco con el punto de vista —debatible— de que la inteligencia es producto tanto de la herencia como del medio ambiente, de la educación que uno recibe además de los genes que le transmiten sus progenitores. A falta de respuestas que la ciencia contemporánea todavía no ofrece, yo me obstino en pensar que la inteligencia es una extraña combinación de herencia y educación, salpicada de intuición, atención, atrevimiento y sentido común.

[Véanse también DETERMINISMO BIOLÓGICO e INTELIGENCIA ARTIFICIAL].

INTELIGENCIA ARTIFICIAL. Capacidad de una máquina —normalmente electrónica— para llevar a cabo razonamientos creativos, del tipo de los que ejecutan los seres humanos.

Sobre la posibilidad última de construir semejantes máquinas existen profundas

discrepancias, recientes al igual que antiguas. No es, por ejemplo, difícil entender el «*Cogito ergo sum*» («Pienso, luego existo») de René Descartes (1596-1650; *Discurso del método*, 1673) como manifestación de la idea de que el pensamiento, la inteligencia, es sinónimo de existencia (humana), y que, por consiguiente, no hay pensamiento fuera de los humanos. Por el contrario, en 1745 el filósofo y médico Julien de la Mettrie (1709-1751) afirmó que los seres humanos son máquinas. En un sentido análogo, algunos dicen hoy: «*Cogito ergo sum machina*» («Pienso, luego soy una máquina»). Lo que, en consecuencia, quiere decir: ¿por qué no van a poder pensar algunas máquinas?

Seguro que, sin embargo, mis lectores no son tan ingenuos como para no haberse dado cuenta de que en afirmaciones como las anteriores se esconden muchas, demasiadas, suposiciones; como la de qué es pensar. Acabo de señalar, además, que no está claro qué es la inteligencia, así que mal podremos ponernos de acuerdo en cómo generarla artificialmente.

Pero estas nubes no oscurecen completamente el panorama de la investigación en inteligencia artificial (IA), un panorama, eso sí, extremadamente complejo, en el que hay que recurrir a bastantes más conceptos y técnicas que las que surgen del mundo de los ordenadores, y de los lenguajes que se utilizan en él. En este sentido, Marvin Minsky (1927), uno de los más firmes defensores de la IA, ha afirmado recientemente que «la clave para construir una máquina inteligente es inventar la manera de *administrar* una variedad de recursos [...] Si nos fijamos en el cerebro, veremos que contiene cientos de redes neuronales diferentes —cientos de estructuras distintas— [...] quizá no podamos entender nada a menos que lo entendamos de diversas maneras diferentes».

Entre los que niegan la posibilidad de la IA se encuentra el notable físico y matemático británico Roger Penrose (1931), que partiendo de la idea de que no existe ninguna diferencia fundamental entre el pensamiento/inteligencia matemático y otros tipos de pensamiento, que lo que en realidad hace nuestro cerebro no es nada más que suministrar a nuestro cuerpo sistemas de control, muy eficaces, cierto es, pero en principio sustituibles por un computador, y recurriendo a resultados como el teorema que demostró en 1931 Kurt Gödel (1906-1978), ha concluido que no es posible la IA [véase MATEMÁTICA].

[Véase también NEURONA].

INTERACCIÓN. Este término tiene que ver con la física, pero su importancia se extiende mucho allá de esta disciplina, hasta abarcar prácticamente toda interpretación teórica, conceptual, de la realidad. Hay pocos conceptos tan fundamentales.

Cuando miramos a nuestro entorno, a la naturaleza, observamos que parece que hay objetos que afectan a otros, y son, recíprocamente, afectados por ellos. Si colocamos un imán en las proximidades de virutas de hierro, éstas se mueven, dirigiéndose hacia los polos del imán. Una carga eléctrica sigue caminos diferentes según esté sola o rodeada de otras. No parece existir ninguna duda de que a un cometa le afecta la presencia de un cuerpo de la magnitud del Sol, su trayectoria cambia visiblemente, y si esto ocurre para un cometa, es natural pensar que esa «influencia gravitacional» también existirá, como de hecho creemos, para objetos como planetas, estrellas o galaxias. Algunos elementos químicos, como, por ejemplo, el hidrógeno y el oxígeno se ven estimulados por su presencia mutua para, en condiciones adecuadas, combinarse formando lo que llamamos «moléculas» (el agua en este caso).

A «influencias» de este tipo se las denomina en física «interacciones», y como uno de los propósitos, el más básico e importante, de la física es explicar, prediciendo, el

movimiento de los cuerpos, resulta que un problema fundamental de esta disciplina es el de identificar los tipos —en el supuesto de que haya varios— de interacciones (también se habla de «fuerzas») que existen en la naturaleza. Identificarlas, y diseñar mecanismos para construir *dinámicas*, teorías del movimiento que nos permitan predecir los movimientos futuros (¡y pasados!) de los objetos que existen en el universo, ya sea un planeta, un electrón o el movimiento que tiene como resultado la formación de un cuerpo compuesto como es una molécula.

Tres son los conceptos que se han ideado para explicar las interacciones que se producen entre objetos: acciones por contacto, acciones a través de un medio y acciones a distancia. No es preciso elaborar demasiado con relación a las primeras: se producen mediante choques. Las acciones a través de un medio tienen lugar cuando se recurre a la existencia de algo que transmite la interacción entre los objetos que se afectan mutuamente. Inicialmente se postuló la existencia de «medios» —éteres— de naturaleza mecánica, no diferentes en esencia de los cuerpos conocidos. Precisamente fue desarrollando la idea y propiedades del éter que transmitía la interacción electromagnética que éste terminó «descremándose», perdiendo su naturaleza mecánica; poseía características dinámicas (energía, por ejemplo), pero era «otra cosa» diferente a la materia. Tal vez por ello, se impuso la denominación de «campos». La interacción a través de un medio es desde hace mucho «interacción mediante campos»; más aún, la física contemporánea es el reino de los campos, algunos más visibles e intuitivos (como los electromagnéticos y gravitacionales), otros no tanto (los casos de las interacciones fuerte y débil, responsables, respectivamente, de que el núcleo atómico esté unido y de fenómenos radiactivos como la desintegración beta).

Existe, de hecho, una conexión entre las interacciones a través de choques y campos surgida de la física cuántica. La dualidad onda-corpúsculo, introducida por Louis de Broglie (1892-1987) en 1924 y que constituye uno de los rasgos más llamativos y fundamentales de la teoría cuántica, tiene entre sus consecuencias el que cada campo lleve asociado un *cuanto*, una partícula elemental que representa la interacción vinculada al campo en cuestión (los fotones, o cuantos del campo electromagnéticos, son las más conocidas de estas partículas). Desde esta perspectiva, podemos considerar la interacción mediante un campo determinado como equivalente a un choque —o intercambio— entre una partícula y un cuanto, que ha emitido otra partícula, aquella con la que está interaccionando la primera. Los denominados «diagramas de Feynman», introducidos en la electrodinámica cuántica (teoría cuántica del electromagnetismo) por el científico estadounidense Richard Feynman (1918-1988), representan magníficamente esta idea.

Por último, están las acciones a distancia. Una fuerza a distancia no depende de ningún elemento «intermedio», sólo de datos (habitualmente las posiciones y las velocidades; tal vez el tiempo también) relativos a los dos objetos que interaccionan entre sí (también pueden existir interacciones a n -cuerpos, con $n > 2$). En este sentido, se trata de una interacción misteriosa; únicamente sabemos que los cuerpos se relacionan, que el estado de uno afecta a otros, y viceversa, pero ignoramos cómo se ha propagado la acción que existe entre ellos. No es extraño que a veces se hable de «correlaciones» y no de «interacciones»; ni que Newton, que fue quien realmente introdujo en la física este tipo de fuerzas, las repudiase desde el punto de vista filosófico.

Las acciones a distancia dominaron —con el prestigio y capacidad explicativa que adquirieron de la mano de Newton— en la física durante casi dos siglos, pero el desarrollo del electromagnetismo que se produjo durante la segunda mitad del siglo XIX, tuvo como

consecuencia que se reforzase la posición de los campos. En tanto que este concepto ha mostrado ser científicamente más productivo, no hay nada que objetar a semejante hecho. Desde el punto de vista matemático también es más dúctil, o rico: en general, las ecuaciones que describen el comportamiento de los campos son ecuaciones en derivadas parciales, más prolíficas —y también habitualmente más difíciles de resolver— que las ecuaciones diferenciales ordinarias que suelen ir asociadas con las acciones a distancia. Asimismo, se argumenta que los campos son más satisfactorios ontológicamente, que podemos visualizarlos en su papel de vehículo que transmite una interacción, algo que no ocurre con las acciones a distancia. No niego que sea cierto, pero únicamente en un sentido primario, inmediato. Si meditamos un poco más, nos daremos cuenta de que los campos tampoco explican mucho. ¿Es satisfactorio realmente pensar que el espacio está lleno de algo que en última instancia sólo podemos medir punto a punto del espacio, situando una partícula —una carga eléctrica, por ejemplo— en un lugar concreto y viendo cómo se mueve? ¿Es esto verdaderamente diferente a lo que ocurre cuando se emplea una acción a distancia, en cuyo contexto vemos también partículas, o cuerpos, que cambian de movimiento por la acción de otros? Yo creo que no. Y esto no quiere decir nada en contra del concepto de campo o de las teorías de campo en física. Únicamente quiere decir que no nos debemos hacer demasiadas ilusiones acerca de nuestra capacidad para comprender intuitivamente, de acuerdo con las categorías descriptivas que la experiencia nos sugiere, la razón de los movimientos más elementales que la física pretende describir.

L

LEIBNIZ (Gottfried Wilhelm). 1646-1716. Uno de los hombres más universales que recuerda la historia. Sus intereses se extendieron en campos tan, en principio, diferentes como la filosofía, la matemática, la física, la química, la geología, la historia, la lingüística, la política, el derecho o la teología. En un diccionario científico, Leibniz reúne todos los méritos para ser incluido, aunque sólo sea porque inventó —independientemente de Newton y empleando un formalismo mucho más poderoso que éste— el cálculo infinitesimal, instrumento sin el cual es imposible entender la historia de la física y de la matemática de los tres últimos siglos. Ni el desarrollo tecnológico.

Da idea de la ambición extrema que caracterizó la vida intelectual de Leibniz el que llegase a plantearse la posibilidad de un alfabeto básico (o *característica universal*) para el pensamiento humano. Creía, en efecto, que al igual que las palabras (representaciones de sonidos) se forman a partir de letras (representaciones de sonidos simples), las ideas complejas se crean a partir de combinaciones de un número pequeño de ideas simples. Llegó así a concebir una escritura o lenguaje universal en el que las ideas estarían representadas por combinaciones de signos que se corresponderían con las componentes de esas ideas. La gramática de este idioma sería la que regiría las combinaciones que producirían ideas complejas. Pero debía ser una gramática absolutamente fiable, que consistiese de razonamientos y demostraciones formales análogas a las que se utilizan en el cálculo aritmético o algebraico. Su *característica* —o lenguaje— *universal* debía ir más allá que idiomas como los contenidos en los jeroglíficos egipcios o la escritura china, basados en símbolos que transmitían ideas directamente al entendimiento; sería una serie de reglas que harían posible el pensamiento mediante procesos de tipo matemático. Por supuesto, su proyecto, su sueño, fracasó, pero no por ello fue menos científico. Es difícil resistirse a la fascinación que suscitan proyectos tan admirables. Aunque de la misma manera, es preciso recalcar que la ciencia no se limita a los grandes proyectos, a las grandes ideas. La ciencia tiene más de rutina, de prueba y error, de pequeños, imperceptibles con frecuencia, avances. En la vida diaria de la investigación científica, la rutina se impone normalmente a la novedad revolucionaria. Probablemente en el caso de Leibniz —cuya vida, por cierto, transcurrió al margen del mundo universitario (que no académico; se mantuvo estrechamente vinculado con academias, proponiendo incluso la creación de alguna nueva)— la ambición y grandeza de miras se vio estimulada por sus planteamientos y preocupaciones filosóficas.

Y de algo de esto quería yo hablar cuando seleccioné a Leibniz, no sólo para recordar sus indudables méritos intelectuales. Cuando se leen las cartas que intercambiaron en 1715-1716 Leibniz y Samuel Clarke (1675-1729), seguidor de Newton, uno se sorprende de la modernidad de algunos de los conceptos que, frente al espacio y tiempo absolutos newtonianos, defendía Leibniz. Nos encontramos, en efecto, con que mantenía que el espacio es «como una cosa puramente relativa, al igual que el tiempo; como un orden de coexistencias, mientras que el tiempo es un orden de sucesiones», o, todavía mejor, «el espacio no es otra cosa más que un orden de existencia de las cosas que se manifiesta en su simultaneidad». Por otra parte, frente al vacío de la física de los *Principia*, Leibniz pugnaba por el *plenum* e insistía en la necesidad de leyes de conservación, un aspecto de la física newtoniana todavía no descubierto entonces, ni, aparentemente, querido. Por último, mientras que el Dios de Newton y Clarke podía hacer cualquier cosa que deseara, el de

Leibniz tenía que obedecer ciertas reglas de juego, aunque se revistiese tal limitación con el, no demasiado convincente, argumento de que «se mantiene en Dios la facultad de elegir, puesto que se funda sobre la razón de la elección conforme a su sabiduría».

Nos encontramos, en definitiva, con que en puntos fundamentales Leibniz era el moderno, mientras que Newton era el antiguo. Pero la física del antiguo venció, como sabemos, y se impuso —con todas las razones del mundo— durante más de dos siglos, hasta que Albert Einstein desarrolló las teorías especial y general de la relatividad. De hecho, en cuanto al análisis de los fenómenos naturales, Newton no era en modo alguno un «antiguo», sino uno de los primeros científicos en un sentido plenamente moderno. Por el contrario, Leibniz llegó a sus «modernas» conclusiones y conceptos apoyándose en razonamientos típicamente filosóficos. Manejando especialmente dos conceptos que eran también dos exigencias que imponía al mundo —la identidad de los indiscernibles y el principio de razón suficiente—, Leibniz obtenía, cual prestidigitador que extrae conejos de un sombrero de copa, consecuencias que suenan familiares y agradables al intelecto de un físico teórico contemporáneo. Pero como digo, fue el método newtoniano el que, con gran rapidez, y justicia, se impuso. Para muchos —no es preciso que sean filósofos— puede ser triste reconocerlo, pero la naturaleza no tiene por qué obedecer a grandes principios generales. Nos gustaría que así fuese, acaso lo sea y lo descubramos alguna vez, pero por el momento la búsqueda de las leyes que expliquen el comportamiento de los fenómenos naturales procede según reglas en las que el rigor de la coherencia y de las matemáticas se mezcla con el oportunismo —justificado en última instancia por su eficacia— para formar sistemas teóricos con capacidad predictiva.

M

MALARIA. Podría haber elegido otra enfermedad, pero he escogido la malaria (palabra que en italiano quiere decir «malos aires»: *malo aria*) no sólo por su importancia, por el número de personas que afecta y mata cada año, sino, sobre todo, porque para mí está asociada a la idea de pobreza. Me explicaré, pero primero tengo que decir en qué consiste.

Se trata de la infección más importante en las zonas tropicales y subtropicales. La producen cuatro tipos de parásitos que pertenecen al género *plasmodium*, el más extendido, y el responsable de la mayor parte de las muertes, el *plasmodium falciparum*. Se transmite por la mordedura de una hembra infectada del mosquito anofeles, y puede pasar de una persona a otra especialmente mediante una transfusión de sangre.

Los intentos para erradicar la malaria de la Tierra han fracasado, habiendo tenido éxito únicamente en algunas islas. Semejante fracaso se debe a motivos del tipo de que, por una u otra razón (incluyendo la carencia de educación, que dificulta convencer a las personas implicadas), no se utilizan insecticidas en todas las casas, a la propia resistencia de los mosquitos a estos insecticidas, así como a la inestabilidad política, la incompetencia administrativa y las carencias de infraestructuras en los países afectados.

Todo sería más fácil, por supuesto —éste es mi punto de vista— si existiera un vacuna. Pero todavía no la hay, aunque recientemente (2005) se han producido avances en sentido, como el debido al investigador español Pedro Alonso. ¿Por qué no la hay? Siempre es difícil responder con seguridad a una pregunta como ésta, pero yo creo, o sospecho, que una razón importante es porque no existe en los «países avanzados», incluyendo a las multinacionales de la farmacia, el interés suficiente para dedicarse con energía a la tarea, que sin duda sería larga y costosa, de desarrollar una vacuna para la malaria. ¿Por qué? Pues porque la mayoría de los «clientes», de las personas afectadas por la malaria procederán de países pobres, con escaso poder económico. Son, por decirlo breve y un tanto cruelmente, malos clientes.

MANHATTAN (Proyecto). Macroproyecto científico-tecnológico que condujo a la fabricación de las primeras bombas atómicas de la historia, aquellas que se lanzaron en agosto de 1945 sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki.

Algunos, puristas de la ciencia, en una época en la que la pureza es *rara avis*, quizá piensen que este proyecto pertenece a la intendencia, a la trastienda de la ciencia, y que como tal no merece que me detenga en él. Es obvio que no comparto semejante opinión: el Proyecto Manhattan es una parte importante de la historia —a secas— contemporánea; sus consecuencias afectaron profundamente la vida sociopolítica de la segunda mitad del siglo XX (y continúan afectándonos), y no sólo al mundo de la política internacional, también han condicionado una parte importante del desarrollo de la ciencia posterior, así como de la industria nuclear dirigida a fines pacíficos [véase ENERGÍA NUCLEAR]. La ciencia, quiero insistir en este punto, no es únicamente un juego intelectual con ideas, experimentos, teorías y fórmulas matemáticas, es también un contexto social, político, institucional, histórico en definitiva, que afecta al contenido y dirección que toma la investigación científica.

El que se estableciese este proyecto tiene que ver con varios hechos: por un lado, la idea que compartían algunos científicos de varios países, de que era posible servirse de la fisión nuclear para fabricar una bomba atómica de poder escalofriante, y que podía suceder que Alemania, la Alemania de Hitler, en donde trabajaban físicos y químicos nucleares del

calibre de Werner Heisenberg (1901-1976) y Otto Hahn (1879-1968), construyese semejante arma con cierta rapidez. Este temor llevó a físicos de origen judío, que habían tenido que emigrar de Alemania, a ocuparse del tema. En Inglaterra, Rudolf Peierls (1907-1995) y Otto Frisch (1904-1979) prepararon, en 1940, un documento dividido en dos partes (*Memorandum sobre las propiedades de una «superbomba radiactiva»* y *Sobre la construcción de una «superbomba»; basada en una reacción en cadena en uranio*) que condujo al establecimiento de un programa oficial dirigido a esclarecer diversos aspectos relacionados con la fabricación de la bomba.

Hasta el ataque de Japón a Pearl Harbor, el 7 de diciembre de 1941, Gran Bretaña aventajaba a Estados Unidos en la investigación nuclear con fines militares, no importa que también al otro lado del Atlántico existiesen científicos que insistían en la necesidad de avanzar en este campo (como Leo Szilard [1898-1964], que, junto a Eugene Wigner, convenció a Einstein para que escribiese, el 2 de agosto de 1939, una, posteriormente célebre, carta al presidente Roosevelt advirtiéndole de las posibilidades bélicas de la fisión del uranio, y de que Hitler se beneficiase de ellas). La entrada de Estados Unidos en la guerra cambió radicalmente la situación. Inicialmente, la intensificación de los esfuerzos estadounidenses dirigidos a construir armas atómicas se realizó bajo cobertura civil, utilizando instalaciones universitarias. Pero en junio de 1942 el coronel James C. Marshall, del Cuerpo de Ingenieros, recibió órdenes para que formase una nueva dependencia en su Cuerpo, destinada a proseguir un trabajo especial. La dependencia, que fue creada oficialmente el 13 de agosto, se denominó «Manhattan Engineer District», ya que Marshall había instalado su cuartel general en Nueva York, en Manhattan. Se trataba, por supuesto, de lo que se vendría a conocer como, simplemente, «Proyecto Manhattan», a cuyo frente se puso el 17 de septiembre a un oficial del Cuerpo de Ingenieros, el entonces coronel (en seguida general) Leslie R. Groves, cuyo nombre quedaría unido permanentemente al proyecto atómico norteamericano.

La asignación del Proyecto Manhattan al Cuerpo de Ingenieros del Ejército fue oportuna, ya que se trataba de un programa de investigación y desarrollo que aunque contenía una indudable dimensión científica, era eminentemente tecnológico. Sin la poderosa industria estadounidense no habría sido posible llevarlo a buen puerto. Para desarrollar métodos de separación de los isótopos U-235 del muchísimo más abundante U-238 se construyó, con la participación de la Stone and Webster Engineering Corporation y de Du Pont, una planta en Oak Ridge, Tennessee, conocida como Clinton Engineering Works. Empezó a funcionar el 4 de noviembre de 1943. Para producir —utilizando reactores nucleares que empleaban U-238 como combustible— plutonio (otro elemento del que se esperaba podía fisiónar) a gran escala se edificó otra sobre el río Columbia, en Hanford, en el estado de Washington; de forma análoga al caso de Clinton, fue conocida como Hanford Engineer Works. La Westinghouse Electric and Manufacturing Co. se ocupaba de la producción de uranio metálico, y la Mellinckrodt Chemical Works de St. Louis, ayudada por el National Bureau of Standards, de preparar óxido de uranio. De la producción de grafito de gran pureza (a utilizar como moderador para obtener neutrones lentos) se encargaban la National Carbon Co. y la Speer Carbon Co. También hubo que investigar sobre problemas de corrosión, refrigeración, blindaje, protección, o las consecuencias biomédicas, cuestiones estas en las que participaron numerosas empresas (Chrysler, Eastman Kodak, Allis-Chalmers, General Electric, General Motors, Kellogg) y universidades.

Además, estaba el Laboratorio Metalúrgico de Chicago, en cuyo reactor,

supervisado por Enrico Fermi (1901-1954) y que contenía casi cuatrocientas toneladas de grafito, seis toneladas de uranio metálico y 58 toneladas de óxido de uranio, tuvo lugar la primera reacción en cadena automantenida de la historia, el 2 de diciembre de 1942. También el Radiation Laboratory de Ernest Lawrence en Berkeley, en cuyos grandes sincrotrones se separaban, electromagnéticamente, los isótopos de uranio, y se fabricaban muestras de plutonio. En los estudios de reacciones con neutrones rápidos dirigidos por Gregory Breit (1899-1981) participaron investigadores del Instituto Carnegie de Washington, National Bureau of Standards, Rice Institute, y de las universidades de Cornell, Purdue, Chicago, Minnesota, Wisconsin, California, Stanford e Indiana.

Asombra, asimismo, la decisión e iniciativas con que se dirigió el proyecto. En casi todos los puntos era más lo que se desconocía que lo que se sabía. Además, había que proceder en muchos aspectos antes de disponer de elementos imprescindibles (las bombas se lanzaron casi inmediatamente después de poseer el uranio y plutonio necesarios). Para minimizar los riesgos se seguían vías alternativas. Gracias a este procedimiento se pudieron solventar momentos críticos. Como cuando, en la primavera de 1944, un pequeño grupo de Los Álamos, dirigido por Emilio Segré (1905-1989), descubrió, con las primeras muestras de plutonio-239 recibidas, que este isótopo se fisiónaba de manera espontánea, de tal forma que el procedimiento diseñado para conseguir la masa crítica (lanzar, utilizando explosivos, dos masas de plutonio —o de uranio— una contra otra) era excesivamente lento. Antes de que las dos masas se juntaran, la fisión espontánea habría hecho estallar la bomba de plutonio. Afortunadamente, esta posibilidad se había considerado, aunque con timidez. No hubo que comenzar desde cero, y se pudo, dentro de los límites de tiempo manejados, desarrollar un nuevo método, más rápido, de llegar a la masa crítica: el de implosión. La prueba —denominada *Trinity*— que se llevó a cabo en las primeras horas de la mañana del 16 de julio de 1945, en las desiertas tierras de la Jornada del Muerto, cerca de Alamogordo, en Nuevo México, fue, precisamente, de la bomba de plutonio, para comprobar si la nueva «espoleta» funcionaba satisfactoriamente. La bomba de uranio (con su «espoleta de choque») era mucho más segura, y no se creyó necesario probarla. Hiroshima fue la prueba.

Es importante señalar que con la asignación del Proyecto Manhattan al Cuerpo de Ingenieros se estaba dando un paso, cuyas consecuencias —no apreciadas realmente en aquel momento— marcarían el desarrollo de la ciencia de la posguerra y, más indirectamente, la historia sociopolítica mundial posterior. Expresado brevemente: la sociedad civil estaba cediendo la soberanía de la ciencia a las Fuerzas Armadas. Es cierto que en principio tal cesión se suponía temporal, mientras las condiciones excepcionales de la contienda se mantuviesen, pero a la postre los militares percibieron con toda claridad que la ciencia (especialmente las ciencias físicas, y dentro de ellas la electrónica) de mediados de siglo contenía unas potencialidades que la hacían absolutamente imprescindible para el desarrollo de su misión: estar preparados en las mejores condiciones posibles para la guerra. Una guerra, además, que caso de tener lugar probablemente se desarrollaría en, o partiría de (caso de ataques soviéticos con misiles de cabezas nucleares), escenarios lo suficientemente alejados del territorio de Estados Unidos como para que fuese necesario poseer los medios electrónicos y de transporte adecuados para salvar semejantes distancias. En consecuencia, aquella cesión terminó siendo más permanente de lo que se había supuesto.

Una pregunta importante es si Estados Unidos estaba completamente decidido a utilizar las bombas atómicas. «Cuando comenzamos a desarrollar la energía atómica —escribió Groves en sus memorias—, Estados Unidos no estaba en absoluto decidido a

emplear armas atómicas contra ningún otro poder. Sin embargo, con la activación del Proyecto Manhattan la situación empezó a cambiar. Nuestro trabajo fue extremadamente costoso, tanto en dinero [dos mil millones de dólares] como en interferencias con el resto del esfuerzo bélico. Según pasaba el tiempo, al ir invirtiendo más y más dinero y esfuerzos en el proyecto, el gobierno se convenció cada vez más de que era necesario utilizar la bomba [...] Como lo expresó sucintamente *Mr. Stimson* [Secretario de Estado], el Proyecto Manhattan existía “para llevar la guerra a un final feliz más rápidamente de lo que se podría con otros medios y así salvar vidas americanas”».

Este argumento, el de salvar vidas de soldados estadounidenses, ha sido empleado con profusión tradicionalmente por el lado norteamericano para justificar el que Truman ordenase lanzar las bombas. Según esta historia, los dirigentes de Estados Unidos manejaban la cifra de medio millón de vidas salvadas. La apertura de archivos parece indicar, sin embargo, que los cálculos militares daban ya entonces la cifra de cincuenta mil.

Estaba también el temor a los soviéticos, hasta el punto que se ha llegado a afirmar que las bombas atómicas se lanzaron más contra la Unión Soviética que contra Japón. Un problema importante era que en la conferencia de Yalta (febrero de 1945), Roosevelt y Churchill, deseosos de obtener la ayuda soviética contra Japón, habían cedido ante las demandas de Stalin, que se comprometió a entrar en la guerra entre dos y tres meses después de la derrota de Alemania. La disponibilidad de la bomba, y la creciente percepción del «peligro rojo», modificaba radicalmente la situación. Ahora Estados Unidos veía la posibilidad de que la guerra terminara antes de que la Unión Soviética entrara en la contienda, con lo que habría argumentos para negar a Stalin lo prometido en Yalta. Era, por consiguiente, urgente lanzar las bombas atómicas. Otra urgencia, por motivos completamente diferentes, surgía en los soviéticos. De hecho, Stalin firmó el 7 de agosto, el día después de Hiroshima, la orden para que el Ejército Rojo atacase a las fuerzas japonesas en Manchuria el día 9.

Fuese por una u otra razón, el hecho innegable es que el 6 de agosto un bombardero B-29 estadounidense —el famoso *Enola Gay*— despegaba de la isla de Tinian con una carga mortífera, que lanzó sobre Hiroshima a las 8.15, hora local. Se trataba de *Little boy*, una bomba atómica de uranio, de unos cuatro mil quinientos kilogramos de peso y unas trece mil toneladas de TNT de potencia. Su efecto fue terrible. Virtualmente todo en un radio de quinientos metros de la explosión fue incinerado. Los edificios situados hasta tres kilómetros de distancia, destruidos. Un espeso hongo de humo ascendió hasta doce kilómetros de altura. A fines de año se estimaba el número de víctimas en 145 000 personas. Muchos otros llevaban, en forma de radiación, la muerte en su seno [véase también MUTACIÓN]. Cinco años más tarde, los muertos sumaban doscientos mil.

Tres días más tarde (11.02 hora local) le tocaba el turno a una bomba de plutonio: *Fat man*. Pesaba algo más que *Little boy*, unos cinco mil kilos, pero tenía la misma potencia. Su objetivo fue Nagasaki. Las víctimas fueron setenta mil, menos que en Hiroshima debido a errores en el lanzamiento.

Son tantas las reflexiones que surgen tras un somero repaso a este histórico proyecto, que seleccionar alguna tiene algo de arbitrario. Para los propósitos del presente diccionario, para lo que yo deseo destacar del funcionamiento e implicaciones de la ciencia, en especial de la ciencia contemporánea, algunas son, sin embargo, particularmente relevantes. Además del argumento de «salvar vidas» (de soldados norteamericanos, por supuesto), el elevado coste económico del proyecto fue, como sugieren las declaraciones de Groves, una razón esgrimida a la hora de decidir lanzar las bombas atómicas sobre Japón.

Es difícil —y no es en modo alguno sorprendente que lo sea— no plasmar en realidad los instrumentos que ponen a nuestra disposición los resultados de un proyecto científico, más aún si éste ha exigido importantes recursos económicos. Salvo raras excepciones, los científicos no tienen control sobre los productos de sus investigaciones; son únicamente empleados de élite, con algunos privilegios y prestigio social, pero empleados al fin y al cabo. Y es natural que así sea. Es la sociedad —es decir, todos nosotros— la que debe decidir qué desea hacer con esos productos. Otra cosa es que, como ocurrió en el proyecto Manhattan, se introduzca otro filtro, otro elemento —el poder militar y la cúpula del poder político— que hurte a la sociedad democrática, expresada en su Parlamento, la decisión, el control siquiera, de decisiones de tan amplias consecuencias como la utilización de armamento nuclear.

MATEMÁTICA. Cuando la gente normal habla de la matemática suele referirse a ella como, sobre todo, algo difícil y aburrido. «¡Pobres niños nuestros —piensan muchos—, sometidos en la escuela a la tortura de la enseñanza matemática!».

No niego que la matemática —como la física, la biología, la economía, la arquitectura y tantas otras disciplinas— puede ser difícil; muy difícil, de hecho. Pero, desde luego, la inmensa mayoría de esos padres y madres que tanto parecen preocuparse por la salud emocional de sus hijos, o todos los que, voluntaria o involuntariamente, colaboran en transmitir la creencia popular de la complicación de la matemática, no tienen idea de la dificultad a la que me refería antes; para llegar a vislumbrarla hace falta estudiar mucho, ser un matemático.

No quiero, de ninguna manera, ayudar con este diccionario a alejar a nadie de la matemática. Todo lo contrario. Algunas de las mejores horas intelectuales de mi vida las he pasado —y no soy un matemático— manejando técnicas matemáticas (por ejemplo, la geometría diferencial necesaria para la teoría de la relatividad general), aprendiendo demostraciones de teoremas y proposiciones, o entendiendo la razón de ser de ciertas definiciones y conceptos. Hace falta tener el corazón —de la mente— muy duro para no captar la hermosura que se encuentra en la lógica de algo tan básico como es el cálculo diferencial.

Y no se trata sólo de hermosura, un concepto, al fin y al cabo, muy subjetivo. Al menos hasta que se llega a un cierto nivel, los procedimientos y resultados matemáticos poseen tal seguridad, claridad (cuando se comprenden, por supuesto) e inevitabilidad —dentro de su estructura interna, de los axiomas sobre los que se construyen— que dan reposo intelectual a aquellos que pueden acceder a ellos. Precisamente por esa firmeza se argumentó durante mucho tiempo que la matemática no es realmente una ciencia, no al menos como lo son la química, la fisiología, la geología o la física. Mientras éstas serían sistemas de proposiciones *a posteriori*, falibles, la matemática sería *a priori*, tautológica e infalible. Aunque como veremos en seguida, se pueden utilizar citas suyas que apuntan en direcciones bastante diferentes, la frase de John Stuart Mill (1806-1873), «la lógica no observa, ni inventa, ni descubre, pero juzga» (*A System of Logic Ratiocinative and Inductive*, 1843), expresa de manera espléndida ese lugar tan peculiar que ocupa la matemática con respecto a las ciencias de la naturaleza.

Ésta fue, repito, la visión canónica de la naturaleza de la matemática que reinó hasta el primer cuarto del siglo XX. El cambio que se produjo después fue consecuencia de una serie de investigaciones que se habían iniciado en las últimas décadas del siglo anterior.

En su constante caminar desde la antigüedad clásica —pocas disciplinas científicas existen que puedan presumir de una historia tan dilatada—, la matemática llegó entonces a

plantearse en qué medida la rica estructura que había surgido de milenios de investigaciones podía reducirse a unos mínimos absolutos existe un esqueleto, un núcleo básico de la matemática. Se planteó, en definitiva, el problema de los fundamentos de la matemática.

Sería una temeridad pretender siquiera explicar aquí todos los progresos que se hicieron y los problemas que surgieron al intentar desarrollar aquel programa. Baste con apuntar que fueron tres los principales enfoques que se plantearon: formalismo (David Hilbert [1862-1943]), intuicionismo (Luitzen Brouwer [1881-1966]) y logicismo (Bertrand Russell [1875-1970]). Este último, en el que se pretendía reducir la matemática a la lógica, era, desde el punto de vista de la herencia filosófica y matemática previa, acaso el más natural.

Desgraciadamente, ni siquiera en el reino de la matemática se cumplen pretensiones tan aparentemente racionales. El logicismo llegó a su clímax con la publicación de una obra monumental: *Principia Mathematica* (1910-1913), fruto de los esfuerzos de Bertrand Russell, uno de los gigantes del siglo XX, y Alfred North Whitehead (1861-1947). Pero a pesar de los logros innegables alcanzados en este tratado, a la postre no logró conseguir su meta. El propio Russell comenzó, algunos años más tarde, a dar señales de que su fe reduccionista disminuía. Él, que tan apasionadamente había defendido la visión logicista y apriorística de la matemática, pasó a sostener la tesis opuesta, empirista, según la cual la matemática no era diferente a, por ejemplo, las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo: «Ambas —escribió en 1924— se aceptan debido a que se observa que algunas de sus consecuencias lógicas son ciertas» (antes que Russell, Mill se sumergió también en estas turbulentas aguas, aunque sus ideas, como sugería hace un instante, están sujetas a diferentes interpretaciones; en su libro, *An Examination of Sir William Hamilton's Philosophy*, dijo que la lógica «no es una ciencia distinta de [...] la psicología. En tanto que es una ciencia, es una parte, o rama, de la psicología»). No es la afirmación russelliana totalmente incompatible con el programa logicista, pero da que pensar. Y desde luego muestra que la visión apriorista de la que hablaba antes dejó de ser aceptada universalmente entre los matemáticos. Todavía hoy se encuentran las opiniones divididas en este punto.

El golpe de gracia para la matemática como sistema inductivo-empírico o apriorístico, para el programa logicista al igual que para el formalista (que insistía en la necesidad de axiomatizar la lógica, en un sistema formal no contradictorio), vino de la mano de un lógico nacido en Brünn, Moravia, que murió, envuelto en las grises y amargas nieblas de la demencia, al otro lado del Atlántico, en Princeton, cuyo Institute for Advanced Study lo había acogido en 1939: Kurt Gödel (1906-1978).

En 1931 se publicó el artículo más famoso de Gödel y quizá de toda la historia de la lógica: «Sobre sentencias formalmente indecidibles de *Principia Mathematica* y sistemas afines». En él Gödel demostraba, en primer lugar, que todos los sistemas formales de la matemática clásica son incompletos, es decir, que para cada uno de ellos puede construirse una sentencia indecidible (tal que ni ella ni su negación es deducible). Además, esta incompletitud es inevitable. Por muchos axiomas que añadamos, los sistemas formales siguen siendo incompletos. En segundo lugar, demostró que es imposible probar la consistencia de un sistema formal de la matemática clásica. En otras palabras, no es posible lograr un reduccionismo completo en los sistemas matemáticos ya que existen sentencias de las que no podemos saber si son o no ciertas, y sistemas cuya consistencia no es posible demostrar.

Los resultados de Gödel producen, a mí al menos, y al margen de una gran

admiración por la creatividad de su autor, una profunda sensación de desamparo. Ya ni siquiera es posible encontrar seguridad en el único lugar donde creíamos que existía, en la matemática. Claro que tal vez ese mismo resultado se pueda interpretar como algo que humaniza a esta disciplina secular, que nos permite dejar abierta la puerta para justificar la incertidumbre y el compromiso ante la imposibilidad de encontrar una respuesta incontrovertible. Con su artículo Gödel nos ayuda, indirectamente, a ver la realidad de manera menos dogmática, más abierta a las razones de «los otros».

Claro que en este plural mundo nuestro es posible leer las mismas palabras dándoles significados bastante diferentes. Roger Penrose piensa que a pesar de todo existen enunciados que podemos «ver» que son ciertos, aunque como consecuencia de los resultados obtenidos por Gödel no podamos asignarles la categoría de «verdaderos». Y de ahí concluye, platónicamente: «La noción de verdad matemática va más allá del concepto global de formalismo. Hay algo absoluto e “infuso” en la verdad matemática... [que] va más allá de las simples construcciones humanas». (Me recuerdan estas palabras a otras que escribió Arthur Schopenhauer (1788-1860) en uno de sus manuscritos berlineses: «Cada cual sólo conoce de verdad aquello que ha captado *intuitivamente*, lo que sabe *in abstracto* supone una simple asignación al *saldo* de su conocimiento intuitivo»). Y de ahí pasaba Penrose a negar la posibilidad de la inteligencia artificial.

A estas alturas, más de uno de mis lectores se habrá hecho la pregunta de por qué estoy dando tantos rodeos y no comencé definiendo qué es la matemática. Los entiendo, pero el problema es que esta pregunta, si se formula seriamente, no tiene respuesta; quiero decir que no tiene ninguna respuesta satisfactoria. Sólo pueden pretenderse contestaciones y observaciones parciales. No digo que nadie se haya atrevido a definir la matemática, únicamente que ninguna definición ha resultado satisfactoria. Aquel que desee conocer una de esas definiciones puede consultar la que abre el libro de Bertrand Russell sobre *Los principios de la matemática* (1903). Ahí verá que la cosa no es nada fácil.

No les puedo ofrecer, por consiguiente, una definición de lo que es la matemática. Pero quédense con la idea de que aunque tendemos a pensar en ella como una serie de técnicas para manipular símbolos y realizar cálculos, semejante visión es errónea. Símbolos y cálculos son instrumentos. La matemática trata de ideas, y de cómo éstas se relacionan entre sí. La pregunta que se hace un matemático es: si poseo cierta información, ¿qué se sigue de ella?

MATERIA OSCURA. Parecía que lo sabíamos si no todo sobre los elementos que constituyen el universo, sí bastante, y ahora resulta que parece que sabemos muy, pero que muy poco. Me estoy refiriendo al problema de la materia (y energía) oscura del universo. Resulta, en efecto, que analizando movimientos estelares gravitacionales los astrofísicos han concluido en los últimos años que debe existir en el universo mucha más materia de la que podemos detectar con los métodos físicos tradicionales. A esta materia necesaria para producir los movimientos observados de estrellas y galaxias se la denomina «materia oscura», y nadie sabe de qué puede estar hecha, únicamente se detecta por el efecto gravitacional que produce. Pero incluso sin determinar su composición, analizando cuidadosamente sus efectos gravitatorios, los científicos han sido capaces de determinar con gran precisión cuánta materia oscura existe en el universo, y han concluido que un 25 por ciento de toda la materia que existe en el universo.

Seguro que si usted, amigo lector, no sabía hasta ahora nada de esta cuestión, concluirá: bien, se necesita explicar qué es el 25 por ciento de la materia que hay en el cosmos, un problema considerable. Pues no, es mucho peor, porque resulta que la materia

«visible» clásica es únicamente el 5 por ciento del total que existe en el universo. Entonces, se preguntará usted, no me cuadran las cuentas: falta un 70 por ciento. Tiene usted razón, y a ese 70 por ciento restante, que se detecta por el hecho (descubierto en 1998) de que el universo se está expandiendo ahora con mayor rapidez de la que debiera en base a un contenido clásico, se le asocia a una «energía oscura», cuya naturaleza tampoco conocemos. (Recuerde, si tiene algún problema con pasar de energías a masas, la ecuación einsteniana: $E=mc^2$).

Es maravilloso. Ignoramos mucho más de lo creíamos, pero esto significa que aún hay mucho que descubrir. Nos esperan tiempos felices, en los que nos sorprenderemos con resultados nuevos. ¡Dichosos aquellos que puedan asistir a semejante espectáculo!

MAXWELL (James Clerk). 1831-1879. Tengo un amigo, uno de los mejores poetas españoles de su generación, que en cierta ocasión, cuando le dije que estaba preparando una edición de escritos de Maxwell, me comentó: «¿Maxwell?, ¿quién fue Maxwell?». Un poco sorprendido, le contesté: «Es como si me estuvieses hablando de Homero, y yo te dijese: ¿Homero?, ¿quién fue Homero?». Desde aquel día me he dado cuenta de que hay muchas personas, acaso la mayoría, de entre aquellas que no han recibido una formación científica, que no saben quién fue Maxwell, al que yo considero tercero, junto a Michael Faraday, tras Newton y Einstein, en una hipotética y siempre personal escala de grandes de la física.

Pero también me he dado cuenta de otras cosas. Ahora pienso, por ejemplo, que no tiene sentido comparar a Homero con Maxwell, la literatura con la ciencia. Refiriéndose al carácter «permanente» de la matemática, aunque utilizando como ejemplo a alguien al que yo considero sobre todo un físico, el matemático inglés Godfrey Hardy (1877-1947) escribió que Arquímedes sería «recordado cuando Esquilo haya sido olvidado, porque los idiomas mueren pero las ideas matemáticas no. “Inmortalidad” puede ser una palabra estúpida, pero probablemente un matemático tiene la mejor oportunidad de serlo, cualquiera que sea su significado».

En más de un sentido, indudablemente la matemática y, aunque de forma diferente, la física, o la química, y otras ciencias de la naturaleza, son más permanentes, más «inmortales» que la literatura, pero ¿a quién le importa la inmortalidad, lo permanente? Si algo nos enseña la ciencia es la mutabilidad y la más que probable finitud de nuestra existencia como especie, si, en el mejor de los casos, no hemos encontrado mecanismos para escapar antes a otros sistemas planetarios bien alejados del nuestro, cuando el Sol se apague o estalle. La literatura —la buena, naturalmente— es, para la mayoría de las personas, más próxima porque nos habla de nosotros mismos, de nuestras pasiones, de nuestras alegrías y miserias, de nuestros tedios y de nuestras ilusiones. Las obras literarias nos hacen, durante algunos momentos, más felices o más desgraciados, más perspicaces, más profundamente humanos. Yo no sé, naturalmente, si dentro de algunas décadas, cientos o miles de años nuestra especie habrá olvidado —en el supuesto de que continúe existiendo— a Homero, o a Esquilo, o a Thomas Mann, Cervantes o Elias Canetti, mientras que sí recordará a Maxwell, a Newton, Darwin y a Einstein. Pero no importa aunque así sea. De lo que se trata es de comprender por qué Homero es un nombre más familiar que el de Maxwell. Más familiar, que no más importante. No quiero un mundo que ignore a Maxwell, pero menos deseo uno en el que Homero o Cervantes no tengan cabida. La ciencia nos hace más sabios, y, en consecuencia mejores, pero no siempre, o no necesariamente, más humanos. Yo defiendo el valor del conocimiento científico, y éste es uno de los motivos por los que escribo el presente diccionario, pero no quiero hacerlo

estableciendo jerarquías, admitiendo separaciones artificiales como esa que habla de «dos culturas».

Comprendo, por tanto, a quien conoce a Homero pero no a Maxwell, aunque me rebelo ante semejante ignorancia, fruto no sólo de ese diferente grado de proximidad del que hablaba, sino de la falta de educación que en materias científicas todavía caracteriza a nuestro mundo.

Y no se me olvida decirles quién fue James Clerk Maxwell. Fue escocés, pero no por ello renunció a adquirir su educación científica superior en la Universidad de Cambridge, como hacía cualquier inglés, galés, irlandés o escocés de su época con pretensiones científicas (¡y sociales!). Ocupó cátedras universitarias en Aberdeen, Londres y Cambridge, de cuyo Laboratorio Cavendish —en donde con el tiempo se realizarían descubrimientos tan notables como el electrón, entendido como la primera partícula elemental universal conocida, o la estructura del ADN— fue director. Sus contribuciones más destacadas tuvieron lugar en el dominio de la teoría cinética de los gases (lo que es casi tanto como decir en la física estadística) y el electromagnetismo. En este último campo logró —uno de los momentos supremos de la historia de la física— sintetizar en una teoría la dinámica de los fenómenos eléctricos y magnéticos y dar sustancia matemática al concepto de campo (electromagnético) que había introducido Faraday, un concepto que, como ya he explicado, no ha abandonado a la física desde entonces. El electromagnetismo maxwelliano no sólo unificó el tratamiento teórico de la electricidad y el magnetismo, sino que, además, resultó que los fenómenos ópticos no son sino movimientos electromagnéticos, con lo que la óptica está contenida en las ecuaciones de la teoría de Maxwell. La reunión fue, de esta manera, triple: electricidad, magnetismo y óptica. Basándose en la electrodinámica maxwelliana, Heinrich Hertz demostró en 1888 la existencia de las ondas electromagnéticas, sin las cuales la denominada «Galaxia Marconi», es decir, el universo de señales e informaciones electrónicas que ha configurado nuestras sociedades y vidas no habría sido posible. Por consiguiente, y aunque usted no lo supiese, Maxwell ha sido y es importante en su vida.

MECÁNICA CUÁNTICA. Teoría de la física, que junto a la relatividad einsteniana y el descubrimiento de la estructura del ADN, ha constituido una de las aportaciones a la ciencia contemporánea más auténticamente revolucionarias. Aunque sus orígenes se remontan, cuando menos, a la última década del siglo XIX, con descubrimientos como la radiactividad y los análisis de la radiación de un cuerpo negro (cuerpo que absorbe todo tipo de radiaciones), que condujeron a que, en 1900, Max Planck introdujera la primera cuantificación de la energía, en la que profundizaría Albert Einstein en 1905, y que Niels Bohr incorporó al modelo atómico de Rutherford en 1913, la primera teoría satisfactoria de la dinámica de los fenómenos microscópicos, sujetos a las restricciones cuánticas, la mecánica cuántica no relativista, fue desarrollada por Werner Heisenberg en 1925. Su teoría, muy abstracta desde el punto de vista matemático y conceptual (se vino en denominar «mecánica matricial»), encontró en 1926 otra formulación, en algunos aspectos mucho más intuitiva y que terminó siendo utilizada habitualmente: la mecánica ondulatoria, propuesta por Erwin Schrödinger.

La mecánica cuántica ocupa un lugar singular en la historia del pensamiento científico. Desde el punto de vista de la física, es un axioma generalmente aceptado que, no importa qué fenómeno estemos considerando, ninguna descripción de él será satisfactoria si no recoge entre sus fundamentos las prescripciones básicas de la física cuántica. De hecho, uno de los principales problemas de la física contemporánea es la incapacidad de «hacer

cuántica», de *cuantizar*, la teoría de la relatividad general, que, como se explica en otra entrada de este diccionario [véase RELATIVIDAD], describe una de las cuatro interacciones físicas conocidas: la gravitacional. Para las otras tres (fuerte, débil y electromagnética) existen formulaciones plenamente cuánticas.

Por otro lado, la mecánica cuántica ha obligado a modificar radicalmente algunas de nuestras nociones epistemológicas más básicas; como la causalidad y la capacidad de conocer al mismo tiempo, con precisión cada vez mayor, algunas de las variables que utilizamos para describir fenómenos físicos [véase PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE]. Una parte importante de la filosofía de la ciencia de nuestro siglo no ha tenido otro objetivo que tratar de familiarizarnos conceptual, filosóficamente, con semejantes novedades.

Uno de los elementos centrales de la mecánica cuántica, en su forma más básica, es la «función de onda», el ente matemático (una función definida en el conjunto de los números complejos) que describe el comportamiento de los objetos sometidos a la ecuación de Schrödinger. Al contrario que en prácticamente todos los demás casos de la física teórica, como la mecánica newtoniana, en donde el papel de la función de onda lo desempeñan entes matemáticos como, por ejemplo, la posición, que nos dice dónde está una partícula en un instante determinado pero arbitrario, la función de onda no tiene este grado de precisión. Se descompone la suma de una serie de elementos (autofunciones), que representan situaciones experimentales posibles, y las ecuaciones de la mecánica cuántica lo que nos dicen es la probabilidad de que el resultado de una observación determinada nos dé un resultado u otro. O expresado de otra manera: el mundo cuántico es, cuando no es observado, algo así como la mezcla de todas las situaciones potencialmente posibles. La función de onda resume y expresa matemáticamente tal situación, y lo que sucede es que cuando realizamos una observación se produce lo que se denomina un «colapso de la función de onda», en el que la naturaleza elige una de las diferentes posibilidades. Y no es posible, nos dice la mecánica cuántica —e insistió firmemente uno de sus representantes más destacados, Bohr—, evitar esta incertidumbre; es una limitación intrínseca del conocimiento científico, y sólo podemos predecir probabilidades.

Por último, descubrimientos que se han realizado dentro del contexto de la física cuántica han servido, como explico en otras entradas, para, literalmente, cambiar nuestro mundo, industrial, política y culturalmente. Existen, en suma, motivos más que suficientes para afirmar que la física cuántica es una de las construcciones científicas más importantes e influyentes de todos los tiempos.

[Véase MUCHOS MUNDOS, TEORÍA DE LOS].

MILITARIZACIÓN DE LA CIENCIA. Fenómeno que afectó a la dirección, prioridades y procedimientos adoptados en la investigación científica durante y después de la segunda guerra mundial.

Cuando se repasa la historia de la ciencia no es difícil encontrar ejemplos de científicos que pusieron sus habilidades a disposición de los ejércitos. Sin embargo, en ningún momento se produjo una situación comparable a la que se originó a raíz de la segunda guerra mundial; ni siquiera durante la primera guerra mundial, a la que a veces se ha denominado la «guerra de la química», en alusión al empleo de gases contra los soldados enemigos. En efecto, el éxito de la intervención de la ciencia en la durante algún tiempo denominada Gran Guerra fue más que limitado, y no modificó, una vez finalizada la contienda, sustancialmente la relación que habían mantenido con anterioridad científicos y militares.

Por el contrario, entre 1939 y 1945 esas mismas relaciones se estrecharon

enormemente. En especial en el caso de Estados Unidos (también en Gran Bretaña), donde los dos grandes proyectos científico-tecnológicos de la guerra, el del radar y el Manhattan, llevaron al Departamento de Defensa a involucrarse e intervenir en las actividades de la ciencia (de la física, especialmente), hasta entonces de carácter predominantemente civil. Los departamentos científicos de las universidades norteamericanas recibieron generosos contratos, como consecuencia de los cuales experimentaron un crecimiento inusitado. Detrás de aquellos esfuerzos estaba, naturalmente, un aumento sin precedentes del dinero destinado a la investigación científica y tecnológica: el presupuesto para investigación y desarrollo (I + D) federal pasó de 74 millones de dólares en 1940 a 1590 millones en 1945. Cuando llegó la victoria militar, mantener una vinculación con las Fuerzas Armadas era para muchos de aquellos departamentos universitarios casi una cuestión de supervivencia, y, por consiguiente, se esforzaron por mantener tales relaciones.

Si los científicos vieron con claridad algunas de las ventajas que se derivaban de una vinculación con los militares, éstos por su parte no dejaron de percibir cómo cambiaba su profesión con las posibilidades que ofrecía la ciencia y la tecnología. La seguridad nacional dependería en el futuro de la superioridad tecnológica, más aún teniendo en cuenta que el escenario de operaciones militares que manejaba Estados Unidos cubría no sólo su propio territorio, sino también Europa, al igual que, en menor grado, otros continentes. Y la superioridad tecnológica necesitaba de ambiciosos y bien dotados programas de investigación, dirigidos por científicos competentes.

Incluso antes de la rendición de Japón comenzaron las iniciativas para establecer vínculos estables entre Fuerzas Armadas y ciencia. En mayo de 1945, la Marina fundó una Oficina de Investigación Naval cuyo propósito era crear un grupo de personal científico capacitado, que fuese mayor y que estuviese más adecuadamente preparado que el que existía antes de la guerra. Coherente con sus intenciones, la organización apoyó generosamente investigaciones que en física iban desde radioastronomía hasta criogenia, pasando por espectroscopia de microondas, física del estado sólido, de altas energías o nuclear. En 1949, apoyaba 1200 proyectos, que involucraban a 200 instituciones, 3000 científicos y 2500 estudiantes graduados. Para darse cuenta de lo que todo esto significaba sólo hay que recordar que a finales de la década de 1930 el presupuesto anual total de los departamentos de física de todas las universidades de Estados Unidos era (no incluyendo salarios) de 750 000 dólares.

A esta agencia naval le siguieron otras organizaciones, como la Atomic Energy Commission (1946), la National Science Foundation (1950) o la National Aeronautics and Space Administration (1958), más conocida por sus siglas: NASA. De todas estas agencias, la única de carácter netamente civil fue la National Science Foundation, cuyo establecimiento respondió a la idea, defendida por algunos científicos al finalizar la guerra, de que no sería bueno para la ciencia depender demasiado de los militares. Sin embargo, poco después de su establecimiento tuvo lugar un acontecimiento que frenó considerablemente aquel inicio de cambio de dirección en la política científica federal. En junio de 1950 comenzaba la guerra de Corea.

Con el estallido de la guerra de Corea, y, en general, el inicio de la guerra fría, el presupuesto del Departamento de Defensa para I + D creció extraordinariamente. No hay que olvidar, además, que poco antes, en septiembre de 1949, se había detectado la explosión de la primera bomba atómica soviética. Y no sólo es que hubiera más dinero para la investigación, sino que también el clima que produjeron tales acontecimientos hizo que desapareciesen algunas resistencias a colaborar con las Fuerzas Armadas.

Lo que los militares estadounidenses pretendían era controlar una parte sustancial del potencial científico de la nación; mantener de una manera equilibrada, y no demasiado llamativa, una red de instalaciones y personal, científico y técnico, que sirviesen a los fines militares, fines que no necesariamente pasaban por involucrar a esos profesionales en investigaciones claramente bélicas, aunque también se hiciese esto, por supuesto. No cayeron en el error de creer que sólo debían financiar investigaciones encaminadas directamente a producir nuevos armamentos: reconocieron que era necesario mantener de manera permanente relaciones con el mundo académico, ya que si no, se corría el riesgo de perder todo lo que laboriosamente se había conseguido durante la guerra, y que para ello hacía falta una política científica compleja y refinada, que no los alienase de los profesionales de la ciencia. Los laboratorios de física de altas energías, con sus grandes aceleradores de partículas, de Berkeley y Brookhaven, que financiaban con largueza, les permitían, en este sentido, y además de las obvias vinculaciones con la «superbomba» (la bomba —de fusión— de hidrógeno, mucho más potente que las de uranio y plutonio), sostener complejos equipos de científicos, ingenieros y técnicos, trabajando en problemas que involucraban física nuclear, electrónica, ciencia de los materiales, matemática aplicada y ordenadores, equipos que podrían, si fuese necesario, lanzarse instantáneamente a nuevos proyectos eminentemente bélicos. No hubo, por consiguiente, ni ingenuidad ni improvisación en el apoyo que las Fuerzas Armadas norteamericanas prestaron a partir de 1945 a la ciencia.

Las ciencias del espacio, por ejemplo, se beneficiaron enormemente de la colaboración con los militares. Con los misiles V-2 capturados a los alemanes se llevaron a cabo, entre 1946 y 1956, importantes investigaciones en rayos cósmicos, meteorología y física de la ionosfera y solar. Evidentemente, tales investigaciones formaban parte de un conjunto en el que no faltaban aspectos más aplicados como propagación de ondas de radio en la ionosfera, reconocimiento aéreo, dinámica de vuelo o control de misiles, pero el hecho es que la física y un buen número de ramas de la ingeniería avanzaron notablemente con dicha asociación.

Puede resultar duro de aceptar, especialmente para el acomodaticio y complaciente ego de los científicos, pero los estudios históricos y sociológicos muestran que apartados importantes del desarrollo científico (desde luego de la física, la más «aplicable» de las ciencias) estadounidense a partir de 1945, y hasta la actualidad, han seguido líneas directrices sólo parcialmente controladas por los propios científicos, por la dinámica interna de la propia ciencia, habiendo intervenido de forma destacada políticos y militares. A partir de 1945 se produjo, en resumen, una militarización de, si no toda, una parte significativa de la ciencia. El talento científico no ha tenido demasiados problemas en dejarse conducir a aquellos campos en los que las prioridades nacionales pusieron dinero, prestigio y la excitación implícita en programas de investigación que plantean cuestiones que se quieren resolver urgentemente. Hasta qué punto esto ha sido así, se puede apreciar con el caso de Norbert Wiener (1894-1964), uno de los más críticos con la colaboración «ciencia-Fuerzas Armadas». Profesor del Massachusetts Institute of Technology, una institución el ochenta por ciento de cuya investigación es financiada por distintas agencias del Departamento de Defensa, Wiener nunca pudo, a pesar de su negativa a aceptar el patronazgo de los militares, dejar de ser una de las principales fuentes de inspiración intelectual de laboratorios que servían a fines que él deploraba.

MITOCONDRIAS. Pequeño «órgano» presente en las células con núcleo (eucariotas), que utiliza el oxígeno aportado por la respiración para producir energía. Puede

haber miles o decenas de miles en cada célula, y por lo menos hay una. Se encuentra fuera del núcleo, en el medio (citoplasma) comprendido entre éste y la membrana celular.

¿Por qué, se pueden preguntar mis lectores, me intereso tanto por este pequeño elemento celular, cuando no lo hago por otros, salvo, evidentemente, en el caso del fundamental ADN? La respuesta es fácil de comprender, y es, además, fascinante.

Muchos, o al menos algunos, biólogos defienden la teoría de que las mitocondrias son descendientes de aquellas bacterias que hace tres mil millones de años nadaban en las aguas primitivas de nuestro planeta respirando oxígeno. En algún momento de la evolución, aquellas bacterias ancestrales debieron de combinarse con otros microorganismos, instalándose en su interior y proporcionándoles un sistema de eliminación de desechos y energía procedente del oxígeno a cambio de alimento y cobijo. Los organismos que resultaron de esta fusión habrían evolucionado hacia formas de vida más complejas, incorporando la respiración del oxígeno. Sin mitocondrias, las células eucariotas, y por consiguiente las plantas y los animales, no podrían vivir porque no serían capaces de utilizar el oxígeno. (Por su parte, muchas de las sustancias que forman las mitocondrias son fabricadas por el núcleo celular).

Nos encontramos de esta manera ante un mecanismo —simbiótico pero permanente— evolutivo diferente a aquel al que tradicionalmente se ha recurrido para intentar explicar la evolución de todas las formas de vida que existen actualmente en la Tierra: las mutaciones y los intercambios genéticos.

Habla también en favor de un posible carácter genéticamente independiente de esas supuestas mitocondrias primitivas, el que las que ahora vemos en el citoplasma posean sus propios cromosomas, formados, naturalmente, de ADN (tienen, además, la forma de un minúsculo anillo, igual que los de las bacterias). Estos cromosomas son, por otra parte y como cabía esperar, bastante pequeños: el cromosoma de la mitocondria humana está formado por unos quince mil seiscientos nucleótidos; es, por tanto, mucho más pequeño que los cromosomas del núcleo que poseen decenas o centenares de millones (es, en este sentido, más primitivo, y, una ventaja no despreciable, también más fácil de estudiar). Otro rasgo característico de las mitocondrias es que se reproducen en momentos distintos al de la división del resto de la célula.

No se acaba en estos puntos el atractivo que para la ciencia tienen las mitocondrias, auténticos laboratorios genético-evolutivos. Un aspecto de extraordinario interés que se debe tener en cuenta es que sólo la madre transmite las mitocondrias a los hijos. Si se analiza el ADN mitocondrial de dos hermanos se encuentra que es idéntico, no importa que tengan padres diferentes.

¿Por qué, o mejor, *para qué* es importante esta característica? Pues, entre otras cosas, nada más y nada menos, que para reconstruir el árbol genealógico de, por ejemplo, la especie humana.

De vez en cuando, en el ADN mitocondrial se producen pequeños cambios, mutaciones en las que uno de los 15 600 nucleótidos de los que hablaba antes es sustituido por otro. A partir de ese momento los descendientes de la misma madre tendrán el filamento de ADN mitocondrial en la forma mutada. Ahora bien, sabemos que cuando las mutaciones tienen éxito, al adaptarse mejor al entorno, y son realmente «profundas» terminan separando irreversiblemente seres que pertenecían a una misma especie.

Cuando observamos el ADN de individuos emparentados por vía materna es muy difícil detectar las mutaciones, pequeñas, que sin duda se han producido. Pero cuando se trata de individuos sin claro parentesco, es mucho más fácil encontrar esas diferencias.

Planteada la cuestión de esta manera, es inmediato ver que es posible diseñar —como hizo desde fines de la década de los años sesenta Allan Wilson, bioquímico de la Universidad de Berkeley, que falleció prematuramente en 1991— un programa de investigación dirigido a determinar los orígenes de nuestra especie. La idea es analizar una parte del ADN mitocondrial que no sea demasiado larga (entre seiscientos y setecientos nucleótidos) de individuos pertenecientes a grupos diferentes, como europeos, africanos, asiáticos y aborígenes australianos y de Nueva Guinea. Con semejante procedimiento, en el que se procede en sentido inverso (esto es, identificando nucleótidos diferentes y buscando raíces comunes, de donde surgieron tales variaciones), Wilson y sus colaboradores fueron capaces de construir un árbol genealógico para nuestra especie. Su conclusión, que en sus aspectos básicos confirman otras investigaciones (especialmente las del gran estudioso de estos temas, el italiano Luca Cavalli-Sforza [1922], profesor de la Universidad de Stanford), es que la primera bifurcación genética, la más antigua, la que correspondería al antepasado común a todos los habitantes humanos de la Tierra, tuvo lugar en el continente africano, y separó a africanos de africanos. De una de estas dos ramas, en diferenciaciones genéticas posteriores, surgieron los grupos que poblaron los demás continentes. Es, en efecto, entre los africanos en donde se encuentran las mayores diferencias genéticas, mientras que los habitantes de otros continentes son más homogéneos genéticamente hablando.

De acuerdo con estas investigaciones, la conclusión es clara: el origen de la «humanidad» se encuentra en África, y habría que hablar, metafóricamente, de una «Eva africana», no de un Adán, en tanto que el instrumento que se está utilizando son las mitocondrias, que, recuérdese, se transmiten a través de las madres.

Estos procedimientos también se pueden emplear para calcular la «fecha de nacimiento» de Eva, nuestra «progenitora»: cuanto mayor sea el número de nucleótidos diferentes, mayor será el tiempo que habrá transcurrido. Wilson calculó que la primera bifurcación que él había podido identificar en el árbol del ADN mitocondrial humano se produjo hace unos 190 000 años (más exactamente, entre 300 000 y 150 000 años), una cifra que es perfectamente compatible con los datos obtenidos a partir de observaciones arqueológicas, que sitúan el origen del hombre moderno (*homo sapiens*) hace 100 000 años, también en África, o en sus proximidades (Israel, tal vez). ¡Qué gratificante es comprobar que bioquímica y arqueología llegan a conclusiones semejantes en un tema tan atractivo como el de nuestros orígenes!

MUCHOS UNIVERSOS (Teoría de los). Si hay algo que parece único es el Universo (con mayúscula), al que más de uno definiría, simplista pero razonablemente, como el «conjunto de todas las cosas». De hecho, la singularidad mayor de la cosmología —la disciplina que se ocupa del estudio del universo— es que no puede, al contrario de lo que ocurre con otros campos de la ciencia, experimentar con su objeto principal. No hay manera, en efecto, de introducir modificaciones, de afectar al universo para comprobar si responde de la forma que prevén nuestras teorías cosmológicas.

Pero una de las cosas que enseña la ciencia es que cualquier idea es posible, no importa lo peregrina que nos pueda parecer fuera del contexto apropiado, que le da sentido. Así ocurre con el universo, que puede dejar de ser único y convertirse, para los físicos teóricos, en múltiple.

Esta extraña, pero sin duda atractiva, posibilidad procede no de la cosmología, sino de la mecánica cuántica. Como se explica en otra entrada de este diccionario, una de las características más problemáticas de la teoría cuántica se encuentra en el denominado

«colapso de la función de onda», el proceso mediante el cual al observar un fenómeno el sistema «colapsa», se reduce, elige, uno de los estados presentes en la función de onda, que, recordemos, está formada por una superposición lineal de estados «elementales» (autoestados). La mecánica cuántica únicamente nos dice que existe tal o cual probabilidad de que el resultado de nuestra medida sea el que expresan los diferentes autoestados.

Ahora bien, ¿por qué no resolver el problema de la discontinuidad de la función de onda suponiendo que los restantes autoestados, o realidades físicas posibles, los que no observamos, no desaparecen sino que prosiguen su camino, concretándose en otros universos, cada autoestado en un universo? De esta manera, la realidad sería como un árbol que se bifurca múltiple y constantemente; se estarían creando nuevos universos continuamente, en los que se harían realidad todas las posibilidades latentes en la función de onda cuántica, lo que es tanto como decir que no dejaría de producirse, en algún universo, cualquier posibilidad que no viole las leyes de la física. Expresado de una forma acaso más dramática: los observadores —esto es, todo lo que tiene capacidad de observar— se dividirían con cada acto de observación en tantos mundos como resultados posibles tiene la medida, obteniéndose en cada mundo un resultado distinto. De alguna manera, continuaríamos viviendo, con idénticos pasados pero distinto presente —y futuro— en otros mundos, percibiendo únicamente cada uno el mundo en el que se encuentra, nunca los demás.

Pues bien, tal idea fue propuesta, con toda seriedad, en 1957, por Hugh Everett (1930-1982), en su tesis doctoral presentada en la Universidad de Princeton y dirigida por John A. Wheeler, y desarrollada años más tarde, con mayor firmeza todavía, por Bryce DeWitt, quien acuñó el nombre de teoría, o interpretación, de los muchos universos.

La teoría de Everett ha sufrido altibajos, en lo que al interés que ha suscitado entre los físicos se refiere, desde que fue propuesta. Una objeción frecuente ha sido la de que aunque proporciona un marco consistente y lógico de reglas y conceptos, no es científica, sino metafísica, ya que no puede refutarse mediante ningún experimento específico, al ser el proceso de división inobservable, al igual que «los otros mundos». Sin embargo, a partir de la década de los años ochenta esta teoría ha experimentado un cierto auge, dentro, básicamente, de los esfuerzos de construir una cosmología cuántica. Stephen Hawking ha sido uno de los más entusiastas defensores de este planteamiento, que ha utilizado en trabajos (como el que publicó en 1983 en colaboración con J. B. Hartle) en los que se ha preguntado cuál es la función de onda del universo. Para Hawking el camino hacia una teoría unificada, una teoría «final» de la física, pasa por la interpretación de los muchos mundos de la mecánica cuántica; en este sentido afirmaba en su conferencia inaugural (1979) como catedrático lucasiano en la Universidad de Cambridge: «Parece que, aun en el caso de que encontrásemos una teoría unificada, sólo seríamos capaces de realizar predicciones estadísticas. También deberíamos abandonar la idea de que el universo que observamos es único. En su lugar tendríamos que adoptar una imagen en la que existiese el conjunto de todos los universos posibles con cierta probabilidad de distribución».

Sin embargo, no todos los físicos cuánticos, o los relativistas empeñados en cuantizar la relatividad general, comparten semejante entusiasmo por las ideas que propuso Everett. Es, sin embargo, interesante jugar con las peculiares consecuencias de esa radical interpretación, o, incluso, dar alas a nuestra imaginación e ir más allá de lo que las ideas actuales sugieren. Podríamos así pensar, como señaló el físico español Francisco Yndurain (1941), que los probablemente infinitos universos fuesen creados en un súper *big bang*, y que en cada uno de ellos existiesen interacciones y/o constantes universales físicas

diferentes. No todos esos universos podrían albergar vida, un fenómeno que, requiere de estrechos márgenes de equilibrio entre esas interacciones y constantes, y sólo en aquellos en que pudiera darse vida inteligente podría alguien, alguna vez, plantearse la pregunta de por qué existe la vida, e imaginar, en sus momentos intelectuales más osados y luminosos, la posibilidad de la existencia de otros universos.

MUERTE. Sabemos perfectamente que moriremos, que para ninguno de nosotros hay escapatoria posible a este inevitable destino («Nuestras vidas son los ríos/que van a dar en la mar/que es el morir», reflexionaba con una mezcla de nostalgia y amargura Jorge Manrique). Generalmente no sabemos cuándo, ni cuál será el motivo concreto, sólo que llegará el momento. Por mucho que lo intentemos no logramos desprendernos de semejante certidumbre, que gravita como una losa sobre nuestra conciencia. ¿Cómo podría evitar yo, por consiguiente, incluir en estas páginas algunas reflexiones sobre la muerte?

El filósofo George Santayana (1863-1952) dijo en cierta ocasión que «una buena manera de probar el calibre de una filosofía es preguntar lo que piensa de la muerte». Probablemente, podemos decir con muchas mejores razones que una buena manera de comprobar el grado de desarrollo que ha alcanzado la ciencia, es preguntar qué nos puede decir sobre la muerte.

Y lo primero que nos dice es que no es obligatoria para todos los organismos vivos. Existen criaturas en principio inmortales (sí, ha leído bien, estimado lector: *inmortales*), que no morirán si se les suministra el alimento necesario y se encuentran en el medio adecuado. Así ocurre con las bacterias, no importa que se encuentren en el aire, la tierra o el agua. Una vez que se duplica su ADN, se dividen en dos, cada una con su correspondiente copia de información genética. Al cabo de un tiempo, el proceso se repite, no existiendo un límite temporal para el número de veces que se puede repetir, salvo que varíe el medio en el que se encuentra de forma incompatible para el nacimiento o desarrollo de nuevas bacterias. La «primera» bacteria no ha muerto puesto que continúa viviendo; no ha sufrido ninguno de los procesos de descomposición característicos de la muerte (se suele definir la muerte como el cese de todas las funciones vitales, de forma que las moléculas y estructuras asociadas con seres vivos se desorganizan haciéndose indistinguibles de moléculas similares presentes en cuerpos no vivos).

Los virus también son, en este sentido, inmortales. Cuando invaden (infectan) a un huésped, utilizan la maquinaria de replicación genética de éste para producir nuevos virus. Esta progenie infecta a su vez a otros huéspedes. Si existiera una cantidad ilimitada de éstos, no habría tope para que continuasen produciéndose más virus de la cepa original. Las esponjas, las criaturas multicelulares más simples que se conocen, son otro ejemplo: se pueden reproducir sexual y asexualmente. Si se las desintegra, aparecerán nuevas esponjas de cada trozo, un proceso que se puede repetir indefinidamente. (Las esponjas son en realidad agregaciones no demasiado firmes de células. Existe división de trabajo entre esas células, pero carecen de órganos, de una boca o un sistema digestivo, y únicamente poseen un sistema neuronal muy primitivo. Pero pueden soportar su desintegración, y cada una de sus células individuales contiene la información necesaria para reconstruir la esponja completa).

Vistos estos ejemplos, surge, rauda, la gran pregunta: ¿si la muerte no acompaña necesariamente a la vida, por qué hay células que mueren? Si no existiera un final para muchas células, acaso tampoco existiría para nosotros, organismos multicelulares.

Ésta es una de las preguntas que se formula la ciencia biológica contemporánea. Hay muchas otras, ciertamente: establecer la dinámica concreta del envejecimiento del

sistema reproductivo, o de los pulmones, corazón, músculos, huesos, etcétera, etcétera. Son éstas cuestiones sin duda interesantes, vitales, pero en este selectivo diccionario yo busco sobre todo lo auténticamente fundamental, lo básico, que en este caso se encuentra en las células, en su envejecimiento, cuya conclusión es la muerte.

Intuitivamente, parece que existe un nexo entre capacidad reproductiva y muerte; que cuando una célula deja de ser capaz de reproducirse, puede morir. Al fin y al cabo, es una evidencia de que los organismos de la célula comienzan a perder facultades, lo que no es sino una muestra de decadencia. La longevidad de un ser vivo tendría que ver, desde esta perspectiva, con la capacidad de reemplazar o reparar, sus unidades fundamentales: las células. El reino animal parece apoyar tal idea. Los insectos y los gusanos adultos están compuestos de células incapaces de reproducirse. Ya he mencionado el caso contrario, ilustrado por las esponjas, que pueden ser inmortales, debido al gran poder reproductivo de sus células. Sin embargo, existen otras especies «intermedias», como los mamíferos, entre los que nos contamos. Éstos poseen células que durante el envejecimiento siguen siendo capaces de reproducirse, mientras que otras pierden, con el paso del tiempo, estas facultades. Para oscurecer todavía más la posible relación entre disminución de la facultad reproductiva y la degeneración del organismo, no tenemos más que recordar lo que ocurre en nuestra propia especie: poseemos células que se reproducen únicamente una vez, cuando somos niños, y que sin embargo mantienen su vitalidad, reteniendo muchas de sus funciones bioquímicas, en ocasiones hasta durante más de un siglo. La senilidad celular no está, por consiguiente, asociada necesariamente —o completamente— con la capacidad de reproducirse.

Las investigaciones sobre la mortalidad o inmortalidad celular han experimentado en los últimos tiempos avances importantes con el desarrollo de las técnicas de cultivos de tejidos. Hace años se encontró que muchos tipos de células, incluyendo las humanas, pueden sobrevivir fuera de los cuerpos de los que forman parte. Es posible preparar cultivos en los que sobreviven grupos de células (tejidos). Y lo que se ha encontrado es que las células de la mayoría de estos cultivos envejecen: llega un momento en el que dejan de reproducirse. Esto no quiere decir que mueran; sobreviven durante algún tiempo, cómo, todavía no está claro. Pero terminan muriendo. Todas menos unas: las células cancerosas.

Si se extraen células de ciertos tipos de tumores, y se prepara con ellas cultivos, resulta que continúan —siempre que se las alimente y conserve adecuadamente— dividiéndose y creciendo como si fuesen jóvenes, aparentemente sin tope temporal. Se dice que se han immortalizado. De hecho, no es necesario recurrir siempre a un tumor canceroso para obtener células inmortales: existen virus que pueden producir tumores. Si se las coloca en un cultivo con células normales, bajo ciertas condiciones, éstas se convierten en cancerosas, pasan de mortales a inmortales.

Esta aparente conexión entre cáncer e inmortalidad ha sido utilizada para proponer una curiosa, y sin duda interesante, hipótesis que podría resolver una profunda paradoja, que surge dentro del contexto de la teoría de la evolución: si los organismos jóvenes y saludables son los que tienen mayores posibilidades de sobrevivir, ¿por qué, después de millones de años de evolución, existe el envejecimiento? Como estamos tan familiarizados con él, podemos pensar que se trata de una ley universal de la naturaleza, pero hemos visto que esto no es cierto, así que la pregunta de por qué hay organismos que envejecen adquiere de esta manera una nueva dimensión.

La hipótesis que se está manejando es que el envejecimiento es una protección, *inventada* a lo largo de la evolución, para que la capacidad reproductiva de las células no se

desboque, conduciendo a un cáncer, que aunque conservaría la vida celular, lo haría a costa de terminar deformando completamente el sistema estructural del organismo (esto es especialmente claro en organismos multicelulares). En otras palabras, el envejecimiento sería desde esta perspectiva algo así como un freno de mano del que se ha dotado a las células para evitar que se conviertan en cancerosas. La paradoja es que este proceso hace que las células envejezcan perdiendo su capacidad de reproducirse, con lo cual el antídoto que es envejecer pierde su razón de ser, aunque sigue operativo, conduciendo sin embargo a la muerte. Si esto fuese cierto, sería una broma pesada. Pero es preciso dejar claro que se trata sólo de una hipótesis; para aceptarla hay que contestar todavía a muchas preguntas: por ejemplo, ¿por qué la incidencia del cáncer aumenta en las personas mayores?

Quisiera abandonar ya esta maldita, pero inevitable, entrada de mi diccionario en este punto, pero algo me dice que aunque cómodo, no sería justo. Ni coherente con uno de los propósitos que repetidamente he manifestado querer dar a esta obra: el de no olvidar mirar a la ciencia desde la perspectiva de lo humano. Observo con satisfacción la aparición de un número elevado de libros en los que compasivos (a veces también oportunistas, mercaderes del conocimiento que pretenden beneficiarse del aparentemente ilimitado apetito que ciertos medios de nuestras sociedades estimulan por lo morboso) médicos intentan familiarizarnos con la muerte, con la esperanza de que al hacerla intelectualmente próxima pierda algo de su dramatismo; que nos acerquemos a lo que dijo Jenofonte de Sócrates: «lo mismo que no se opuso a los otros bienes de la vida, tampoco se acobardó ante la muerte, sino que la aceptó y la recibió con alegría». Mi respeto por aquellos médicos que no han olvidado que la ciencia no debe estar por encima —ni ser enemiga— de la compasión.

La ciencia médica nos enseña desde hace tiempo que la muerte humana no pertenece sólo al corazón, sino que es un proceso en el cual participan todos los tejidos del cuerpo. En el pasado, se consideraba que la vida había llegado a su final cuando dejaba de latir el corazón. En la actualidad, y aunque en la mayoría de las muertes el corazón se detiene antes de que el cerebro deje de funcionar, las leyes suelen definir la muerte como el cese de la función cerebral. Como ha escrito uno de esos médicos compasivos a los que me acabo de referir, Sherwin Nuland, «aunque el corazón siga latiendo y la médula ósea cree aún nuevas células, la historia de un hombre jamás puede sobrevivir a su cerebro».

En este sentido, la vida puede continuar todavía durante un tiempo después de la muerte oficial, pero se trata de una vida que ha perdido todos los reflejos, que no responde a vigorosos estímulos externos y en la que no tiene lugar actividad eléctrica alguna (esto se comprueba mediante electroencefalogramas). Es una vida, en definitiva, poco humana, a la que únicamente valores extracientíficos, sociales, psicológicos o religiosos, pueden dotar de un sentido.

Una vez que cesa la actividad cerebral, antes o después, el corazón se detendrá, poniendo fin a toda actividad circulatoria. Es entonces cuando se completa el proceso de muerte celular. Primero se extiende al sistema nervioso central y, por último, a los tejidos musculares y estructuras fibrosas. Y aun así, todavía quedan restos de vida durante horas; por ejemplo, procesos orgánicos que no requieren oxígeno (anaeróbicos), como la capacidad de las células hepáticas de descomponer el alcohol de sus componentes. Parece como si la vida se negase a dejar de ser.

MUJERES Y CIENCIA. No se ha descubierto, y no veo ninguna razón para que se encuentre en el futuro, ninguna característica que distinga los dos sexos de nuestra especie en lo que a su capacidad para la investigación científica se refiere. Esto no quiere

decir que no haya quienes han mantenido o mantienen que sí existen diferencias, que privilegian a los hombres frente a las mujeres. En el mundo antiguo se recurrió a la teoría galénica de los humores para argumentar que los hombres eran calientes y secos (y por consiguiente activos), mientras que las mujeres eran frías y húmedas (y por tanto pasivas). Ni que decir tiene que la pasividad no es la mejor compañera para la creación científica. En el siglo XIX, Hegel (1770-1831) comparó a los hombres con los animales y a las mujeres con las plantas. Como se sabe, nadie se ha atrevido hasta la fecha —al menos que yo sepa— a argumentar que las plantas tengan algún tipo de iniciativa que se pueda asimilar a investigación científica, mientras que sí son muchos los que ven en algunas especies animales rasgos que los hacen algo así como protocientíficos, como científicos muy primitivos. Es famoso —lo recordó en cierta ocasión el filósofo español Jesús Mosterín— el caso de una macaco ¡hembra!, a la que se llamó Imo, que vivía en la isla de Koshima: investigadores que estaban estudiando la población de macacos a la que pertenecía, arrojaban batatas a la playa, donde se llenaban de arena. A Imo se le ocurrió llevar unas batatas a un arroyo de agua dulce y lavarlas, para comérselas después. Poco a poco, otros macacos imitaron su comportamiento. Un par de años más tarde, los etólogos (especialistas en los comportamientos animales) se dedicaron a arrojar trigo sobre la arena de la playa. Algunos macacos intentaban recoger los granos uno a uno. Imo tuvo la genial idea (en un humano se podría decir «perspicaz intuición científica») de tomar puñados de arena llenos de granos y tirarlos al mar. Los granos flotaban, la arena se hundía e Imo podía recogerlos tranquilamente y comérselos. Este pequeño ejemplo puede servir también para que contemplemos a nuestra especie con algo menos de orgullo, y a otras con un poco más de respeto. La investigación científica, en los campos de las ciencias del comportamiento, es, por supuesto, también la responsable de que podamos ampliar nuestras miras y combatir la comprensible, pero no parece que completamente justificable, presunción antropomórfica que caracteriza a nuestra especie, y que es responsable, entre otras atrocidades, de espectáculos tan denigrantes y crueles como las corridas de toros, o la caza organizada de animales (los zorros, por ejemplo).

Pero regresemos a las protagonistas de esta entrada: las mujeres. Ya utilicé [véase DETERMINISMO BIOLÓGICO] las manifestaciones de Edward Wilson de que no es probable que las mujeres se igualen alguna vez con los hombres en las esferas de los negocios y la ciencia, dada su adaptación evolutiva a roles sociales diferentes. Una razón esta en la que se combinan de manera peculiar la historia (la asignación de tareas específicas, alejadas de la reflexión intelectual, científica) con la ciencia (adaptación evolutiva, aparentemente, si es que existiera, unidireccional; aunque uno se puede preguntar por qué, si es que situaciones históricas dan origen a tales ligaduras genético-evolutivas, no se han producido éstas también con clases sociales, sometidas durante generaciones a la pobreza e incultura, y sí con un sexo).

Es muy fácil mostrar con ejemplos los problemas que las mujeres han padecido en el pasado cuando intentaban ejercer la profesión científica, y no me resistiré a utilizar alguno, pero existe un hecho obvio e incuestionable: el muy reducido número de mujeres científicas que hasta hace muy poco existían. Una de las razones que explican semejante hecho se encuentra en que hasta comienzos del siglo XX se negó en casi todas partes al sexo femenino el derecho a seguir estudios superiores; las universidades eran cotos vedados para ellas. Es penoso recuperar esa historia, que revela la más flagrante miseria moral y una no menos notoria miopía científica, ya que con frecuencia se empleaban argumentos supuestamente racionales.

Si miramos, por poner otro tipo de ejemplo, hacia lo que durante mucho tiempo se consideró como la cumbre de la profesión científica, a las Academias de Ciencias, encontramos que con frecuencia el acceso a ellas estuvo vetado a las mujeres. En la Royal Society de Londres (sociedad fundada en 1660), las primeras mujeres en ser elegidas miembros fueron Marjory Stephenson (1885-1948) y Kathleen Lonsdale (1903-1971), algo que ocurrió... en 1945. La prestigiosa Académie des Sciences de París (establecida en 1666) no admitió como miembro de pleno derecho a una mujer —la matemática Yvonne Choquet-Bruhat (1923)— hasta 1979. Antes se habían rechazado candidaturas como la de Marie Curie (1867-1934), la primera persona en ganar dos premios Nobel (de Física y de Química). En la Akademie der Wissenschaften de Berlín (creada en 1700) fue Lise Meitner (1878-1968) la primera mujer miembro; entró en 1949. En la Academia de Ciencias de Madrid ha sido muy recientemente (1988) Margarita Salas (1938) la primera mujer académica.

Si se busca mujeres científicas en la historia, la disciplina en la que se encuentra un número mayor es la astronomía. Por alguna razón, ya antes de que pudiesen acceder a la educación superior, aparecen bastantes ejemplos de mujeres que realizaron trabajos en esa disciplina. Limitaré mis ejemplos a este —en cierto sentido más favorable para las mujeres— ejemplo.

Entre 1650 y 1720, las mujeres constituían alrededor del catorce por ciento de los astrónomos de Alemania, un porcentaje desde luego superior al de otros países. A finales del siglo XVIII, Caroline Herschel (1750-1848) ayudó a su hermano William (1738-1822) en sus observaciones de estrellas variables, planetas y nebulosas; ella misma descubrió algunos cometas. En el siglo XIX, Margaret Huggins (1848-1915) colaboró con su esposo, William (1824-1910), uno de los pioneros en la aplicación de la espectroscopia a la astronomía (lo que convirtió a esta disciplina en astrofísica), en sus estudios del espectro solar. El ejemplo más destacado de astrónoma es el de Maria Mitchell (1818-1889), la primera mujer en ser admitida en la American Academy of Arts and Sciences, en ser miembro de la American Association for the Advancement of Science y en ser nombrada catedrática de Astronomía en Estados Unidos.

Pero casos como éstos son excepcionales. Durante el gran desarrollo que experimentó la astronomía y astrofísica a fines del siglo pasado, continuamos encontrando mujeres que trabajaban en este campo, pero en posiciones claramente subalternas. Al aumentar las dimensiones y complejidad de los observatorios, crecía también la necesidad de ayudantes, de personal especializado en todo tipo de funciones. Una de esas funciones, particularmente importante en astronomía y astrofísica, era la de clasificar fotografías, situar objetos estelares en las placas obtenidas o efectuar todo tipo de tediosos cálculos mecánicos. Sin las facilidades de que hoy disponemos, esas labores se realizaban manualmente.

En 1881, Edward Pickering (1846-1919), director del Observatorio del Harvard College, se enfadó tanto con la ineficacia de su ayudante masculino en copiar y calcular que declaró —según se dice— que incluso su doncella podría hacerlo mejor. Inmediatamente, contrató a Williamina P. Fleming (1857-1911), una emigrante escocesa de 24 años, graduada en una escuela pública, madre separada. Fleming permanecería treinta años en el Observatorio, llegando a ser una astrónoma respetada. De las veintitrés novas identificadas en Occidente entre 1872 y 1899, siete lo fueron por Fleming.

Una de las tareas de Fleming era contratar y dirigir un grupo de otras mujeres ayudantes, a las que se pagaba un modesto salario por clasificar fotografías de espectros

estelares. Se puede decir que Fleming estaba bien considerada por Pickering, pero hasta cierto punto, como hace patente una entrada (12 de marzo de 1900) en el diario de Williamina:

Tuve alguna conversación con el director con relación al salario de las mujeres. Parece pensar que ningún trabajo es demasiado o demasiado duro para mí, no importa la responsabilidad o las horas que dure. Pero en cuanto saco a relucir la cuestión del salario se me dice inmediatamente que recibo un salario excelente teniendo en cuenta lo que cobran las mujeres [...] Algunas veces me siento tentada de abandonar y dejarle que intente con otra persona, o que alguno de los hombres hagan mi trabajo, para que así se dé cuenta de lo que está obteniendo por los 1500 dólares anuales que me paga, comparado con los 2500 que reciben otros ayudantes. ¿Se para a pensar en algún momento que yo tengo una casa y una familia que mantener lo mismo que los hombres? Pero supongo que una mujer no tiene derecho a tales lujos. ¡Y a ésta se la considera una era ilustrada!

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921), una de las discípulas de Fleming, podría servir como otro ejemplo destacado. Midiendo en fotografías tomadas con los telescopios del observatorio, Leavitt descubrió que los periodos con los que varía la luminosidad de algunas estrellas (denominadas cefeidas) mantienen una relación fija —lineal, de hecho— con su luminosidad. Esta relación tenía un gran valor potencial como indicador de luminosidades absolutas, lo que permitiría a su vez determinar distancias astronómicas. No hay duda de que la ayudante de Harvard se dio cuenta de tal utilidad. No obstante, no pudo sacar partido de ella, algo que quedaría reservado para astrónomos como Harlow Shapley (1885-1972) o Edwin Hubble (1889-1953), ambos del Observatorio de Monte Wilson. El primero utilizó la relación descubierta por Leavitt para calibrar las magnitudes absolutas de las cefeidas, con lo que daba el paso decisivo para poder emplearlas como indicadores de distancias; de hecho él mismo determinó las distancias a que se encuentran los cúmulos de estrellas que rodean a la Vía Láctea. Utilizando cefeidas, Hubble demostró en 1924 que nuestra galaxia, la Vía Láctea, no agota el universo, que el universo está poblado por galaxias separadas entre sí, con lo que sentenciaba un debate centenario. Unos años después, en 1929 y utilizando de nuevo cefeidas, demostraba que el universo está en expansión. Según algunos historiadores, Pickering impidió que Leavitt continuase sus investigaciones, puesto que como ayudante su deber era reunir datos, no interpretarlos. Pero probablemente sea demasiado simplista suponer que si Leavitt no llevó a cabo otros descubrimientos basados en la relación periodo/luminosidad fue por la intervención de Pickering. El proceso de descubrimiento en los grandes observatorios astronómicos es muy complicado y, además, muy posiblemente a Leavitt le faltasen conocimientos suficientes para aprovechar mucho más su hallazgo. El problema real es, por un lado, que por entonces prácticamente todas las mujeres que trabajaban en astrofísica ocupaban puestos similares al de Leavitt, y, por otro, que éxitos profesionales como éste no servían a una mujer para ascender en la escala profesional, lo que tal vez habría permitido a Leavitt, o a otras colegas suyas, realizar aportaciones mayores en el futuro.

Como ven, la miseria, la explotación, la discriminación por razón de sexo, aparece en todos los rincones de la historia, incluida la historia de la ciencia.

MUTACIÓN. Cambios en la constitución genética de los individuos. Se producen espontáneamente raras veces (algunas estimaciones hablan de que en una célula, a lo largo de una generación acaso cambien una docena de nucleótidos de los tres mil millones que posee).

Hugo de Vries, uno de los fundadores de la genética, descubrió a comienzos del

siglo XX que incluso en la descendencia de cepas realmente puras, un número muy pequeño de individuos (según él, dos o tres entre varias decenas de miles) aparece con cambios pequeños que suponen una especie de salto, de discontinuidad, a los que dio el nombre de «mutaciones».

Las mutaciones pueden ser de dos clases: *mutaciones génicas*, que alteran uno, o unos pocos, nucleótidos dentro de un gen (esto es, alteraciones en secuencias de la estructura del ADN), y *mutaciones cromosómicas*, que cambian el número de los cromosomas, o el número u orden de los genes dentro de los cromosomas.

Las consecuencias de las mutaciones son, en principio, imprevisibles. Pequeños cambios pueden acarrear consecuencias enormes para un organismo, dando origen a enfermedades [véase GEN].

Las mutaciones con consecuencias más allá del sujeto que las sufre, son aquellas que afectan a las células germinales, esto es, las encargadas de generar a los hijos, que contienen todo el ADN que formará un nuevo individuo (en los humanos, los espermatozoides en los hombres y los óvulos en las mujeres).

Antes me he referido a «mutaciones espontáneas». Si pensamos en términos atómicos, en cuyo nivel se producen, por ejemplo, desintegraciones, de las que sólo podemos dar —de manera coherente con la naturaleza probabilista de la física cuántica— frecuencias estadísticas, no nos deberemos extrañar de que las secuencias de ADN puedan cambiar «espontáneamente». Este hecho fue apreciado perfectamente por uno de los creadores de la mecánica cuántica, Erwin Schrödinger, quien escribió un famoso libro, significativamente titulado *¿Qué es la vida?* (1944) y que influyó en algunos de los creadores de la biología molecular, en el que se pueden leer párrafos como el siguiente: «El hecho significativo [de las mutaciones] es la discontinuidad. Al físico le recuerda la teoría cuántica, según la cual no hay energías intermedias entre dos niveles energéticos contiguos. Podríamos llamar a la teoría de la mutación, de forma figurada, la teoría cuántica de la biología [...] Las mutaciones se deben, de hecho, a saltos cuánticos en las moléculas del gen».

Ahora bien, existe otro origen para las mutaciones, el debido a agentes cuya energía o propiedades químicas pueden alterar cadenas nucleóticas, y con ellas las funciones normales de las células. Los asbestos, nombre dado a la familia de minerales fibrosos de silicatos de magnesio, son uno, entre los muchos existentes, de esos elementos químicos nocivos. Es bien sabido que pueden producir cáncer. También están las radiaciones ionizantes, producidas en reacciones de diverso tipo, como las nucleares, bien naturales (como los rayos cósmicos o la radiactividad de algunas rocas) o artificiales (reactores nucleares, bombas atómicas), más peligrosas éstas puesto que pueden alcanzar grandes intensidades.

Hasta hace poco se creía que la probabilidad de que estas radiaciones artificiales afectasen a las células germinales no era demasiado elevada (las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki no produjeron en principio consecuencias genéticas permanentes para la población); los efectos podían ser terribles para los individuos, pero no tanto para sus descendientes... si es que podían llegar a tenerlos. Análisis muy recientes de los efectos que ha tenido en las poblaciones de los alrededores de la central nuclear de Chernobil (Ucrania) la explosión de uno de sus reactores, ocurrida el 26 de abril de 1986, parecen indicar que esto no es así. Las incertidumbres que existen todavía se refieren a que tal vez puedan estar implicados otros contaminantes procedentes de la explosión del reactor, como metales pesados, que perduran mucho más en el entorno, con lo cual el efecto que vemos

no procedería de los padres, sino que sería debido a la acción presente de esos materiales en sus descendientes. Pero salvo que se cumpla esta posibilidad, habría que concluir que las emisiones radiactivas que se produjeron entonces dañaron las células germinales de muchos habitantes de la zona (hasta, al menos doscientos kilómetros de distancia), con lo que las secuelas de esta catástrofe civil perdurarán en los hijos y los nietos de Chernobil.

N

NEURONA. Las neuronas son las unidades básicas del sistema nervioso, la «estructura» que permite a los animales que están formados por algo más que unas pocas células recibir informaciones y responder a ellas (en los vertebrados, el sistema nervioso consta de tres partes: las fibras nerviosas aferentes con sus receptores, las fibras nerviosas eferentes con sus músculos y glándulas, y el sistema nervioso central, formado por la médula espinal y el cerebro).

A pesar de ser demasiado general, la anterior caracterización ya indica la importancia de las neuronas y sugiere lo difícil que debe de ser comprender cuando menos sus funciones. Así es, y al afrontar la, inevitable, tarea de escribir esta entrada, me invade una sensación de impotencia. Impotencia ante lo que no sé, y ante lo que no sabemos. Comprendemos mucho mejor los primeros instantes del universo, o las fuerzas que afectan a las partículas más básicas de la naturaleza, que a nuestro propio cerebro, el órgano que hace posible —paradoja entre las paradojas— que seamos capaces de semejantes comprensiones. Pero aunque no soy neurólogo, no albergo la menor duda de que ésta es una situación transitoria, que llegará el día en que entenderemos cómo entendemos, el momento en que comprenderemos qué son realmente la memoria, el habla, la conciencia, la percepción, los deseos, las necesidades o el pensamiento, actividades todas del cerebro y las neuronas.

De hecho, no es sorprendente lo mucho que ignoramos, acaso lo sea más todo lo que ya sabemos. En tiempos de Darwin las células nerviosas y sus finas conexiones eran prácticamente desconocidas; no es extraño, por tanto, que el autor de *Sobre el origen de las especies* apenas se refiriese al cerebro. Fue en el último tercio del siglo XIX cuando se avanzó de manera espectacular en el conocimiento de la estructura y funciones básicas de las neuronas. Hacia 1870, Camillo Golgi (1843-1926), neurólogo italiano, descubrió que las células nerviosas simples (neuronas) podían teñirse de negro con sales de plata, con lo que resultaba posible observar con el microscopio sus delicadas ramificaciones receptoras (dendritas) y las fibras de salida (axones) en un corte fino del cerebro. Pero fue Santiago Ramón y Cajal (1852-1934) quien descubrió, desarrollando los métodos de tinción de Golgi, la esencia del funcionamiento de las neuronas. Cajal, el científico más importante en toda la historia de España, se percató de que el cerebro está constituido por unidades discretas (neuronismo) y no, como creía Golgi, por una red continua (reticularismo), e identificó los mecanismos básicos mediante los cuales se relacionan los elementos fundamentales de esa red, las neuronas, a las que en cierta ocasión denominó «las misteriosas mariposas del alma, cuyo batir de alas quién sabe si esclarecerá algún día el secreto de la vida mental».

He aquí cómo se refería Cajal, en la segunda parte de su autobiografía (*Historia de mi labor científica*), a su gran descubrimiento, por el que ha pasado a formar parte de la historia universal de la ciencia: «Las leyes que rigen la morfología y las conexiones de las células nerviosas en la sustancia gris, patentes primeramente en mis estudios del cerebelo [región del cerebro responsable principalmente de la coordinación de los movimientos], confirmáronse en todos los órganos sucesivamente explorados» (órganos como la retina, bulbo olfatorio, ganglios sensitivos y simpáticos, cerebro, médula espinal y bulbo raquídeo). Y añadía después: «Las ramificaciones colaterales y terminales de todo cilindro-eje acaban en la sustancia gris, no mediante una red difusa, según defendían

Gerlach y Golgi con la mayoría de los neurólogos, sino mediante arborizaciones libres, dispuestas en variedad de formas (*cestas* o *nidos* pericelulares, ramas trepadoras, etc.) [...] Excluida la continuidad sustancial entre célula y célula, se impone la opinión de que el impulso nervioso se transmite por contacto, como en las articulaciones de los conductores eléctricos, o por suerte de inducción, como en los carretes de igual nombre».

Hoy, más de un siglo después de los hallazgos de Cajal podemos definir a las neuronas —las células más grandes de nuestro cuerpo— de una forma más precisa: como células especializadas, características del sistema nervioso, que aunque suelen diferir por el tamaño y la forma, presentan grandes semejanzas funcionales. Sintetizan informaciones químicas (por medio de mediadores asociados a los receptores situados en sus membranas), que convergen en ellas. Muestran esa síntesis con una actividad eléctrica (en su estado normal, o de reposo, retienen una cierta cantidad de moléculas cargadas negativamente, que permiten que el interior de la célula mantenga un voltaje de unos setenta milivoltios menos que el exterior de ella), que se difunde —a la no muy elevada velocidad de unos trescientos veinte kilómetros por hora— siguiendo una prolongación principal llamada axón, que se extiende en un conjunto de ramificaciones, cada una de las cuales concluye en una protuberancia, en cuyo interior se almacena, o se elabora y almacena a continuación, el neuromediador. Una vez liberado el mediador, le comunica a la neurona contigua una información, un mensaje, al asociarse durante un corto espacio de tiempo con algunos de los receptores de ésta. Las neuronas reciben, pues, mensajes y, a su vez, emiten otros, de forma anatómicamente definidos.

Aunque el cerebro humano únicamente pesa alrededor de un kilo y medio, contiene unos cien mil millones de neuronas; aproximadamente el mismo número que el de estrellas en la Vía Láctea, nuestra galaxia. Desgraciadamente, parece (aunque hay algunos indicios en sentido contrario) que ninguna de estas «mariposas del alma» posee la facultad de multiplicarse; tal es el precio que pagan por su altísima especialización. En el envejecimiento cerebral normal se van perdiendo neuronas, y las que sobreviven son cada vez menos capaces de suplir a las que desaparecen. Este declive puede ser lento y progresivo, pero también pueden aparecer repentinos aludes provocados por episodios infecciosos, accidentes vasculares cerebrales u otro tipo de mecanismos (como espasmos vasculares o microembolias).

Existe una gran variedad estructural de neuronas. Las que participan en, por ejemplo, la visión son diferentes en forma y funcionamiento de aquellas ligadas a la audición. Algunas se especializan en recibir señales del mundo externo, otras en transmitir las a diferentes partes del cerebro, o en transformar la información. Incluso en el interior de conjuntos de neuronas aparentemente idénticas, el examen de ADN revela diferencias en la constitución genética.

La mayoría de estas diferenciaciones y especializaciones constituye un completo misterio. Pero también es mucho lo que ya se sabe, tanto a nivel fenomenológico como estructural. Sabemos, por ejemplo, que si se destruye una extensión del cerebro, que pueda lesionar suficientemente la red neuronal responsable del procesamiento, por ejemplo, de los rostros humanos, el paciente no podrá reconocer a ningún individuo por su rostro (se dice que sufre una prosopagnosia). Pero tampoco podrá adquirir nueva información sobre los rostros humanos. Igualmente puede lesionarse una parte de la red neuronal que procesa y permite percibir un objeto o categoría de objetos. Se han identificado neuronas cerebrales del búho que activan un programa motor que hace volverse a éste hacia una fuente sonora. En el sistema auditivo del pinzón cebrado se evidencia una elevada especialización en ciertas

neuronas de los cerebros de todos los machos, que responden a la compleja canción de su padre, pero no a tonos puros ni a los cánticos de otros individuos macho de la misma especie. Se ha descubierto una clase de neuronas en la corteza motora de monos, en las que se codifica la dirección del movimiento del antebrazo. Algunos investigadores piensan que la mayor parte de las redes neuronales que se ocupan de la memoria perceptiva están en la corteza asociativa posterior de los lóbulos parietal, temporal y occipital, mientras que la corteza asociativa anterior (frontal), es responsable del procesamiento y la representación de la acción (o memoria motora).

Pero no es necesario —ni posible— continuar por esta senda. Se trataba de explicar qué son las neuronas, y cuáles son algunas de sus funciones. En el camino espero que haya quedado claro que muchas —probablemente todas— de las habilidades a las que históricamente con tanta pompa se ha referido y clasificado nuestra especie (alma, conciencia...), parecen ser nada más, y nada menos, que el producto de la acción sincronizada de neuronas, de tráficos de señales eléctricas y químicas discretas en las redes neuronales que pueblan nuestro sistema nervioso. Desde esta perspectiva el cerebro es el órgano, o el agente, que integra sucesos neuronales fragmentarios de localización cortical diversa y múltiple, para producir experiencias unificadas.

No son así sorprendentes los intensos esfuerzos que se realizan en las ciencias de la computación por imitar los mecanismos que tienen lugar en el cerebro y, en general, en el sistema nervioso. Se habla allí, por ejemplo, de «redes neuronales» (artificiales, naturalmente), programas computacionales o dispositivos electrónicos diseñados para imitar la forma en que el cerebro se apoya en el vasto conjunto de células interconectadas que son las neuronas, que actúan como pequeños pero complejos conmutadores electrónicos. Una parte de estos programas de investigación tienen que ver con la Inteligencia Artificial, de la que también me ocupo en este libro.

NEWTON (Isaac). 1642-1727. Pretender saber algo de ciencia e ignorar quién fue Isaac Newton, es tanto como tener sed y no beber agua. Newton fue el grande entre los grandes, la mente más poderosa —científica, sin duda, pero acaso también desde cualquier punto de vista— que ha conocido la historia. Físico, matemático, químico/alquimista, teólogo, historiador; apasionado y genial perseguidor de los arcanos del conocimiento.

Tendemos a contemplar a Newton como el paradigma del científico en el sentido moderno, como el estudioso de los fenómenos naturales, y aunque esta caracterización de aquel inglés irascible y poco dado a compartir sus conocimientos no deja de ser cierta, también se encuentra fundamentalmente desenfocada. En uno de los ensayos más vibrantes y apasionados que he leído a lo largo de mi vida, el economista John Maynard Keynes (1883-1946) le caracterizó —y algo de razón tenía— como el «último de los magos, el último de los babilonios y de los sumerios, la última de las grandes mentes que contempló el mundo visible e intelectual con los mismos ojos de aquellos que empezaron a construir nuestra heredad intelectual, hace casi diez mil años».

Es evidente, sin embargo, que semejante caracterización contiene elementos inaceptables. Newton introdujo en el análisis de los fenómenos naturales —de los físicos especialmente— un método radicalmente nuevo; un método que si ya lo distinguía de sus predecesores más cercanos (como Galileo, Descartes [1596-1650] o Kepler [1571-1630]), más le separaba aún de todos aquellos que habían empezado, milenios antes, a «construir nuestra heredad intelectual». El delicado equilibrio e interrelación entre observación experimental y representación teórico-matemática, la prodigiosa habilidad para reducir los problemas físicos a cuestiones matemáticas, para tratarlos como tales y aplicar luego los

resultados así obtenidos a la investigación empírica, todo esto —la esencia del método científico moderno y contemporáneo—, es algo que nadie de sus contemporáneos o precursores logró.

En este sentido, ciertamente no contempló el mundo físico de la misma manera que los antiguos. Y, no obstante, a pesar de tales diferencias las frases de Keynes —que llegó a reunir una de las colecciones más importantes de manuscritos «no científicos» newtonianos— contienen algo de verdad, tocando la esencia del pensamiento del catedrático lucasiano de la Universidad de Cambridge. Este elemento de verdad se aprecia con mayor claridad cuando, más adelante en su ensayo, Keynes explicaba los calificativos que había aplicado a Newton:

¿Por qué lo llamo mago? Porque contemplaba el universo y todo lo que en él se contiene como un enigma, como un secreto que podía leerse aplicando el pensamiento puro a cierta evidencia, a ciertos indicios místicos que Dios había diseminado por el mundo para permitir una especie de búsqueda del tesoro filosófico a la hermandad esotérica. Creía que una parte de dichos indicios debía encontrarse en la evidencia de los cielos y en la constitución de los elementos (y esto es lo que erróneamente sugiere que fuera un filósofo experimental natural); y la otra, en ciertos escritos y tradiciones transmitidos por los miembros de una hermandad, en una cadena ininterrumpida desde la original revelación críptica, en Babilonia. Consideraba al Universo como un criptograma trazado por el Todopoderoso.

Basta, en efecto, pasar revista a los manuscritos que dejó para comprender dónde residían, efectivamente, sus intereses. Hasta el punto que no sería totalmente descabellado formularse la pregunta de por qué uno de los mayores teólogos antitrinitarios del siglo XVII utilizó parte de su tiempo para escribir trabajos sobre ciencia natural, como *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687).

La ambición intelectual de Newton fue tal que no podía conformarse —aunque aparentemente lo hiciera (de ahí su engañosa frase «*Hypotheses non fingo*» [«No hago hipótesis»])— con otra cosa que no fuese la *causa última*, la explicación definitiva de todo lo que vemos ocurre en la Naturaleza. Y él situaba a Dios en ese lugar. De ahí su profundo y sostenido interés por los temas teológicos e histórico-religiosos, que aflora sólo muy ocasionalmente en alguno de sus tratados científicos [véase DIOS]; como en el «Escolio General» que añadió a la segunda edición de los *Principia*, o los últimos párrafos de la «Cuestión 31» de la *Óptica* (1704), el libro en el que desveló numerosas propiedades de la luz —que él creía formada por pequeños corpúsculos— hasta entonces ignoradas (como el que la luz blanca está compuesta en realidad por colores «simples» o «elementales»).

Aunque sin duda es sorprendente que el maestro de la racionalidad matemático-experimental buscara los secretos de la naturaleza fuera de ésta, lo cierto es que Newton creía que el mensaje divino que había estado alguna vez en las Sagradas Escrituras (eso sí, en las versiones no corrompidas) contenía también la explicación del funcionamiento de la naturaleza. Por ello, buscó las creencias religiosas de los antiguos, y escribió miles de páginas en las que pugnaba por reconstruir la verdadera religión, páginas que incluyen también libros, como *Observations upon the Prophecies of Holy Writ particularly the Prophecies of Daniel and the Apocalypse of St. John*, que sólo vería la luz pública en 1733, seis años después de que hubiese muerto.

Pero en un diccionario como éste, no es del Newton teólogo e historiador del que hay que hablar, por mucho, insisto, que sólo existiera un Newton, al que prejuicios falsamente científicos, han dividido en parcelas aparentemente inconexas, convirtiendo sus

intereses teológico-históricos en algo así como las inevitables —y si es posible inconfesables— extravagancias de un genio. Hay que referirse a aquel del que Voltaire (1694-1778) —un ferviente newtoniano— escribió (en su *Diccionario filosófico*): «Inventó el cálculo que se llama del infinito; descubrió y demostró el principio nuevo que hace mover toda la naturaleza. No se conoció la luz antes de que él la estudiara, sólo se tenía de ella ideas confusas y falsas. Inventó los telescopios de reflexión».

Entre las joyas científicas newtonianas, hay una que sobresale entre todas: el ya citado *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), el libro científico más importante jamás escrito. Los *Principia* contienen la esencia de la dinámica (la rama de la física que se ocupa del movimiento de los cuerpos), tal y como sería aceptada hasta 1905, cuando Albert Einstein desarrolló una teoría —la relatividad especial— que hacía de la formulación newtoniana un caso particular (para velocidades pequeñas comparadas con la de la luz). Para la mayoría de los fenómenos físicos que observamos seguimos utilizando todavía las tres leyes clásicas de la mecánica newtoniana, aquellas que nos dicen que: 1) en ausencia de fuerzas, todos los cuerpos continúan en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta; 2) masa por aceleración (variación de la velocidad con respecto al tiempo) es igual a la fuerza; y 3) que a toda acción se le opone una reacción de igual magnitud. El Libro Tercero de los *Principia*, titulado nada menos que «El sistema del mundo», aplicaba estas leyes al movimiento de los cuerpos celestes. Hasta entonces, la humanidad había considerado como fenómenos diferentes la caída de objetos en nuestro entorno y los movimientos de los planetas y demás cuerpos celestes. Newton eliminó tal diferencia: la Tierra atraía a una manzana, igual que atraía a la Luna, a Marte o al Sol, y éstos, a su vez, la atraían a ella. Y todo con el mismo tipo de fuerza: directamente proporcional al producto de las masas de los dos cuerpos en cuestión e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. El movimiento cósmico era el producto, la situación de equilibrio dinámico, de todas esas fuerzas.

Con este instrumental conceptual y analítico, auxiliado por nuevas técnicas matemáticas (el cálculo de fluxiones, una versión geométrica y menos poderosa que la formulación desarrollada más o menos simultánea e independientemente por Leibniz) que él mismo inventó, Newton fue capaz de explicar y predecir con precisión las trayectorias de los planetas, incluso —él, que parece que nunca vio el mar— intentó dar cuenta de las mareas, tan importantes para su país, que en su teoría surgían como meras consecuencias de la atracción que la Luna ejerce sobre la Tierra. Ansioso de disponer del mayor número posible de datos relativos al movimiento lunar, Newton utilizó todos los recursos, en modo alguno escasos, de que disponía (su puesto de presidente de la Royal Society, por ejemplo) para acceder a los datos penosa y lentamente acumulados por el astrónomo real, John Flamsteed (1646-1719). Hay quienes asocian a la genialidad un desarrollo anormalmente grande del individualismo, del, sería más adecuado expresarlo así, egoísmo. Isaac Newton proporciona, desde luego, argumentos a los que piensan de esta manera.

Una de las características más llamativas de la física newtoniana es que las fuerzas a las que recurre son del tipo de «acción a distancia» [véase INTERACCIÓN]. La fuerza de esta clase —repito lo que ya señalé— que relaciona a dos cuerpos no necesita de ningún sustrato que la transporte: ejerce su capacidad de influencia de una manera aparentemente milagrosa, inexplicable mecánicamente. Además, en el caso newtoniano, instantáneamente. La mayoría de los contemporáneos de Newton encontraron repugnante este tipo de interacción. Era mucho más satisfactoria conceptualmente la imagen que Descartes

defendía, en la cual el universo estaba lleno de unos vórtices de materia sutil, que arrastraban a lo largo de sus torbellinos a los cuerpos celestes.

El propio Newton no creía en las acciones a distancia, pero fue lo suficientemente buen físico como para elevarse por encima de sus expectativas. En una carta que escribió a Richard Bentley (1662-1742) (el 25 de febrero de 1693) se pronunció sobre estos puntos: «Es inconcebible que la materia bruta inanimada opere y afecte (sin la mediación de otra cosa que no sea material) sobre otra materia sin contacto mutuo, como debería ser si la gravitación en el sentido de Epicuro es esencial e inherente a ella. Y ésta es la razón por la que deseo que no me asocie con la gravedad innata. Que la gravedad sea innata, inherente y esencial a la materia de forma que un cuerpo pueda actuar a distancia a través de un vacío sin la mediación de otra cosa con la cual su acción o fuerza puede ser transmitida de [un lugar] a otro, es para mí algo tan absurdo que no creo que pueda caer en ella ninguna persona con facultades competentes de pensamiento en asuntos filosóficos. La gravedad debe ser producida por un agente que actúe constantemente según ciertas leyes, pero si este agente es material o inmaterial es una cuestión que he dejado a la consideración de mis lectores».

No creía, filosóficamente, en la acción a distancia, pero como científico la utilizaba y, en este sentido, aceptaba. En este punto —como en otros— sí que fue el primero de los modernos y no el último de los antiguos.

En la historia del pensamiento no faltan los casos de grandes creadores que vivieron y murieron sin alcanzar ningún tipo de reconocimiento público o profesional. Isaac Newton no perteneció a esta categoría. Inglaterra y el mundo civilizado le honraron con generosidad y prontitud. En Inglaterra llegó a alcanzar una posición oficial tan notable (y rentable) como la dirección de la Casa de la Moneda. La influencia de los *Principia*, que marcó el punto culminante de la Revolución Científica, no se vio confinada a la física matemática y mecánica celeste, sino que se extendió, como modelo a imitar, a todas las ciencias. La filosofía de la naturaleza newtoniana afectó profundamente al pensamiento político y social, a ideas relativas a la religión, e incluso al arte. Montesquieu (1689-1755) escribió sobre la gravedad universal newtoniana o «poder de gravitación» en la exposición del «Principio de Monarquía» de su *Esprit des Lois*, y John Adams (1735-1826) invocó la tercera ley del movimiento de Newton al defender la nueva Constitución de Estados Unidos. John T. Desaguliers (1683-1744) escribió un tratado político titulado *El sistema newtoniano del mundo, el mejor modelo de gobierno*.

A pesar de que otras construcciones físicas han superado, en la mecánica, la gravitación y, sobre todo, la luz, sus conceptos y teorías, la manera newtoniana de aproximarnos a la realidad no nos ha abandonado completamente. Pasarán aún generaciones antes de que logremos mirar a la naturaleza en términos más acordes con los conceptos relativistas o cuánticos, que, por el momento al menos, consideramos más «verdaderos», y que sólo incluyen a los newtonianos como límites en situaciones muy concretas.

Aquellos que se acerquen a su tumba, en la abadía de Westminster, en Londres, podrán leer en la lápida que cubre sus restos, unas palabras que hacen justicia a tanta inteligencia, energía y pasión como desplegó Newton a lo largo de su vida: «*Sibi gratulentur Mortales, tale tantumgue extitisse Humani generis decus*» («Alégrense los mortales de que haya existido tal y tan gran ornamento de la raza humana»).

NUCLEOSÍNTESIS. Hay pocas cosas que me impresionen más que el saber que, de alguna manera, he estado —que todos hemos estado— en el interior de una estrella. Es

cierto que, en un sentido parecido (aunque algo más indirecto) también podría decir que he estado en los primeros instantes de la vida del universo, pero esto impresiona, subjetivamente, algo menos, ya que, al fin y al cabo, todo procede de aquel origen.

Lo que quiero decir cuando hago esta manifestación, es que sabemos que muchos de los elementos químicos que nos forman sólo se han podido crear, mediante procesos termonucleares, en esos hornos gigantescos que son las estrellas.

Pero vayamos por partes. La nucleosíntesis es un proceso mediante el cual se forman elementos químicos más complejos a partir de otros más sencillos, o, incluso, de partículas elementales. Existen dos tipos de nucleosíntesis: la «primordial», que tuvo lugar en los primeros instantes del universo, según el modelo del *big bang*, y la «estelar», que tiene lugar en el interior de estrellas.

Empecemos por la nucleosíntesis primordial. El universo primitivo era un lugar muy caliente, tanto que ni siquiera era posible que protones y neutrones se uniesen para formar núcleos. Diez segundos después del *big bang* todavía seguían sin formarse apenas núcleos; el universo estaba lleno de un gas de fotones y neutrinos, con una mucho más pequeña densidad de protones, neutrones y electrones, las partículas «elementales» que más tarde serían las piezas básicas en la construcción de galaxias, estrellas y planetas. La radiación dominaba sobre la materia. Según se fue enfriando el universo, los neutrones y protones comenzaron a agruparse formando núcleos. Pronto (a partir de alrededor de los catorce segundos, a una temperatura de tres mil millones de grados Kelvin) comenzaron a captar electrones, formándose los primeros elementos: isótopos de hidrógeno —como el deuterio o el tritio— y helio. Aproximadamente tres minutos después del gran estallido inicial, el universo estaba formado, radiación aparte, por entre veintidós y veintiocho por ciento de núcleos de helio, siendo el resto núcleos de hidrógeno, ambos en sus estados normales, aunque también quedaron rastros de deuterio (hidrógeno pesado, que tiene un neutrón adicional) y helio ligero (con tres neutrones, en lugar de cuatro).

A la media hora de vida del universo, cuando su temperatura media era de unos trescientos millones de grados, los procesos nucleares se detuvieron completamente, sin que hubiese variado esencialmente la composición que había adquirido a los tres minutos. Continuó, no obstante, su expansión y enfriamiento, un proceso que permitió que setecientos mil años después la temperatura llegase al punto en el que los núcleos pudieron captar y retener electrones formando átomos estables. El escenario para la formación de estrellas, planetas y galaxias estaba ya servido.

Pero retornemos, por un momento, a los seres humanos. El hidrógeno es, desde luego, muy importante para la vida en general, y para la nuestra en particular. Sin embargo, somos mucho más que hidrógeno. La mayoría de los organismos contemporáneos están formados —ya lo dije [véase AGUA]— en el 70-80 por ciento de agua, esto es de H₂O, de hidrógeno y de oxígeno. Y si nos fijamos en los bloques constitutivos de la herencia, en los nucleótidos del ADN, éstos, recordemos, están formados por carbono, nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y fósforo. Pero necesitamos, además, de muchos otros elementos, como calcio, azufre, hierro... Nos encontramos, por tanto, con elementos más pesados y complejos que el hidrógeno y el helio (éste, por cierto, no desempeña un gran papel en nuestra vida, por ser muy ligero y porque no se combina con otros elementos; es uno de los denominados gases nobles), elementos que no se formaron, como hemos visto, en los primeros instantes y años del universo.

Llegamos así a la «nucleosíntesis estelar», a los procesos de reacciones nucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas. De una forma sin duda superficial (todavía

existen lagunas en este campo), se puede decir que fue a partir de la condensación gravitacional del hidrógeno y helio primordiales que se formaron las estrellas y las agrupaciones de éstas (más polvo interestelar) que son las galaxias. Dejaré a los planetas para más adelante.

La presión provocada por la acumulación gravitacional de masa tiene como consecuencia el aumento de temperatura en las capas interiores de las protoestrellas y estrellas, aumento que produce reacciones nucleares. Gracias a las investigaciones de físicos nucleares y astrofísicos (entre los que sobresalen algunos como Arthur Eddington [1882-1944], George Gamow [1904-1968], Subrahmanyan Chandrasekhar [1910-1995], Hans Bethe [1906-2005], William Fowler [1911-1995] y Fred Hoyle [1915-2001]) ha sido posible reconstruir las reacciones nucleares que parecen más importantes. Una de estas reacciones es la siguiente [véase también FUSIÓN NUCLEAR]: dos núcleos de helio chocan y forman un átomo de berilio, que ocupa el cuarto lugar (número atómico) en la tabla periódica de los elementos, tras el hidrógeno, helio y litio (su peso atómico es poco más de 9, frente a 1 para el hidrógeno, 4 para helio y 6 para el litio). El isótopo de berilio (de peso atómico 8) producido en esa reacción es muy radiactivo, existiendo durante apenas un instante (una diezmilbillonésima de segundo), tras el cual se desintegra produciendo de nuevo dos núcleos de helio. Pero si durante ese instante de vida el berilio choca con un tercer núcleo de helio puede formar uno de carbono (número atómico 6), que además es estable. Si las temperaturas son suficientemente elevadas, los núcleos de carbono se combinan y desintegran de maneras muy diversas, dando lugar a elementos como magnesio (número atómico 12), sodio (11), neón (10) y oxígeno (8). A su vez, los núcleos de oxígeno pueden unirse y formar azufre y fósforo. De este modo, se forman elementos cada vez más pesados. Hasta llegar al hierro (26). A partir del hierro la cadena de reacciones nucleares se detiene. La razón es que los procesos de fusión nuclear asociados a los elementos por debajo de él en la tabla periódica liberan energía, pero para los que son más pesados que el hierro la energía que se necesita para fusionarlos es mayor que la liberada en el proceso de fusión; requiere aporte de energía y no es energéticamente productiva.

Este hecho nos lleva a otra cuestión, ligada a su vez con otra que todavía no he abordado: la de cómo nos han llegado estos elementos a la Tierra y, si suponemos que no deben existir diferencias absolutas entre nuestro planeta y otros, únicamente en detalles como abundancias de elementos, temperaturas, posibilidad de que exista vida, a cualquier otro planeta. La emisión al espacio exterior de elementos nucleares producidos en el interior de estrellas puede realizarse de tres maneras: mediante la lenta pérdida de masa en estrellas viejas, en la denominada fase «gigante» de la evolución estelar; durante los relativamente frecuentes estallidos estelares que los astrónomos denominan «novas»; y en las dramáticas y espectaculares explosiones que se producen en esa etapa estelar final que alumbran las denominadas «supernovas» (en 1987 se detectó la explosión de uno de estos objetos, la supernova SN1987A; realmente, sin embargo, la explosión había tenido lugar 170 000 años antes, el tiempo que ha tardado la luz en llegar a la Tierra). Utilizando una metáfora introducida por William Fowler, podríamos decir que «las supernovas pueden ser consideradas la muerte de las estrellas, pero las enanas blancas o estrellas de neutrones o agujeros negros que dejan tras ellas pueden representar una especie de purgatorio».

Es sobre todo en la explosión de supernovas que los elementos pesados «fabricados» en la nucleosíntesis estelar se difunden por el espacio. No se conocen demasiado bien los mecanismos por los que se producen estas explosiones, pero se cree que además de expulsar los elementos que acumulaba la estrella en su interior (salvo parte que

retiene convertidos en objetos muy peculiares, como estrellas de neutrones), en el estallido se sintetizan elementos todavía más pesados; elementos como el cobre, cinc, rubidio, plata, osmio, uranio, y así hasta una parte importante de los más de cien elementos que contiene en la actualidad la tabla periódica, y que son relativamente abundantes en sistemas estelares como el nuestro, el sistema solar. (El resto de los elementos que aparecen en la tabla periódica tienen una vida demasiado efímera para tomar parte en procesos como éstos).

Precisamente por esa abundancia de elementos pesados, parece razonable pensar que el Sol es una estrella de segunda generación, formada, hace unos cuatro mil quinientos millones de años, por la condensación de residuos de una estrella anterior que murió en una explosión de supernova. Dentro de unos seis mil millones de años —nos explica también la astrofísica— la zona central del Sol, en la que el hidrógeno se convierte en helio, aumentará de tamaño a medida que el hidrógeno se vaya consumiendo. Y cuando ese núcleo de helio alcance un tamaño suficiente, el Sol se dilatará hasta convertirse en una gigante roja. En ese momento la superficie terrestre estará tan caliente como para fundir el plomo, los océanos hervirán y la vida en la Tierra llegará a su fin. La física nuclear y astrofísica dan así vida al universo: es posible hablar de generación de estrellas, de vida y de muerte de lo que tendemos a contemplar como inanimado, como «inorgánico».

La Tierra, al igual que otros planetas, es, desde esta perspectiva, algo parecido a un pequeño basurero cósmico, un lugar en el que se han acumulado restos de la vida de estrellas, no lo suficientemente importantes como para dar lugar a una estrella; esto es, en cantidades tan pequeñas que no han podido desencadenar en su interior reacciones termonucleares como las que se producen en las estrellas. Pero al igual que en los basureros también se abre camino la vida, así ocurrió en esta Tierra nuestra. Nosotros somos testigo y demostración de este —no sé si llamarlo paradójico— fenómeno.

O

ORDENADOR. Instrumento electrónico que procesa datos y realiza cálculos y otras tareas de manipulación de símbolos. También se los denomina computadores. Existen tres tipos de ordenadores: «digitales», que manipulan información codificada en sistemas binarios [véase DIGITAL]; «analógicos», que trabajan con magnitudes que varían de manera continua, e «híbridos», que tienen características de los dos anteriores.

Los ordenadores/computadores actuales son los descendientes electrónicos de los computadores mecánicos, el primero de los cuales fue concebido por el matemático inglés Charles Babbage (1792-1871) en 1835, aunque nunca llegó a construirlo. Más de un siglo después, en 1943, Thomas Flowers construyó «Colossus», el primer computador electrónico. Con Flowers trabajó Alan Turing (1912-1954), que siete años antes había publicado un artículo sobre la teoría de las máquinas computadoras que ha ejercido una influencia considerable en este campo. En 1949, John von Neumann (1903-1957) construyó «EDVAC», el primer computador que utilizó una aritmética binaria y que almacenaba en su interior las instrucciones para funcionar. Su diseño todavía constituye la base de los ordenadores actuales.

OZONO, AGUJERO DE LA CAPA DE. El ozono es una molécula formada por tres átomos de oxígeno (O₃), que desempeña un papel importante en la química de la atmósfera de la Tierra, a pesar de que constituye una parte muy pequeña de ella. La mayor parte del ozono atmosférico se encuentra en una capa de alrededor de 20 kilómetros de espesor, situada a una altura de entre 25 y 30 km; se halla, por consiguiente, sobre todo en la estratosfera.

Para la vida en nuestro planeta, el ozono es especialmente importante ya que absorbe radiación ultravioleta procedente del Sol. La importancia de este hecho radica en que radiaciones con longitudes de onda menores de alrededor de 29×10^{-8} metros (o 290 nanómetros) dañan a las macromoléculas, como, por ejemplo, proteínas y ácidos nucleicos, que son, recordemos, esenciales para las células vivas. Los componentes principales de la atmósfera, como el oxígeno ordinario (O₂) absorben radiación ultravioleta (RUV) de hasta 230 nm de longitud de onda, con el resultado de que para estas frecuencias solamente en torno a una parte en 10^{16} de la intensidad de radiación solar llega a la superficie terrestre. Pero para longitudes de onda mayores de 230 nm sólo disponemos del ozono como pantalla protectora. Además, el ozono es muy eficiente: sus características químicas son tales que absorbe mucha energía, entre 230 y 290 nm, lo que compensa su pequeña concentración; por ejemplo, para una longitud de onda de 250 nm, solamente una parte en 10^{30} de la radiación solar incidente atraviesa la capa de ozono.

Naturalmente, lo que se pierde por un lado, se gana por otro, y la energía que absorbe de esta manera el ozono estratosférico, la elimina cediéndola a la atmósfera de su entorno, que de esta forma se calienta. Tal aumento de temperatura en la región de la capa de ozono influye profundamente en la estructura de las temperaturas atmosféricas, así como en la estabilidad y corrientes de convección de las capas altas de la atmósfera.

En cuanto a cómo se forma el ozono, lo hace a partir del oxígeno atmosférico, en reacciones favorecidas por energía procedente también de la absorción de luz solar ultravioleta. A su vez, este oxígeno es de origen mayoritariamente biológico. En otras palabras, el ozono necesario para proteger la vida depende, él mismo, de la propia vida para llegar a existir. La naturaleza es, ciertamente, un complejo y altamente interconectado

sistema.

La mayoría de los procesos a los que he hecho referencia son conocidos desde hace más de medio siglo, pero ha sido únicamente en las cuatro últimas décadas cuando han tenido lugar procesos y descubrimientos que han modificado radicalmente nuestra percepción de la situación. Todo empezó con la creación, en la década de 1920, de unos nuevos compuestos químicos, conocidos como clorofluorocarbonos (CFC). El hallazgo se produjo en los laboratorios de uno de los gigantes de la industria química: la estadounidense Du Pont. Sus químicos idearon un nuevo propelente —mezcla de dos gases, dos compuestos de cloro, flúor y carbono— que podía ser almacenado en pequeñas latas de metal (también en aparatos de refrigeración o para formar las burbujas en plásticos celulares). Sólo faltaba que se inventase una válvula que pudiese hacer salir el contenido de la lata apretando con el dedo, algo que ocurrió en la década de 1950. A partir de entonces, los llamados aerosoles inundaron los mercados, conteniendo todo tipo de productos (desde desodorantes hasta insecticidas), que eran expulsados, atomizados, por el CFC que contenían. Se fabricaron millones y millones de aerosoles, y cada uno contribuía con una modesta, pero no nula, cantidad de CFC a la atmósfera. Nadie, no obstante, veía un problema en ello. Hasta que tres científicos, un ingeniero holandés que ha hecho de la química su hogar intelectual, Paul Crutzen (1903), y dos químicos, el estadounidense Sherwood Rowland (1927) y su estudiante posdoctoral, el mexicano (que terminó instalándose definitivamente en Estados Unidos) Mario Molina (1943), mostraron, en la primera mitad de la década de 1970, el serio problema que se estaba ocasionando.

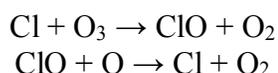
Por sus contribuciones, estos tres científicos recibieron el premio Nobel de Química correspondiente a 1995. Precisamente en la ceremonia de presentación de los galardones, Ingmar Grenthe, de la Academia Sueca de Ciencias, resumió de manera magnífica las contribuciones del trío. «Hace alrededor de treinta años», dijo entonces, «los humanos fueron capaces de observar, por primera vez, nuestro planeta desde el espacio. Vimos blancas formaciones de nubes, vegetación verde y suelos y montañas marrones. Desde el espacio, podríamos ver y estudiar la Tierra en su conjunto. Hemos llegado a comprender que influimos y somos influidos por nuestra biosfera, nuestra área vital. Uno de los objetivos de la ciencia es describir y explicar cómo sucede esto. En sus investigaciones sobre las reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera terrestre, los laureados con el premio Nobel de Química —Paul Crutzen, Mario Molina y Sherwood Rowland— han adoptado esta perspectiva global».

A continuación, Grenthe explicaba la importancia del ozono para absorber radiación ultravioleta, explicando mecanismos que ya he comentado hace un momento, y recalando que «se ha tardado cientos de millones de años para que la biosfera llegue a tener la composición atmosférica que tiene hoy». En este punto comenzaba a explicar las contribuciones de los tres químicos: «Los laureados de este año han llevado a cabo una serie de contribuciones mayores a nuestro conocimiento de la química atmosférica. Éstas han incluido estudiar cómo se forma y descompone el ozono y cómo puede verse afectado por sustancias químicas existentes en la atmósfera, muchas de las cuales son producto de actividades humanas. En 1970, Crutzen demostró que óxidos de nitrógeno, formados durante procesos de combustión, podrían afectar al ritmo de disminución del ozono en la estratosfera. Sugirió que el óxido nítrico, popularmente conocido como “gas de la risa” y que se forma a través de procesos microbiológicos en la Tierra, podría tener el mismo efecto. También ha estudiado la formación del ozono en la baja atmósfera. El ozono es uno de los ingredientes del *smog*, que se forma por la influencia de la radiación solar en aire

contaminado, específicamente gases emitidos por motores de vehículos y otros sistemas de combustión. Mientras que el ozono estratosférico es un prerrequisito para la vida, el ozono troposférico es fuertemente tóxico y dañino para muchos organismos, incluso en pequeñas cantidades». «En 1974», añadía, «Mario Molina y Sherwood Rowland demostraron que compuestos de cloro formados por la descomposición fotoquímica de clorofluorocarbonos (CFC) podían descomponer el ozono estratosférico. Presentaron hipótesis detalladas de cómo tienen lugar estos complicados procesos».

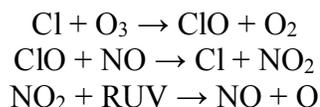
Uno de los procesos principales que estos científicos explicaron es el siguiente. Consideremos uno de esos clorofluorocarbonos, el CClF_3 , por ejemplo. Éste recibe radiación ultravioleta, descomponiéndose en CF_3 , por una parte, y Cl (cloro), por otra; se libera cloro, por tanto, en la atmósfera.

Este cloro se combina con el ozono según varios ciclos. El más sencillo es el siguiente:



El saldo neto de estas dos reacciones es, por un lado, que el ozono se convierte en oxígeno normal ($\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2$), y que el cloro continúa libre, con lo que puede reanudarse el ciclo, que destruye más ozono.

Otro ciclo es el que interviene, como catalizador, un compuesto del nitrógeno, NO (óxido nítrico):



También aquí, el saldo es poco favorable para el ozono:



esto es, el ozono se destruye, dando lugar al químicamente diferente O_2 , más átomos de oxígeno, y el cloro sigue libre.

La presencia del óxido nítrico, que como el cloro se regenera en este ciclo, tampoco debe pasar desapercibida. El nitrógeno es, con mucho, el constituyente más abundante de la atmósfera (forma el 79 por ciento de ella), de manera que se puede disponer de él fácilmente para formar óxidos, que contribuyen a hacer desaparecer el ozono. Una manera de producir NO es en la combustión que tiene lugar en aviones supersónicos, como el ya no operativo *Concorde*, y en vehículos espaciales (afortunadamente no hay muchos).

Que estos fenómenos se producen en realidad, es algo que comenzó a hacerse especialmente patente en la primavera de 1985, cuando se detectó sobre la Antártida una rápida, dramática, disminución de ozono. Investigaciones posteriores demostraron que este agujero en la capa de ozono se debía, efectivamente, a la presencia de átomos de cloro en la estratosfera, procedentes a su vez de la ruptura de CFC. A partir de entonces fueron cada vez más frecuentes las noticias de nuevos «agujeros en la capa ozono» (en Argentina se llegó a detectar una pérdida, estacional, del 30 por ciento de su capa de ozono; 80 por ciento sobre la Patagonia).

Como reacción ante estos hechos, en 1987 la ONU redactó el denominado Protocolo de Montreal, que reclamaba una reducción del 50 por ciento en las emisiones de CFC para 1999. Ante el aumento de las evidencias, pronto se exigió una prohibición total

en el empleo de estos gases: en 1992 se adelantó la fecha de 1999 al 1 de enero de 1996, prohibiéndose totalmente su producción. Las mediciones realizadas últimamente confirman que la emisión de CFC ha cesado prácticamente, aunque ello no evita que se estime que se ha perdido entre el 10 y el 15 por ciento de la capa de ozono. El consuelo es que sin la química podía haber sido peor, terriblemente mucho peor. No es por ello demasiado exagerado, aunque no se incluya a Creutzen y Molina, que una revista norteamericana apodase a Rowland «el hombre que salvó al mundo».

Parece que por esta vez nos hemos salvado, o terminaremos salvándonos de esos agujeros en la capa de ozono que podrían producir cánceres y cegueras, entre otros males. Y ha sido gracias al conocimiento científico. No lo olviden.

P

PARTÍCULAS ELEMENTALES. Concepto que ha desempeñado un papel central en las ideas que desde la antigüedad se han sostenido sobre la constitución de la materia, pero que parece estar perdiendo consistencia con el desarrollo de la física teórica de altas energías.

La primera partícula considerada «elemental» descubierta fue el electrón, que en 1897 el físico inglés Joseph J. Thomson (1856-1940) identificó (en los rayos catódicos) como un componente universal de la materia. Si el electrón estaba cargado negativamente, y el átomo es neutro (la materia normal no está cargada), era inmediato concluir que debía existir otro tipo de partícula elemental, cargada positivamente: el protón, cuya masa se midió en el elemento químico más sencillo, el hidrógeno, formado —en su forma isotópica más habitual— por un protón nuclear y un electrón orbital. En 1905, Albert Einstein introdujo otra partícula elemental cuando propuso, dentro del contexto de la física cuántica, que la luz también está formada por partículas. Estos corpúsculos lumínicos, a los que se terminó dando el nombre de «fotones», tienen propiedades muy peculiares, no la menor de ellas el poseer masa nula (tampoco llevan carga eléctrica). Más tarde, en 1932, James Chadwick (1891-1974) descubrió el neutrón, o partícula elemental eléctricamente neutra. A partir de entonces, y aunque se ha continuado entendiendo y visualizando a los átomos de los distintos elementos como combinaciones de protones y neutrones (en el núcleo) rodeados de electrones situados en cuánticamente difusas capas, ha proliferado el número de partículas «elementales».

Ayudados por los cada vez más grandes y potentes aceleradores de partículas, los físicos y químicos nucleares han llegado a identificar más de trescientas partículas «elementales», entre las que se incluyen las «antipartículas» (cada partícula tiene su propia antipartícula, con la que solamente le diferencia el signo de la carga eléctrica; la antipartícula del electrón se denomina positrón; el fotón, sin embargo, es su propia antipartícula). Dependiendo de su masa y otras características, se clasifica normalmente a estas partículas en «bariones» (partículas pesadas, como el protón y el neutrón), «leptones» (ligeras, como el electrón) y «mesones» (de masa intermedia); aunque también existen otros tipos de clasificación, como la de fermiones y bosones, según obedezcan o no al principio de exclusión introducido por Wolfgang Pauli (1900-1958), o se habla de «hadrones» (las partículas que «sienten» la interacción fuerte, que tiene lugar en el núcleo atómico).

La mayoría de las nuevas partículas descubiertas después del neutrón tienen una vida muy efímera: son creadas en los choques a grandes energías que se producen entre otras partículas en aceleradores. La energía liberada en tales procesos se convierte —gracias a la equivalencia relativista entre masa y energía [véase $E = MC^2$]— parcialmente en nuevas partículas, de masa tanto más grande cuanto mayor sea la energía que puede alcanzar el acelerador. En este hecho se encuentra la razón por la que los físicos que trabajan en este campo (denominado «de altas energías») pugnan por que se construyan aceleradores cada vez más grandes (el último gran proyecto, que el Congreso estadounidense rechazó financiar en 1993, cuando ya habían comenzado los trabajos de excavación del túnel, fue el «Supercolisionador Superconductor», cuya circunferencia iba a tener un perímetro de 85 kilómetros).

No se trata, por consiguiente, de que se rompan las partículas en otras más pequeñas

y básicas, sino que las propiedades de la naturaleza son tales que pueden crearse, a partir de energía, nuevas partículas que desempeñan roles fundamentales en ciertas situaciones (algunas, como el fotón, sirven para «transportar» interacciones; son sus *cuantos*). Es obvio que semejante proliferación no favorece la idea de la «elementalidad» de las partículas elementales, de que constituyen los bloques indivisibles de que está constituida la materia; más bien sugiere, como pensaban los energeticistas de la segunda mitad del siglo XIX, que es la energía el concepto primario de la naturaleza.

En 1963-1964, sin embargo, se produjo un desarrollo que modificó sustancialmente la situación que acabo de describir: Murray Gell-Mann (1929), un físico teórico del Instituto Tecnológico de California y uno de los científicos más distinguidos de la segunda mitad del siglo XX, propuso que los hadrones, las partículas como el protón y el neutrón, que responden a la interacción fuerte, no son realmente elementales, sino que están formadas por otras partículas más, ellas sí, elementales: los *quarks*, nombre extraído de una canción incluida en el capítulo 4 del libro segundo de *Finnegans Wake*, de James Joyce («Three quarks for muster Mark!»). Inicialmente, el número de quarks era de tres (más sus correspondientes antiquarks): *u* (*up*: arriba), *d* (*down*: abajo) y *s* (*strange*: extraño). Más tarde, sin embargo, y para explicar otros fenómenos (como la existencia del mesón J/psi, descubierto en 1974 por Burton Richter y Samuel Ting), se introdujeron otros nuevos, como *c* (*charm*: encanto), *b* (*botton*: fondo), *t* (*top*: techo).

Son varios los rasgos llamativos de los quarks. Uno es que poseen carga eléctrica fraccionaria (en las mismas unidades en que el electrón tiene carga -1). El protón, por ejemplo, está formado por dos quarks *u*, cada uno con carga $2/3$, y uno *d* de carga $-1/3$. Otra de sus peculiaridades es que están «confinados», esto es, atrapados permanentemente en las partículas que forman; por eso, sólo observamos cargas enteras y no fraccionarias. Ahora bien, para que los quarks permanezcan confinados, deben existir fuerzas entre ellos muy diferentes de las conocidas. Con este fin se introdujo la siguiente idea: al igual que la fuerza electromagnética entre electrones está mediatizada por el intercambio de fotones, el cuanto de esa interacción, los quarks están ligados entre sí por una fuerza que transportan unos cuantos denominados *gluones* (del inglés *glue*: pegamento). La teoría cuántica que describe esta interacción se denomina «cromodinámica cuántica», nombre tomado a partir de una propiedad (un número cuántico, como puede ser el espín) de los gluones, a la que se denomina «color». Nos encontramos de esta manera con que la interacción fuerte pierde una parte de su privilegiada posición, hasta el punto que Gell-Mann ha escrito: «La fuerza nuclear no es fundamental, sino que surge como efecto secundario de la fuerza de color, que a su vez procede de la interacción entre quarks y gluones». A pesar de ello, todavía —como todo el mundo— continúo hablando en este diccionario de las «cuatro interacciones físicas conocidas», entre las que incluyo a la fuerte.

Pese a que los quarks están confinados y no pueden detectarse directamente, se han realizado ingeniosos experimentos que han confirmado su existencia. En 1994, por ejemplo, se logró detectar el quark *t*.

¿Nos encontramos ya ante los últimos bloques constitutivos de la materia? Sería aventurado afirmar tal cosa. De hecho, en los últimos años se ha desarrollado una notable teoría, denominada de supercuerdas, que ofrece algunas posibilidades de lograr una unificación completa de las cuatro interacciones físicas, en la que los constituyentes fundamentales de la naturaleza se entienden no como partículas o como ondas, sino como pequeñas «cuerdas», bien abiertas o cerradas, uniéndose y rompiéndose continuamente. Cada cuerda puede vibrar de muchos modos y se supone que las vibraciones (cuánticas) de

estas cuerdas se encuentran en relación biunívoca con las diversas especies de partículas elementales. Como ha señalado recientemente Francisco Yndurain: «Con una analogía poética (y un tanto cursi) podríamos comparar el cosmos con un violín, y a sus distintas notas con las partículas: el *la* tal vez sería un electrón, el *mi* quizá un quark, y al *fa* podríamos interpretarlo como un fotón».

¡Curioso destino el nuestro! Cada vez sabemos más acerca de la naturaleza, pero en el camino vamos perdiendo aquello que ésta tenía de intuitivo, palpable y accesible. La materia, lo más próximo y concreto que poseíamos, parece irse diluyendo en los arcanos ontológicos, abandonando su esencia física, para pasar a convertirse en matemática, en modos de vibración de superminúsculos entes que habitan en espacios de, al menos, diez dimensiones.

PI (π). Letra griega que representa el número 3,14159... y que introdujo en la matemática Leonhard Euler (1707-1783) en 1737.

Hace algo más de treinta años, Eugene Wigner, premio Nobel de Física (1963) por sus contribuciones al conocimiento de la interacción de los protones y los neutrones en el interior del núcleo atómico, contaba la siguiente historia: dos antiguos compañeros de escuela —Laslo y Max, por ejemplo— se encuentran y comienzan a hablar de cómo les ha ido en la vida, de sus respectivas profesiones. Uno de ellos, Laslo, se hizo estadístico y estaba trabajando en movimientos de poblaciones. Para que Max comprendiese mejor en qué consistía su trabajo, le enseñó un artículo que casualmente llevaba consigo. El artículo en cuestión comenzaba con una distribución gaussiana, algo frecuente en estadística, y Laslo se puso a explicar a su viejo condiscípulo el significado de los símbolos empleados para población actual, promedio de población, etc. Max, al que la vida no lo había acercado a la ciencia, parecía un poco incrédulo y no estaba seguro de si su amigo le estaba tomando el pelo. «¿Cómo puedes saber eso?», preguntó. «¿Y qué símbolo es éste?». «¡Oh!», dijo Laslo, «esto es π ». «¿Y qué es eso?». «El valor que se obtiene al dividir la longitud de una circunferencia por su diámetro». «Ahora sí que has ido demasiado lejos —exclamó entonces Max—, ¡qué narices tendrá que ver la población con la longitud de una circunferencia!».

Esta anécdota, sin duda apócrifa, tiene diversas lecturas. Una de ellas es lo que el mismo Wigner ha denominado la «irrazonable efectividad de la matemática» en la naturaleza, cuestión de la que me ocupo en otros lugares de este diccionario, y a la que no es necesario volver en este momento. Otra es introducir la importancia del número π , y a través de él de otros números.

La matemática es una disciplina peculiar (también de esto hablo, recuerden, en la entrada que le he dedicado), plena de problemas que aunque parecen limitados a una de sus parcelas, se extienden en múltiples direcciones. La teoría de los números ejemplifica esta diversidad intrínseca. Algunos números, π entre ellos, adquieren vida propia, se convierten en mucho más que en meras cifras, en problemas a resolver con numerosas ramificaciones.

He elegido π , pero también podría haber tomado e , la base de los logaritmos naturales (2,718281...), o i , el número imaginario que representa, [SPECIAL_IMAGE-OEBPS/Images/raiz1.svg-REPLACE_ME](#), la raíz cuadrada de -1 (ambos fueron introducidos también por Euler, en 1736 y 1777, respectivamente). Existe, por cierto, una relación entre estos tres números, más el 0 y el 1 (se trata de una relación singular, puesto que relaciona los cinco números más importantes de la matemática):

$$e^{i\pi} + 1 = 0.$$

Una de las cuestiones más importantes relacionadas con π es si es o no un número racional o irracional; esto es, si se puede reducir a un cociente de enteros o no. (La primera demostración de «irracionalidad» la realizaron los matemáticos griegos con `SPECIAL_IMAGE-OEBPS/Images/raiz2.svg-REPLACE_ME`; se encontraron con este problema cuando trataban de medir la diagonal de un cuadrado de lado unidad. Como no es complicada, y para que mis lectores tengan una idea de lo que es una demostración matemática fundamental pero sencilla, la incluyo a continuación. Si suponemos que `SPECIAL_IMAGE-OEBPS/Images/raiz2.svg-REPLACE_ME` es racional podemos escribirlo como a/b , donde a y b son enteros, sin un factor común mayor que 1. Elevando al cuadrado la relación, se tiene $2 = a^2/b^2$, o $a^2 = 2b^2$; por consiguiente, a debe ser un número par, por ejemplo $a = 2c$. Entonces, $a^2 = 4c^2$, y en consecuencia, $b^2 = 2c^2$, lo que significa que b debe ser también un número par. Se ha llegado, por tanto, a que tanto a como b son pares, lo que quiere decir que tienen un factor común mayor que 1, el 2, con lo que hemos entrado en contradicción con la hipótesis de partida. En consecuencia —razonamiento por absurdo—, `SPECIAL_IMAGE-OEBPS/Images/raiz2.svg-REPLACE_ME` no puede ser racional).

Fue Johann Heinrich Lambert (1728-1777), quien logró demostrar (en 1761) que π es un número irracional (Euler había hecho lo propio con e en 1737). Intuitivamente, podría parecer que esa demostración habría puesto término a un problema al que muchos nos hemos referido, sin saber realmente en qué consiste, como el paradigma de lo absurdo: el de la cuadratura del círculo (la cuestión de si es posible construir un cuadrado de área equivalente a la de una circunferencia cualquiera, con auxilio exclusivo de regla y compás, o por medio de un número limitado de líneas rectas y de circunferencias); al fin y al cabo, π es el cociente entre el diámetro (que se puede equiparar a uno de los lados de un cuadrado) y el perímetro de una circunferencia. Pero, como decía antes, la matemática va tomando vida y complicándose paulatinamente, y la irracionalidad de π no resolvió el problema de la cuadratura del círculo. Para demostrar su imposibilidad hubo que probar que π era un número «trascendente», o, lo que es lo mismo, un número real no algebraico (los números algebraicos son raíces de un tipo de ecuaciones). Tal demostración se logró en 1882, por el matemático Ferdinand Lindemann (1852-1939).

Y ya que estamos en éstas, aprovecho para hacer notar que las demostraciones matemáticas —en teoría de números, como en otros campos— pueden tardar mucho, en el caso de que lleguen. La reciente demostración, por Andrew Wiles, del célebre teorema de Fermat, que trato en otra entrada de este diccionario [véase FERMAT], constituye un magnífico ejemplo en este sentido. Otras conjeturas todavía esperan su Wiles; como la realizada por el matemático alemán Christian Goldbach (1690-1764) en una carta a Euler en 1742, según la cual todo número par mayor que 2 es la suma de dos números primos. No se conoce ninguna excepción a esta regla (por ejemplo, $4 = 2 + 2$, $6 = 3 + 3$, $8 = 5 + 3$, $12 = 5 + 7 \dots$), pero no se ha encontrado aún una demostración analítica. Curiosa disciplina esta de la matemática; parece que sabemos cosas que, sin embargo, no podemos demostrar.

Pero no se preocupen, no pretendo seguir complicando estas explicaciones. Como les decía, mi intención era, simplemente, mostrarles algo de la vida y la importancia de los números, de esos constructos matemáticos que también poseen muchas veces realidad física.

POPPER (Karl). 1902-1994. Karl Popper no fue un científico, aunque en ocasiones pretendió —con escaso éxito— serlo, en los campos de la física cuántica y la biología evolutiva, sino un filósofo. Puede parecer, por tanto, sorprendente, que se lo

incluya en un diccionario científico (el caso de Leibniz, del que me ocupó en otro lugar, es muy diferente). Si lo traigo a esta ensayística reunión es porque representa uno de los esfuerzos más notables y ambiciosos, aunque a la postre frustrados, que se produjeron en el siglo XX por acercar la ciencia a la reflexión filosófica.

Fascinado al igual que otros filósofos (como los miembros del Círculo de Viena o los positivistas lógicos: Moritz Schlick, Rudolf Carnap, Philipp Frank, Hans Reichenbach, Otto Neurath o Herbert Feigl) por los éxitos y la fecundidad científica de la física relativista y cuántica, Popper pretendió —especialmente en su gran tratado *La lógica de la investigación científica* (1934, 1959)— identificar cuáles son las características básicas que definen el método científico (cuestión que él denominó el *problema de la demarcación*), para encontrar así un criterio que permitiera distinguir entre las ciencias empíricas y los sistemas metafísicos (en la acepción peyorativa de este —por otra parte, magnífico si miramos a la historia de la filosofía— término). Hoy sabemos que su respuesta —«ha de ser posible refutar por la experiencia un sistema científico empírico», «una teoría que no es refutable mediante ningún experimento imaginable no es científica»— no es correcta; que, en última instancia, siempre es posible y lícito, además de frecuente, imaginar explicaciones para *salvar* nuestras teorías del dudoso veredicto de las observaciones. Y algunos de los comportamientos de Popper apuntan —¡qué gran contradicción!— en esa misma dirección; en concreto sus trabajos con pretensiones científicas en el campo de la mecánica cuántica. Popper, en efecto, rechazaba la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica. Como buen realista le repugnaba aceptar que, en algún sentido, la «realidad» se creaba en el momento del colapso de la función de onda [véase MECÁNICA CUÁNTICA], y se esforzó por colaborar en el desarrollo de la denominada «interpretación estadística», en la que las características menos intuitivas, probabilistas, de la física cuántica se explican como resultado de la existencia de un gran número de partículas, cuyo comportamiento describiría la función de onda. Los esfuerzos de Popper, publicados bien en alguno de sus libros o en revistas científicas, sin duda que pueden calificarse de científicos, puesto que evitaban introducir elementos ajenos a la ciencia, pero formaban parte de lo que podríamos denominar un programa de investigación que procedía a remolque de los resultados a los que se llegaba con la mecánica cuántica tradicional; se trataba de explicar aquello que ya explicaba esa formulación pero con otros conceptos. A partir de los años setenta, con los análisis teóricos y resultados experimentales de los físicos John Bell (1928-1990) y Alain Aspect (1947), esta dimensión, en absoluto progresista, de tales corrientes de investigación se mostraron con todavía mayor claridad. De manera que no creo que sea demasiado injusto decir que el propio Popper no siempre siguió sus propias enseñanzas.

Tampoco nos han ayudado excesivamente, a la hora de intentar comprender cuál es la estructura lógica de la ciencia, las enseñanzas de otros filósofos —los Lakatos, Stegmüller, Hintikka o Bunge, entre otros—. Seguimos, en definitiva, sin saber si, desde un punto de vista lógico, hay algo que distingue realmente a la ciencia de otras disciplinas, sin duda con menor poder explicativo y predictivo. Desesperanzados de la capacidad de la lógica para resolver este problema, son muchos los que lo abordan en la actualidad desde la perspectiva de la historia y la sociología de la ciencia, buscando en la coyuntura histórica y en la maleable naturaleza humana la explicación que niega la rigidez de criterios de demarcación. Aun así, sabemos que, de alguna manera, Popper no andaba demasiado lejos de tener razón; que su idea —idealista, desprendida, generosa, en este pragmático y tacaño mundo nuestro— de la investigación científica se aproxima a lo que la ciencia es o debería

ser. «La ciencia —escribió en *La lógica de la investigación científica*— nunca persigue la ilusoria meta de que sus respuestas sean definitivas, ni siquiera probables; antes bien, su avance se encamina hacia una finalidad infinita (y, sin embargo, alcanzable): la de descubrir incesantemente problemas nuevos, más profundos y más generales, y de sujetar nuestras respuestas (siempre provisionales) a contrastaciones constantemente renovadas y cada vez más rigurosas».

Las ideas metodológicas de Popper han recibido una cierta atención por parte de un respetable (aunque no excesivamente grande) número de científicos, aunque dudo que su interés haya ido mucho más allá de manifestar su adhesión en algunas ocasiones (como en conferencias de carácter general), en las que siempre viene bien mostrar una cierta erudición e interés filosóficos. Más entusiasta y vehemente ha sido el fervor con que se han leído y difundido otras obras suyas, utilizadas para defender una filosofía (y economía) liberal a ultranza. Obras como *La miseria del historicismo* (1944) o *La sociedad abierta y sus enemigos* (1945), que al principio tenía intención de titular: *Falsos profetas: Platón-Hegel-Marx*. Marx fue siempre una de sus grandes «bestias negras», junto a Freud y Jung. No tanto Platón, o así lo entiendo yo, puesto que la idea del «Mundo 3» —el mundo de los «productos de la mente humana»—, que Popper introdujo en uno de sus artículos («Epistemología sin un sujeto cognoscitivo») de la década de 1970, tiene evidentes tintes platónicos.

Como decía al principio, creo que la filosofía de la ciencia de Karl Popper no resiste el peso de la crítica, basada tanto en la propia lógica que él pretendía introducir en sus análisis, como de la historia de la ciencia, en la que abundan ejemplos de comportamientos «anti-popperianos», pero fructíferos sin embargo. Aun así, insisto en el valor que su obra, y la gran ambición que la animó, tiene para el pensamiento. Más que como el autor de *La lógica de la investigación científica*, a mí me gusta recordarle como él mismo se caracterizó en cierta ocasión, como «el último rezagado de la Ilustración», como alguien que mantenía la esperanza de que el «conocimiento puede hacernos libres, de que podemos liberarnos de la servidumbre económica y espiritual mediante el conocimiento».

PRINCIPIO DE INCERTIDUMBRE. Teorema que se deriva de los postulados fundamentales de la mecánica cuántica y que tiene consecuencias que van más allá de la física teórica, hasta convertirse en uno de los pilares de la moderna teoría del conocimiento (epistemología) contemporánea.

Demostrado por el físico alemán Werner Heisenberg en 1927, el principio (o relaciones) de incertidumbre afirma que existe una serie de magnitudes (denominadas técnicamente «canónicamente conjugadas»), como la posición (p) y el momento (q), o la energía y el tiempo, que sólo se pueden determinar simultáneamente con una indeterminación característica (la constante de Planck): $\Delta q \cdot \Delta p \geq h$. No es posible, en consecuencia, determinar de manera absolutamente precisa las condiciones iniciales de un sistema, la posición y la velocidad, con independencia de la estructura de los aparatos de medida que se estén utilizando. A partir de este resultado, al final del artículo en el que dedujo estos resultados, Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance: «No hemos supuesto que la teoría cuántica es, al contrario de la física clásica, una teoría esencialmente estadística en el sentido de que sólo se pueden inferir conclusiones estadísticas de datos exactos. Ya que tal suposición se ve refutada, por ejemplo, por los conocidos experimentos de Geiger y Bothe. Sin embargo, en la formulación fuerte de la ley causal “Si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro”, no es la conclusión, sino más bien la premisa la que es falsa. No

podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles». Y concluía: «En vista de la íntima relación entre el carácter estadístico de la teoría cuántica y la imprecisión de toda percepción se puede sugerir que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo “real” regido por la causalidad. Tales especulaciones nos parecen —y hacemos hincapié en esto— inútiles y sin sentido. Ya que la física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre percepciones».

De la mano de este principio, la física se ha enriquecido con posibilidades (o situaciones experimentales) que en la teoría clásica estaban completamente vedadas. Como la violación temporal de los principios de la conservación de energía y del momento, situación que se incorpora, por ejemplo, en el mecanismo básico de interacción en la electrodinámica cuántica, donde la fuerza electromagnética entre dos electrones surge de la emisión de un fotón por una de las partículas y la absorción del mismo por la otra. Según la física clásica, la transformación de un electrón en un electrón más un fotón viola el principio de la conservación de la energía (y el del momento), e igualmente ocurre con la absorción, en el que ambos (electrón más fotón) se reducen a un electrón. Pero como estos principios no se verifican salvo a largo plazo en la teoría cuántica, el proceso —denominado «intercambio virtual» (de un fotón entre dos electrones)— puede tener lugar.

PROTEÍNA. Sustancia biológica compleja, indispensable para los organismos vivos. Las proteínas son, en realidad, cadenas, en general muy largas, de aminoácidos, a su vez moléculas orgánicas solubles en agua y compuestas de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno. Todo aminoácido tiene un núcleo central común (que consiste de dos átomos de carbono, dos de oxígeno, uno de nitrógeno y cuatro de hidrógeno), al que se une un grupo variable. En la glicina, el aminoácido más sencillo, este grupo está formado por un átomo de hidrógeno, en la alanina por uno de carbono y tres de hidrógeno. Los aminoácidos debieron aparecer en la Tierra hace miles de millones de años, antes de que brotara la vida, cuando los elementos que los forman abundaban en la atmósfera y superficie terrestres. Probablemente por ello sean compuestos químicos tan importantes para la vida, un fenómeno que surgió (o debió «ingeniárselas») a partir de aquellos elementos que tenía a mano.

Básicamente, el mecanismo mediante el cual los aminoácidos forman proteínas es el siguiente: cuando se aproximan dos aminoácidos, el extremo H de uno de ellos se acerca al OH del otro, formando agua (H₂O), que sirve como enlace entre ambos. A partir de este momento se dice que los dos aminoácidos forman un *péptido*. Es posible repetir muchas veces este mecanismo de unión, produciendo *polipéptidos*. Las proteínas no son sino polipéptidos.

Existen veinte aminoácidos básicos (más unos pocos que se dan raramente en la naturaleza), que combinados en todas las permutaciones —con repetición— posibles pueden producir, en principio, millones de proteínas diferentes. Entre las proteínas que conocemos, las hay que cumplen funciones de muy diversos tipos. Los *enzimas*, moléculas encargadas de regular las reacciones químicas necesarias para la vida, son también proteínas.

Los seres humanos no pueden sintetizar ocho de los aminoácidos básicos, debiéndolos obtener a través de su alimentación (de hecho, estrictamente son diez, ya que tampoco podemos producir dos que nos son necesarios en nuestra infancia, pero no cuando somos adultos). Necesitamos ingerir en nuestra dieta alrededor de sesenta gramos de proteínas diariamente (alimentos particularmente ricos en ellas son la carne, los huevos y el

queso). Por el contrario, las plantas verdes pueden manufacturar todos los aminoácidos que necesitan, sin más que disponer de los elementos químicos básicos (que obtienen del suelo) y de la energía procedente del Sol.

Proteínas importantes para los seres humanos son, por ejemplo: la hemoglobina, bolitas de ocho milésimas de milímetro de diámetro que transportan oxígeno y forman la mitad de nuestra sangre (captan el oxígeno de los pulmones y lo llevan a los tejidos, donde es utilizado por las células), la queratina y el colágeno, que forman la piel, los huesos, tendones, ligamentos, o las proteínas musculares, que producen los movimientos de nuestros miembros.

Pero el estudio de la ciencia de las proteínas tiene también otras facetas fascinantes. Una de ellas es la de que permiten investigar cómo se ha desarrollado la evolución.

La idea es, en esencia, la misma con que nos encontramos a propósito de las mitocondrias como instrumento para buscar el origen de nuestra especie.

Si se observa la misma proteína en dos individuos de idéntica especie se comprueba que sus respectivas secuencias de aminoácidos son iguales o bastante parecidas, mientras que en organismos muy distintos, a los que la evolución ha separado, las diferencias son mucho mayores. Se puede decir que cuanto más distintos son dos organismos, tanto mayor será el número de aminoácidos que los diferencia. Por consiguiente, una forma de estudiar el parentesco entre especies diferentes es analizando las cadenas de aminoácidos de algunas de sus proteínas; de la hemoglobina, por ejemplo. Así, se ha encontrado que los humanos y los caballos se diferencian en dos de los primeros quince aminoácidos de una de las partes (cadena alfa) que forman la hemoglobina, mientras que la diferencia que nos separa de las gallinas es seis de los quince. Somos, pues, más parecidos a los caballos que a las gallinas, lo cual es natural puesto que éstas son aves, mientras que humanos y caballos son mamíferos.

Procediendo de esta forma, ampliando el número de aminoácidos en consideración, se llega a que humanos y gorilas son muy parecidos: sólo nos separa de ellos un aminoácido, frente a diecinueve con respecto a los cerdos y veintiséis con los conejos. Y, al igual que con el ADN mitocondrial, se puede asociar el número de variaciones entre aminoácidos con una escala temporal.

Con estos procedimientos, Allan Wilson (1934-1991) y el antropólogo Vincent M. Sarich (1934) llegaron a la conclusión de que la separación entre el chimpancé y los humanos se produjo hace entre cinco y siete millones de años (por entonces se pensaba, con datos paleontológicos poco fiables, que había tenido lugar mucho antes: entre veinte y veinticinco millones de años). Esta conclusión concordaba bastante bien con el descubrimiento posterior del fósil llamado Lucy, que tiene caracteres simiescos al igual que humanos, y del que se ha establecido que vivió hace 3,2 millones de años. En la actualidad se acepta generalmente que la separación entre humanos y chimpancés tiene una antigüedad de, aproximadamente, cinco millones de años, mientras que la del orangután y los humanos es de entre diez y quince millones de años. Aquellos antepasados comunes de humanos y simios, habrían procedido de una especie que incluía a los cerdos, especie que, a su vez, habría derivado de otra que incluía a los conejos. Atónitos, deslumbrados, asistimos de esta manera al fantástico espectáculo de remontar, con la ayuda de la ciencia, el «río de la vida». ¿A qué manantial terminará llevándonos?

Q

QUÍMICA. La química tiene para muchos mala fama. «Este producto (habitualmente un alimento) tiene mucha química», decimos con un evidente tono despectivo. Semejante mala fama no está, sin embargo, justificada. Vivimos, y no es ninguna metáfora, rodeados de productos químicos producidos de forma artificial (también, obviamente, de los naturales), de los que nos beneficiamos, y mucho. Los encontramos en todas partes: en la ropa que llevamos, en los objetos con los que nos relacionamos, en los alimentos que tomamos, en los medicamentos a los que recurrimos, incluso —en esta ocasión ¡ay!, sí—, en el aire que respiramos. Todo es química, combinaciones de elementos producidas en la naturaleza, en el laboratorio o en la fábrica. Los ejemplos son innumerables. Pensemos, a modo de ilustración, en los polímeros (antes conocidos simplemente como «plásticos»), moléculas consistentes de unas largas cadenas, normalmente de carbono, a las que se unen otros átomos, como el hidrógeno, el flúor o el cloro, que aunque conocidos ya en el siglo XIX, resurgieron con fuerza en la década de 1930, cuando aparecieron el celofán, el PVC, el poliestireno y el nailón. Se habló entonces incluso de la «Era del Plástico», hasta que los plásticos perdieron una parte importante de su predicamento precisamente por su resistencia, que les convertía en contaminantes de primer orden. Aun así, seguimos conviviendo con innumerables polímeros: como el teflón, nombre comercial del tetrafluoroetileno (o PTFE), descubierto por un químico de Du Pont, Roy Plunkett (1911-1994) en 1938, y que empleamos no sólo en sartenes antiadherentes, sino también en materiales que tengan que soportar entornos muy fríos y de bajas presiones (como ocurre en los viajes al espacio, a la Luna entre ellos), o para artículos que puedan resistir los efectos corrosivos del cloro gaseoso en bruto.

Los ejemplos podrían ser tantos que no es posible —ni yo sería el más indicado para hacerlo— seguir. Únicamente quería romper una lanza en defensa de la química. Se lo merece. Recuérdelo también, por ejemplo, cuando tome un medicamento.

R

REDUCCIONISMO. Uno de los significados de este término, el único que yo pretendo abordar aquí, se refiere a la supuesta preeminencia de la física —y, si acaso, la matemática— sobre las restantes ciencias que pretenden describir los fenómenos naturales.

La argumentación reduccionista procede, básicamente, de la siguiente manera: la biología trata de fenómenos que, en última instancia, no son sino procesos químicos, luego se puede reducir a la química; pero, a su vez, ésta se ocupa de reacciones entre los elementos; sin embargo, estas interacciones obedecen a las leyes de la física, por tanto la química se reduce a la física. Un último estadio de este razonamiento sería defender la idea de que es posible llegar a las leyes físicas utilizando solamente argumentos de inevitabilidad matemática, y que en este sentido la física se reduce a la matemática. Pero este paso es, por el momento al menos, más que dudoso. La matemática, como explico en otro lugar de este libro [véase DIRAC], contiene —al menos por el momento— más posibilidades de las que se plasman en la naturaleza (en una interesante variante de este planteamiento, Murray Gell-Mann ha propuesto que una forma de entender la matemática es como la ciencia de lo que es y de lo que podría haber sido. La matemática pura cubriría así no sólo aquellas estructuras que se dan en las teorías científicas —o lo que es lo mismo, si éstas fuesen finales, que se dan en la naturaleza—, sino también todas aquellas que podrían haberse dado o podrían darse en el futuro; con lo que la matemática se podría definir como el estudio riguroso de los mundos hipotéticos).

Y también podríamos continuar por encima de la biología. Hablando, por ejemplo, de la psicología, y afirmando que se deriva de la neurofisiología, parte de, o reducible a, la biología.

Existen, efectivamente, magníficas razones para defender tales puntos de vista. Especialmente desde que disponemos de la física cuántica. En principio, un físico teórico que trabaje con la electrodinámica cuántica (la teoría que describe la interacción electromagnética de una forma compatible con los requisitos cuánticos) puede determinar el comportamiento de cualquier sistema químico en el que la estructura interna del núcleo atómico no sea importante. Y si el núcleo es relevante, también tiene la física cuántica instrumentos para abordar el problema que se pueda plantear. El ejemplo de la molécula de ADN, cuya estructura geométrica fue descubierta recurriendo a técnicas de marcado carácter físico (como la difracción de rayos X), apunta en una dirección similar.

El orgullo —legítimo, desde luego— de los físicos ante el poder de sus teorías, de su disciplina, no se ve demasiado disminuido cuando constatan (y lo hacen muy pronto, en el momento en que les enseñan las dificultades que tiene resolver la ecuación de Schrödinger para moléculas que no sean la de hidrógeno) que ese poder es más potencial que real: ni siquiera con los ordenadores más potentes es posible abordar, de manera exacta, a partir de la física teórica, otra cosa que los problemas químicos más sencillos. Al fin y al cabo —argumentan, defendiendo aún más su autoestima— ése es un problema de cálculo, no conceptual.

La situación no es, sin embargo, tan sencilla. La química es algo más que física aplicada; la biología más que química aplicada; la psicología más que biología práctica. Para que un físico teórico intente resolver desde su disciplina problemas de la química, tiene que recurrir a ideas, conceptos, e incluso fórmulas, que han surgido de la química, entendida ésta como una ciencia caracterizada por una historia, problemas y técnicas

propias. Y cuando nos situamos en los niveles de la biología o de la psicología, estos rasgos no reduccionistas son aún más marcados. De las investigaciones con guisantes o moscas *Drosophila* han surgido conceptos y problemas genéticos que difícilmente se habrían generado dentro del universo de los conceptos y teorías de la física. Espero no tener que convencer a nadie que esto también forma parte de lo que denominamos ciencia.

No niego, en definitiva, el carácter reduccionista de las leyes que pretenden describir la naturaleza, y que, en consecuencia, tenga sentido asignar «niveles» diferentes a las diversas ciencias básicas, situándose la física en la cúspide —o en la base, según se mire— de esta hipotética pirámide. Lo que defiendo es que semejante hecho en modo alguno disminuye la necesidad y autonomía de las ciencias cuyo objeto es, en principio, en última instancia, reducible a la física. Sin apreciar y aceptar este pluralismo, esta enriquecedora historicidad de la ciencia, no nos será posible comprender su esencia.

RELATIVIDAD. A pesar de que el siglo XX fue testigo de la creación de un gran número de ideas y teorías científicas, ninguna ha dejado una marca comparable como aquellas que con frecuencia se agrupan bajo el nombre de «relatividad», y que en realidad esconde dos teorías diferentes aunque relacionadas: la relatividad especial y la relatividad general, desarrolladas por Albert Einstein en, respectivamente, 1905 y 1915. El filósofo José Ortega y Gasset (1883-1955), buen espectador de su época, se refirió, en 1923, a la relatividad como «el hecho intelectual de más rango que el presente puede ostentar».

Al igual que cuando fueron formuladas, ambas teorías mantienen hoy plena validez. La relatividad especial con un grado de generalidad que la sitúa en ciertos aspectos por encima de cualquier otra construcción de la física. No es éste el caso de la teoría general, que afecta a un dominio específico de la naturaleza (la interacción gravitacional); sin embargo, posee ésta características que la distinguen de manera radical de absolutamente todas las restantes formulaciones físicas. Por estos motivos, al igual que por la popularidad que alcanzaron y han mantenido a lo largo de casi un siglo, no es excesivamente fácil sentirse un ciudadano auténtico de este fin de milenio sin tener al menos una idea de la «relatividad». Para evitarle, amigo lector, tal conflicto, he incluido la presente entrada en este diccionario, tan mío como suyo.

Comenzaré, como es lógico, por la relatividad especial. Al contrario que la relatividad general, la especial estaba «en el aire», por decirlo de alguna manera, cuando la formuló Einstein en 1905. Se habían realizado una serie de observaciones (como el célebre experimento de Michelson y Morley; 1886) que parecían indicar que los fenómenos electromagnéticos entraban en conflicto con algunas de las premisas básicas de la mecánica newtoniana. Ésta sostiene que las leyes de la física no cambian de forma cuando se pasa de un sistema de referencia inercial —esto es, que o está en reposo o se mueve con velocidad constante— a otro, mediante lo que se denomina «transformaciones de Galileo», y que no son sino unas reglas sencillas para relacionar las coordenadas espaciales y el tiempo en ambos sistemas (este último, el tiempo, no varía en estas transformaciones; es universal). Se trata de una exigencia natural hasta cierto punto, ya que responde a la idea de que la realidad —y la física que la describe— es única, y que los observadores deberían verla —y describirla— de idéntica manera, independientemente de qué sistema de referencia inercial están utilizando. (Por supuesto, se podría pensar que es una restricción injustificada el limitarse únicamente a tales sistemas; ¿por qué no todos, sean inerciales o no? Si se le ha ocurrido semejante idea, no la deseche; es magnífica y volveré en seguida a ella, pero parece que la naturaleza no es tan «democrática» —salvo en un rincón específico— como para aceptar tal requisito).

Pero las ecuaciones (de Maxwell) del electromagnetismo no mantenían la misma forma bajo transformaciones de Galileo. En principio no parecía que este hecho introdujese una dificultad insalvable: a pesar de lo que acabo de decir, no es obligado que tengan que verse todos los fenómenos electromagnéticos de la misma manera en sistemas inerciales diferentes. Aquellos que deseaban materializar de alguna forma el viejo sueño de Newton de un espacio absoluto, pensaron que el sistema de referencia en el que las ecuaciones de Maxwell tomaban la forma canónica era el que correspondía al espacio absoluto; en él, el campo (entonces todavía éter) electromagnético estaba en reposo, convirtiéndose así en una especie de materialización del espacio absoluto. El problema es que según esta visión, deberían detectarse efectos producidos por los movimientos que se realizasen con respecto al éter universal en reposo. Y en este punto volvemos a lo que señalaba antes: fue comprobándose que tales efectos no aparecían.

Aunque físicos y matemáticos como Hendrik Lorentz (1853-1928), Joseph Larmor (1857-1942) y Henri Poincaré se aproximaron bastante a resolver este problema, desde el punto de vista teórico, fue el joven y todavía desconocido Albert Einstein quien logró resolver el enigma. Se dio cuenta de que los fenómenos anómalos que se estaban observando se podían explicar asumiendo un hecho profundamente contraintuitivo: que la velocidad de la luz es la misma independientemente de la velocidad del sistema de referencia desde el que se la emite. Es como si lanzásemos una pelota desde un tren en movimiento, y dos observadores, uno dentro del tren y otro fuera de él, en reposo en las proximidades de la vía, midiesen la misma velocidad para la pelota. Pero Einstein tuvo la osadía de realizar esta suposición, y basar en ella su análisis de la «electrodinámica de los cuerpos en movimiento» (el título de su artículo), añadiendo otro axioma razonable: *todas* las ecuaciones de la física debían mantener la misma forma en todos los sistemas inerciales (principio de relatividad).

A partir de ambos axiomas, Einstein llegó a la conclusión de que las transformaciones de Galileo debían ser reemplazadas por otras diferentes (a las que se terminó llamando «de Lorentz»). Con estas nuevas transformaciones, las ecuaciones del electromagnetismo no variaban de forma, eran «invariantes Lorentz». Y esto representaba la explicación teórica de por qué no se detectaban los efectos que la visión newtoniana esperaba cuando se pasaba de un sistema inercial a otro.

Pero hay que entender que Einstein fue mucho más allá del electromagnetismo. Para él, lo fundamental eran los axiomas previos, la constancia de la velocidad de la luz y el principio de relatividad. Todas las fuerzas de la física debían verificarlos, eran requisitos previos, más fundamentales, por consiguiente. No es que, como pensaban Lorentz, Larmor y Poincaré, las nuevas transformaciones fuesen un producto, algo así como un teorema, que se deducía del electromagnetismo. Se trata de requisitos, podríamos decir, geométricos, cinemáticos, independientes de las fuerzas que entran en acción. Pero aquellas transformaciones eran una bomba en potencia para el mundo de la física: como Einstein vio perfectamente, implican que las distancias dependen de en qué sistema de referencia inercial se estén midiendo, y, lo que era mucho peor, que el tiempo (la medida que de él hacen los correspondientes observadores) no es el mismo en sistemas inerciales diferentes. Nadie hasta entonces se había atrevido a cuestionar (no se habían encontrado razones para hacerlo; lo que hizo Leibniz fue otra cosa) la hipótesis del tiempo absoluto. Y había más. De aquel hervidero de nuevas ideas, surgió en seguida la conclusión que materia y energía eran equivalentes [véase $E = MC^2$].

En su artículo fundacional, y durante algún tiempo después, Einstein no vio que sus

ideas implicaban un cambio radical en la percepción de la geometría del espacio. Fue uno de sus antiguos profesores en el Politécnico de Zúrich, Hermann Minkowski (1864-1909), quien se dio cuenta del significado geométrico de la relatividad especial (Poincaré también se había dado cuenta, en 1905-1906, pero no lo publicitó como su colega alemán). Minkowski observó, en efecto, que las transformaciones de Lorentz se podían entender no como simetrías que afectaban, por separado, al espacio y al tiempo, dentro del tradicional espacio euclideo de tres dimensiones, sino como manifestación de una profunda y unitaria simetría dentro de un espacio, pseudoeuclideo, de cuatro dimensiones. Sólo había que variar la definición de distancia (métrica) dentro de ese espacio, que hoy denominamos, en homenaje suyo, «minkowskiano», y seguir diciendo, parecido a como hacíamos con Euclides, que la métrica es invariante bajo las transformaciones de Lorentz. Me puedo imaginar muy bien el impacto que debieron de producir en algunos de sus oyentes, aquellas palabras de Minkowski durante una conferencia dedicada al «Espacio y el tiempo» que pronunció en 1908:

A partir de ahora el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solamente una especie de unión de los dos conservará la independencia.

Si hay algún cambio profundo, ontológico, que puede introducir la física, éste es uno de ellos. Puesto que ¿qué hay más básico que el «espacio», el marco geométrico con el que ordenamos y conceptualizamos nuestras experiencias? La relatividad especial nos ha enseñado que ese marco es diferente, por mucho que la intuición parezca indicarnos lo contrario, al tridimensional euclideo, en el que la noción de distancia es, con una coordenada más, la misma que subyace en aquel teorema (de Pitágoras) que nos enseñaron de pequeños: «El cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos».

Una última palabra sobre la relatividad especial. Algunos de ustedes, lectores, habrán oído aquello de que «como dice la relatividad, todo es relativo». Se trata de una desgraciada popularización y de un nombre (para la teoría) no demasiado afortunados. La relatividad especial es una teoría de absolutos; nos enseña a ver lo que hay de común, de permanente en los fenómenos físicos. Nos informa de los requisitos —geométricos, cinemáticos— que la estructura del espaciotiempo impone en la descripción de los fenómenos físicos. Incluso el que la velocidad de la luz aparezca en un papel central puede ser engañoso: si los fotones (los cuantos de la interacción electromagnética, que «forman» la luz) tuviesen masa —se cree que no la poseen— no tendrían la velocidad que hoy denominamos «de la luz»; pero esto no significaría que tuviésemos que abandonar el axioma de la constancia de la velocidad «de la luz», que ahora veríamos, más apropiadamente, como una constante básica de la naturaleza, que, simplemente, no sabríamos asociar con ningún fenómeno concreto, únicamente con la geometría del espacio-tiempo. Claro que todo esto también puede significar que realmente no entendemos lo que es la luz, una idea que el propio Einstein expresó a su amigo, el también célebre físico Max von Laue (1879-1960), en 1950, cuando le confesó que cincuenta años de «rumiar» sobre la luz, no le habían permitido entender todavía qué era realmente.

Para un espíritu tan ambicioso como el de Einstein, la relatividad especial dejaba abiertos al menos dos problemas fundamentales: en primer lugar, ampliar el principio de relatividad de forma que englobase no sólo sistemas de referencia inerciales, sino también sistemas en movimiento arbitrario. ¿Por qué —la pregunta que ya nos hemos hecho—

deberíamos ver los fenómenos físicos de la misma forma solamente desde sistemas inerciales? La segunda cuestión era construir una teoría relativista de la gravitación, la otra fuerza conocida entonces (no existía tal necesidad para el caso del electromagnetismo, puesto que la teoría de Maxwell era relativista).

El primer paso en tal dirección lo dio Einstein en 1907, en un artículo que publicó en la revista *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik*. Allí señaló la importancia que para la construcción de una teoría de la gravitación tenía la igualdad —observada— entre masa inercial y masa pesante, que se traduce, como había advertido Galileo, en que la aceleración con la que caen los cuerpos sea independiente de su masa (si no existiera la resistencia del aire, una bola de plomo y una pluma que se lanzasen desde, por ejemplo, la torre inclinada de Pisa, llegarían al mismo tiempo al suelo). Einstein utilizó este hecho, inexplicado en la mecánica newtoniana, para señalar que un campo gravitacional es, en principio (para dimensiones pequeñas), equivalente a un sistema de referencia acelerado, y que, por tanto, la tarea de construir una teoría de la interacción gravitatoria estaba relacionada con la de formular una teoría relativista en la que interviniesen sistemas de referencias acelerados. A esa equivalencia entre gravitación y sistemas no inerciales, la denominó Einstein «principio de equivalencia», y fue la única pieza de la que no prescindiría en su larga búsqueda de una teoría relativista de la gravitación.

Fue, efectivamente, una larga búsqueda, uno de cuyos momentos culminantes tuvo lugar en 1911-1912, cuando se dio cuenta de que el principio de equivalencia sugería que la gravitación «deforma» el espacio-tiempo. Einstein conceptualizó este resultado recurriendo a la matemática de los espacios de geometría variable (espacios riemannianos). Identificando la métrica que los describe con el campo gravitacional, concluyó que gravitación/geometría dependen del contenido energético-material (recuérdese que $E = mc^2$) del sistema que se esté considerando. El espacio (el espacio-tiempo cuadridimensional, más correctamente) dejaba de ser el constructo inmutable que —incluso en la relatividad especial— había sido hasta entonces, cambiando de forma paralela a la mutabilidad de los fenómenos físicos. Ninguna otra teoría de la física, anterior o posterior, tiene una característica semejante.

Aclarado este punto, todavía tuvo que penar Einstein otros tres años más para encontrar las ecuaciones específicas que describen la dinámica del campo gravitacional. Fue en Berlín, en donde, el 25 de noviembre de 1915, presentó a la Academia Prusiana de Ciencias su nueva formulación: la teoría general de la relatividad. Una teoría que va más allá de la relatividad especial, ganando generalidad en lo que al principio de relatividad se refiere, pero a costa de perderla en cuanto a rango de aplicabilidad, ya que es una descripción teórica de, sólo, la interacción gravitacional, no de las restantes (electromagnética, débil y fuerte), que sí deben verificar los requisitos de la relatividad especial. Paradójicamente, la relatividad general no es, salvo en casos límite, relativista especial. Por ello, al igual que por la dificultad de hacerla compatible con los requisitos cuánticos —*cuantizarla*—, un problema que no existe con la relatividad restringida (existen formulaciones cuánticas y relativistas de las otras interacciones), su situación dentro del conjunto de la física es un tanto peculiar: es deslumbrantemente bella y asombrosamente original, pero seguramente destinada a ser transcendida por otras descripciones teóricas.

S

SIDA. Véase VIRUS y ANTIBIÓTICO.

SIMETRÍA. Concepto de uso extendido en diversos campos, pero que sólo es posible definir de manera rigurosa dentro de la matemática. Las primeras líneas de un libro que ya es clásico, *Simetría* (1952), del matemático Hermann Weyl, reúnen perfectamente los principales rasgos de esa pluralidad que históricamente va asociada al concepto de simetría: «A partir de la noción algo imprecisa que evoca la igualdad “simetría = armonía de proporciones” [...] [desarrollo] gradualmente, en primer lugar, el concepto geométrico de simetría en sus diversas formas, como las de simetría bilateral, traslacional, rotacional, ornamental o cristalográfica y, finalmente, [llego] a una idea general, fundamento de todas estas formas especiales, a saber: la invariabilidad de una configuración de elementos ante un grupo de transformaciones automórficas». Expresado de forma espero que más simple, se dice en matemática que existe una simetría cuando un conjunto —u objeto— determinado mantiene su configuración (o algunas de sus propiedades) al ser sometido a una cierta transformación.

La idea de simetría es particularmente atractiva. Nos indica una cualidad o propiedad común, constante, que subyace detrás de las apariencias. En tanto que uno de los objetivos preferentes de la ciencia es precisamente identificar regularidades (acaso sea su único objetivo real, puesto que qué es una ley científica sino la expresión de una regularidad, de algo que se conserva), es natural que los científicos reciban con especial agrado a cualquier simetría. (Para aquellos especialmente interesados en la matemática, diré que también en esta disciplina la idea de simetría ha desempeñado un papel relevante. No sólo en lo que se refiere a desarrollar técnicas para tratarla, sino también, en alguna ocasión, dentro de un contexto más amplio. Como en el denominado «Programa de Erlangen», que planteó en 1872 el matemático germano Felix Klein [1849-1925]. En este programa la noción de simetría desempeña un papel central en una rama de la matemática tan básica como la geometría. Existen, sostenía Klein, tantas geometrías como grupos de transformación: la geometría no es sino el estudio de los objetos que se mantienen invariantes bajo diferentes transformaciones, o, lo que es lo mismo, el estudio de las simetrías de esas transformaciones).

El primer principio de simetría importante conscientemente descubierto en la física fundamental fue la invariancia (o simetría) Lorentz [véase RELATIVIDAD]. En este proceso la invariancia fue un descubrimiento secundario, pero Minkowski se encargó enseguida de dar la vuelta al procedimiento, requiriendo que las ecuaciones fuesen invariantes. Einstein quedó tan impresionado con las poderosas consecuencias físicas de los principios de simetría que trabajó para ampliar la invariancia Lorentz. Esto condujo, como hemos visto, a la teoría de la relatividad general. Se puede decir, por consiguiente, que Einstein inició el principio de que la simetría dicta las interacciones, un principio que ha desempeñado un papel esencial en la física teórica de los últimos tiempos.

Una de las luces, en efecto, que iluminan la investigación teórica en la física de altas energías se encuentra en los principios de simetría (de todo tipo, como la simetría partícula-antipartícula, y no únicamente clásicas como la homogeneidad espacial o temporal). No es extraño escuchar palabras del tipo de: «La naturaleza tiene un grado muy alto de simetría, que relaciona las diversas partículas y las fuerzas, pero que queda oscurecida en los fenómenos físicos ordinarios». Steven Weinberg, uno de los físicos

teóricos más destacados de la segunda mitad de nuestro siglo, ha escrito en este sentido: «Cada vez está más claro que el grupo de simetría de la naturaleza [el que verificaría una teoría que explicase “todo”] es la cosa más profunda que podemos entender en la actualidad sobre la naturaleza. Me gustaría sugerir aquí algo de lo que no estoy realmente seguro pero que es al menos una posibilidad: que especificar el grupo de simetría de la naturaleza puede ser todo lo que necesitamos decir acerca del mundo físico, más allá de los principios de la mecánica cuántica».

Desde este punto de vista, al nivel más profundo todo lo que existe son simetrías y respuestas a simetrías. La propia materia se disuelve y el universo se nos aparece como una gran representación de conjuntos (técnicamente grupos) de simetrías.

Claro que también es posible defender ideas en principio opuestas. Animado por los resultados a los que llegó en sus estudios sobre la relación existente entre actividad óptica, estructura cristalina y la composición química de compuestos orgánicos (el ácido tartárico en especial), Louis Pasteur escribió en 1874 que el «universo es una estructura asimétrica y estoy convencido de que la vida, tal y como nosotros la conocemos, es un resultado directo de la asimetría del universo o de las consecuencias que ello entraña. El universo es asimétrico».

De hecho, la física de los últimos tiempo ha desarrollado un concepto que se amolda bastante bien a la idea de Pasteur, aunque habiendo partido antes de simetrías. Me refiero al concepto de ruptura de simetrías, cuya introducción en la física teórica ha sido comparada con la ruptura de las esferas celestes realizada por Copérnico, Kepler y Galileo.

Expuesto de una manera elemental, las rupturas de simetrías son procesos mediante los cuales en determinadas circunstancias o en momentos concretos de la historia del universo las simetrías que hasta entonces se verificaban, se rompen, dando origen a nuevos fenómenos o fuerzas. El ejemplo paradigmático en este sentido es el de las interacciones. En la actualidad vemos cuatro fuerzas diferentes, pero en el comienzo y primeros instantes de vida del universo habría existido una única fuerza. Al irse expandiendo y en consecuencia enfriando el universo se habría ido «desintegrando» aquella fuerza en las cuatro que conocemos. La física teórica dispone desde hace tiempo de teorías en las que tres de las cuatro fuerzas han sido unificadas en el sentido anterior. Primero se desarrolló (Steven Weinberg y Abdus Salam [1926-1996], 1967-1968, con aportaciones de otros físicos, Sheldon Glashow [1932] en particular) la teoría electrodébil, que unificaba la interacción débil y la electromagnética. Más tarde vino la denominada «teoría estándar», que incluía también la interacción fuerte. Todavía no se ha resuelto el problema de la gran unificación, que tenga en cuenta también a la fuerza gravitacional, aunque existen teorías candidatas, como la de supercuerdas [véase PARTÍCULAS ELEMENTALES].

Otros procesos de ruptura espontánea de simetrías especialmente importantes son aquellos que contribuyen a explicar (mediante un mecanismo denominado de Anderson-Higgs) las diversas masas de las partículas que aparecen en el modelo estándar.

Regresando a la idea de Pasteur, tendríamos que, en cierto sentido, habría tenido razón: parece inevitable aceptar que la vida, en cualquiera de sus formas, sólo es posible cuando existen regiones en las que la temperatura no es excesivamente alta. Pero ha sido precisamente el enfriamiento cósmico el responsable de la ruptura de la gran simetría que imperó en los primeros instantes del universo. En este, restringido, sentido vida y asimetría aparecen como distintos aspectos de una misma realidad.

SOCIEDADES CIENTÍFICAS. La ciencia es conocimiento, ideas, pero también es —espero que a estas alturas ya le haya quedado esto claro, estimado lector—

circunstancias, instituciones que facilitan su práctica y desarrollo. Y entre esas instituciones hay una clase que históricamente ha desempeñado un papel de cierta relevancia: las sociedades científicas.

El asociacionismo científico hunde sus raíces en la Italia renacentista. En ciudades como Florencia, Nápoles, Roma y Venecia se fundaron las primeras «academias» —también podríamos denominarlas «círculos filosóficos»—, en las que se profesaba la idea de perseguir la virtud a la vez que el conocimiento, la perfección moral al mismo tiempo que la intelectual, dentro de un espíritu platónico. Pero aquellas primeras academias italianas del siglo XV no fueron realmente los ejemplos tempranos de un nuevo modo organizativo para aproximarse a las maneras que estaban brotando de entender el estudio de la naturaleza, fueron más bien los restos de formas de entender la existencia que pronto quedarían en desuso.

Fue, en cualquier caso, en aquel medio, en Italia, en donde surgieron las primeras academias que podríamos denominar «modernas». Comenzando con la Accademia dei Lindei, en Roma (1601-1630), fundada por el duque Frederigo Cesi, un hábil experimentador, especialmente interesado en el estudio de las abejas y las plantas, aficionado a coleccionar objetos naturales y poseedor de un jardín botánico. Los miembros de este círculo, entre los que se llegó a contar a Galileo, alcanzaron la cifra de 32. La idea era establecer «monasterios comunales científicos, no monacales», no sólo en Roma, sino en todos los confines del globo. Habría una biblioteca, un museo y una imprenta, además de instrumentos científicos, jardines botánicos o laboratorios. Surgió después la Accademia del Cimento —*Cimento* significa *experimento* (el *motto* de la Academia era «*Probande e reprobando*»)— de Florencia (1657-1667), en la que nueve científicos (la mayor parte discípulos de Galileo, como Viviani, Torriceli o Borelli) se esforzaron durante una década en construir instrumentos, desarrollar sus habilidades experimentales y buscar verdades básicas.

De Italia, el modelo de las academias se fue extendiendo: a Inglaterra, con la Royal Society (fundada en torno a 1660), que contó entre sus miembros a Newton, Boyle y Hooke; a Francia, con la Academie des Sciences (1666); a Alemania, con la Societas Ereunetica de Rostock (1622), la Academia Naturae Curiosorum (1651), el Collegium Curiosum sive Experimentale (1672), o la Academia de Berlín, fundada por Leibniz en 1700.

Algunas de estas sociedades todavía existen, con bastante prestigio algunas (como la londinense Royal Society). Otras similares se crearon más tarde, como la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid, fundada en 1847. Prácticamente todas constituyen círculos restringidos, en los que unos pocos —los «mejores», se supone— son premiados (por aquellos que ya han recibido antes el mismo honor) con un lugar en el Olimpo de los «inmortales». En la medida en que nos libramos con dificultad de costumbres antiguas, no importa que éstas ya hayan perdido completamente su razón de ser, las —habitualmente *Reales*— academias aún conservan, para algunos (o muchos, no lo sé) viejos créditos, alientos de distinción perpetua que se resisten a adoptar expresiones más acordes con otros tiempos, con otra idea de la práctica científica (o de lo que sea; hay academias para casi todas las disciplinas, no sólo para las ciencias). Y así, no son demasiadas las academias que han logrado encontrar alguna función relevante que cumplir en el mundo actual.

Pero el asociacionismo científico no se limita a esas instituciones. También existen otras, más cercanas a la realidad cotidiana de la ciencia. Dejando a un lado las de ámbito

local, como las Sociedades de Amigos del País, durante la Ilustración, y otras que vivieron una época de esplendor durante el siglo XIX, especialmente en Inglaterra (me viene a la mente el ejemplo de la Manchester Literary and Philosophical Society, asociada a los nombres de dos grandes científicos, Dalton y Joule), están las sociedades profesionales, como las Sociedades inglesa, alemana y americana de Química, fundadas, respectivamente, en 1841, 1867 y 1876, la Real Sociedad Zoológica inglesa (1826), la Sociedad de Física de Berlín (1845), la Sociedad Americana de Física (1899) o, hay miles de ejemplos, la Sociedad Matemática de Londres (1878). También están las denominadas Asociaciones para el Progreso de las Ciencias, que agrupan, en principio, a especialistas de los diversos campos científicos, y que muestran una cierta preocupación por relacionarse con la sociedad en general. Estas asociaciones vivieron su momento cumbre durante el siglo XIX y primeras décadas del XX (en 1822 se fundó la sociedad alemana, en 1831 la británica, la americana en 1848, la francesa en 1872, la italiana en 1907 y la española en 1908). Aunque algunas de ellas perviven, la que lo hace mostrando más vigor es la American Association for the Advancement of Science, que además de contar con miles de asociados publica una de las revistas científicas más influyentes: *Science*.

Hay, por supuesto, muchos más ejemplos. Pero no es éste un diccionario/catálogo; lo que yo he pretendido con esta entrada es mostrar la fuerte inclinación que sienten los científicos por asociarse entre ellos, algo que es perfectamente natural. Especialmente cuando las agrupaciones que han creado responden a intereses profesionales comunes. Los científicos son desde hace ya bastante tiempo, no lo olvidemos, profesionales, y como tales es lógico que deseen defender y promover los intereses que los unen. Al agruparse profesionalmente muestran darse cuenta de que viven en un complejo universo social, fruto de las ideas, percepciones, motivaciones, aspiraciones y responsabilidades de colectivos muy diferentes. Pero esas asociaciones deberían asumir la parte de responsabilidad en la construcción y sostenimiento del mundo contemporáneo que les corresponde; lo que quiere decir, esforzarse por articular sus opiniones y mostrarlas en ese plural escenario que es la sociedad. Ya no existen torres de marfil en las que el científico se pueda refugiar. Su torre de marfil es el mundo, y sus conocimientos, sus especialidades deberían ser patrimonio de todos. Las sociedades científicas pueden ser un magnífico instrumento para lograr tal propósito.

T

TECNOLOGÍA. Si alguien busca en un diccionario el significado del término «tecnología», probablemente se encuentre con una definición como ésta: «El estudio científico de las artes prácticas o industriales» o «El estudio de los métodos científicos y de las reglas empleadas en un oficio». Puede que estas definiciones fuesen válidas en el pasado (yo creo que no lo fueron en general), pero desde luego no lo son en la actualidad. En primer lugar, y por encima de cualquier otra consideración, porque colaboran en mantener una idea ya caduca, la de que existe una separación nítida entre «ciencia» y «tecnología», que esta última no pasa de ser una *aplicación* de la ciencia a las artes prácticas u oficios.

Semejante idea ha sido tradicionalmente bienvenida y favorecida por los «científicos» —esto es, por aquellos cuya ocupación directa es intentar hacer avanzar el conocimiento básico de la naturaleza—. Para muchos científicos la tecnología es una disciplina con un cierto grado de impureza, algo así como un parásito que se beneficia del, más básico y puro, conocimiento científico. Un corolario implícito en esta visión es que la ciencia es previa a, y relativamente independiente de, la tecnología.

No voy a negar que es posible, especialmente integrando a lo largo de la historia, distinguir entre mucho de lo que es ciencia y mucho de lo que es tecnología (si no fuera así, seguramente este diccionario se denominaría «de ciencia y tecnología», o de «tecnociencia»), pero conviene no exagerar la nota, e introducir unas cuantas salvedades que sitúan a la ciencia en una situación más adecuada; especialmente para enfrentarse con el mundo de la investigación científica actual, y probablemente aún más a la que vendrá en el futuro próximo.

Es cierto que existen bastantes ejemplos de tecnologías que surgieron como consecuencia, como subproductos, de avances científicos (sin ir más lejos: la tecnología nuclear, hija del descubrimiento de la fisión nuclear). Sin embargo, hasta fines del siglo XIX, las innovaciones tecnológicas importantes casi nunca provinieron de las personas, instituciones o grupos sociales que trabajaban para las ciencias. Aunque los científicos hicieron algunas incursiones en la tecnología, y pese a la insistencia con que se proclaman sus éxitos, quienes verdaderamente contribuyeron al desarrollo tecnológico fueron predominantemente maestros de oficios, artesanos, trabajadores e inventores, un colectivo este último, por cierto, que a menudo se encontraba en agudo conflicto con sus contemporáneos científicos. El diseño de los primeros motores eléctricos, por ejemplo, debió más a los artefactos anteriores que a la teoría científica. La teoría electromagnética puede haber impuesto restricciones en el diseño de motores, pero no dictó que el primer motor eléctrico hubiese de operar en una máquina de vapor. Como ha apuntado el historiador de la tecnología George Basalla, los partidarios de la investigación científica han exagerado la importancia de la ciencia al afirmar que ésta es la raíz de virtualmente todos los cambios tecnológicos mayores. Una evaluación más realista e históricamente más exacta de la influencia de la ciencia en el cambio tecnológico es la de que la ciencia constituye una de entre las varias fuentes interactivas de las que surgen nuevos instrumentos o aparatos.

¿Por qué esto es importante, fuera de la siempre saludable función de rebajar las ínfulas de un grupo de profesionales? Pues lo es, porque en la medida en que normalmente es la tecnología la disciplina más directamente involucrada en los cambios sociales, algunos

puntos de vista pueden llevar a pensar que o bien la ciencia es la responsable, en última instancia, del progreso social relacionado con el complejo ciencia-tecnología (un argumento éste que daría a la ciencia una posición de privilegio frente a la tecnología), o que en aquellos casos en los que la sociedad interviene en los cambios tecnológicos, la ciencia permanece, sin embargo, al margen, algo que en definitiva significa que está poco condicionada por elementos sociales y culturales.

Pero hay más. La relación entre ciencia y tecnología es mucho más compleja de lo que normalmente se piensa. Un ejemplo clásico es el que recuerda que la máquina de vapor fue anterior a la creación de la ciencia que formalizó los principios en los que se basaba: la termodinámica, creada en 1824 por el francés Sadi Carnot (1796-1832), después de observar el funcionamiento de una de esas máquinas de vapor. Otro ejemplo muy instructivo es el del desarrollo del electromagnetismo durante casi tres cuartas partes del siglo XIX. Es importante comprender que las «aplicaciones» (la tecnología) del electromagnetismo ya se abrían camino, con fuerza creciente, en la década de 1840, cuando James Clerk Maxwell, quien —como ya saben, lograría completar el edificio teórico de la ciencia de la electricidad y el magnetismo— ni siquiera se había graduado (lo hizo en 1854, en Cambridge). En este sentido, no se puede decir que el conocimiento científico guiase totalmente al práctico, que la ciencia «pura» precediese a la «aplicada». Como en muchos otros casos, anteriores y posteriores, la relación ciencia-tecnología resultó ser complicada. Así, aunque el descubrimiento (científico) de Hans C. Oersted (1777-1851) había dado pie a imaginar la posibilidad (práctica) de la telegrafía, una vez abierta la puerta de aquella posibilidad, inventores, *entrepreneurs* y científicos emprendieron, juntos o por separado, la lucha por lograr hacer realidad semejante idea. A lo largo de ese camino, la ciencia siguió aportando beneficios a la, como denominaríamos hoy, tecnología (los trabajos de Faraday [1791-1867], Charles Wheatstone [1802-1875] o William Thomson [1824-1907], por ejemplo), pero también aquella se benefició de ésta. Se ha argumentado en este sentido, que la noción de «campo» de Michael Faraday, esencial para el desarrollo de la teoría electromagnética, es acreedora al descubrimiento del retraso que sufría la corriente eléctrica cuando era transmitida a lo largo de grandes distancias por cables telegráficos subterráneos.

Y si dejamos la historia y nos concentramos en las últimas décadas, vemos que la relación entre ciencia y tecnología se ha hecho todavía más frecuente y estrecha. Por supuesto que aún es posible hablar de —o identificar dónde aparece— «ciencia pura»; las formulaciones físicas (como las teorías de gran unificación) que pretenden reducir las cuatro interacciones conocidas a una sola, o los esfuerzos por demostrar el teorema de Fermat, son eso, ciencia pura. Pero si miramos, por ejemplo, a la genética nos encontramos con que, como explico en otros lugares de este diccionario, la distinción entre genética teórica y biotecnología o ingeniería genética no siempre está clara. La física del estado sólido (también denominada de la materia condensada) es a menudo un lugar en el que se reúnen intereses y procedimientos científicos y tecnológicos. Y ¿qué son los grandes aceleradores de partículas, o el telescopio espacial Hubble, sino prodigios de la tecnología?, o ¿no ha recibido la matemática una gran ayuda del desarrollo de los computadores, en los que ciencia y tecnología se dan la mano?

La historia reciente de la ciencia y la tecnología nos ofrece, por consiguiente, una visión más dinámica e interrelacionada de ambas disciplinas. Es verdad, como se suponía tradicionalmente, que la tecnología puede recibir grandes favores de la ciencia, bajo la forma de, por ejemplo, el descubrimiento de nuevos fenómenos o técnicas, pero no es menos cierto que la tecnología impulsa a su vez el avance científico, no sólo como

instrumento, sino imbricándose profundamente en la propia ciencia, a la que en ocasiones sería más correcto referirse como «tecnociencia».

TECTÓNICA DE PLACAS. Véase DERIVA DE LOS CONTINENTES.

TIEMPO. Todos lo conocemos, y es uno de nuestros mayores enemigos (a veces también, es cierto, un eficaz y compasivo aliado). Un enemigo que a la postre siempre nos derrota (en uno de los libros —*El epicureísmo*— de Emilio Lledó leo una espléndida caracterización del tiempo, que no resisto citar: «La característica fundamental de este proceso físico es su total *efimeridad*. Insertos en la “flecha del tiempo”, cada instante de nuestra vida, medido por los irreversibles e irrepetibles latidos de nuestra sangre, desaparece en su esencial fluir»). Lo cuantificamos mediante relojes, instrumentos basados en la repetición de fenómenos físicos de gran regularidad. En la actualidad se utilizan relojes atómicos (antes se emplearon de otros tipos, desde clepsidras a relojes de arena o mecánicos). El primer reloj atómico fue desarrollado, en 1948, por el National Bureau of Standards (hoy National Institute of Standards and Technology), el laboratorio nacional de metrología de Estados Unidos. Se regulaba midiendo la velocidad a la que vibraba el átomo de nitrógeno de una molécula de amoníaco. Un reloj atómico más preciso es el de cesio. Debido a su estructura interna, el átomo de cesio emite o absorbe radiación de una frecuencia muy precisa (varía en menos de una parte en diez mil millones). Es esta frecuencia la que se ha empleado para definir el segundo. Existen, no obstante, relojes atómicos más exactos, como los que utilizan máseres de hidrógeno, que se basan en la radiación emitida por átomos de hidrógeno (maser = acrónimo de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Un reloj de máser de hidrógeno puede teóricamente tener una precisión de un segundo de error en trescientos millones de años.

Debido a semejante grado de precisión, periódicamente se deben efectuar ajustes en la duración del «año atómico» para que coincida con el «año astronómico» (basado en la rotación de la Tierra en torno al Sol). El 30 de junio de 1992, por ejemplo, se añadió un segundo a la hora mundial, a las, precisamente, 24 horas y cero segundos.

Pero realmente no es de estos detalles de los que yo quería hablar en esta voz (como sabe todo autor, una vez que se abre la puerta de una página a un término, concepto o personaje, éstos cobran vida y se independizan). De todas maneras, no está mal que en lugar de comenzar con aspectos generales, lo haya hecho con cuestiones más o menos empíricas. No seré yo quien intente convencerle a usted, amigo lector, de que la ciencia es por encima de todo, en última instancia, *únicamente*, el manejo de operaciones, de datos observacionales. Otros cometieron ese error (Percy Bridgman [1882-1961], por ejemplo, todo un premio Nobel de Física metido a filósofo de la ciencia; defendía la idea —en libros como su célebre *The Logic of Modern Physics*, 1927— de que sólo es lícito introducir en nuestras teorías científicas conceptos reducibles de manera directa a operaciones físicas). Sin embargo, tampoco conviene exagerar la nota y olvidar que la experiencia y cuantificación mediante la medición es siempre un personaje destacado de ese guión que es la física. Dicho lo cual, continuaré por donde quería haber empezado.

El tiempo es, efectivamente, algo familiar para todos nosotros. Lo sentimos biológicamente: cuando envejecemos, «pasa el tiempo». Y además, como acabamos de ver, somos capaces de cuantificar, de medir, ese paso del tiempo. Pero eso no es suficiente. Nos gustaría darle una «sustancia teórica» mayor. Esto es algo que sólo ha logrado la física teórica, no la biología, la ciencia que trata, entre otras cuestiones, de cómo cambian los cuerpos orgánicos (esto es, con vida) cuando transcurre el tiempo. Éste, el tiempo, es, podríamos decir, uno de los grandes, sempiternos, protagonistas de la física, una disciplina

que tiene entre sus metas la de ser capaz de predecir la evolución de los movimientos, los cambios, que se observan en la naturaleza. Para ello introduce en sus ecuaciones una variable a la que llama «tiempo». Podríamos decir que sin tiempo no habría física.

Pero ni siquiera algo tan aparentemente elemental como un parámetro, como una variable, está libre de problemas, o más bien de contenido conceptual. Y así el tiempo de la física teórica ha sufrido profundos cambios a lo largo de la historia. Del tiempo absoluto newtoniano, que Leibniz combatía con gran agudeza filosófica en favor de un tiempo relacional, se llegó al tiempo relativo de la teoría de la relatividad especial einsteniana. Un tiempo este que hace que cada observador tenga derecho a reclamar su «tiempo local», su «tiempo propio» [véase RELATIVIDAD]. Desgraciadamente, esta democrática exigencia no siempre hace la vida más fácil: entre otras complicaciones, cabría recordar la que surge cuando, al tratar de explicar la interacción (o, si se quiere, el movimiento) de un sistema con varios cuerpos, tenemos que incluir en nuestras ecuaciones de movimiento tantos tiempos como cuerpos. Aumenta así el número de variables de nuestro sistema, y la dificultad para tratarlo matemáticamente. La mecánica cuántica nos suministra un buen ejemplo en este sentido: acaso la idea más natural para intentar hacer relativista la teoría desarrollada por Heisenberg y Schrödinger sea la de hacer depender, en la ecuación de ondas de Schrödinger, a la función de onda no sólo de la posición y velocidad de cada una de las partículas que intervienen, sino también de sus respectivos tiempos propios. Sin embargo, semejante proliferación de variables convierte el problema en prácticamente irresoluble matemáticamente, y así hubo que optar por otras soluciones (una formulación mediante campos; la electrodinámica cuántica, por ejemplo).

Otro problema para el tiempo de la física radica en el hecho de que la gran mayoría de sus ecuaciones básicas no distinguen entre un tiempo que avanza y otro que retrocede; son, como se dice técnicamente, invariantes bajo inversión temporal (cambio de t a $-t$). Pero, sabemos que, por desgracia, el tiempo fluye siempre hacia el futuro, que el tiempo no nos da la oportunidad de corregir errores (al menos no en la presente situación del universo). De hecho, en la naturaleza se detectan asimetrías temporales —o flechas del tiempo— en diferentes tipos de fenómenos. Así, se habla de las siguientes *flechas del tiempo*:

—*la flecha del tiempo termodinámica*: surge del hecho de que todos los sistemas casi aislados evolucionan hacia un estado de equilibrio en la misma dirección temporal (teóricamente, este hecho se resume en el principio del crecimiento de la entropía, un principio, a su vez, sujeto a profundos problemas de interpretación);

—*flecha del tiempo electromagnética*: los cuerpos cargados (como los electrones) acelerados radian, esto es, emiten energía hacia el futuro, no la reciben de él;

—*flecha del tiempo psicológica*: recordamos el pasado, mientras que intentamos —a través de la ciencia— predecir el futuro;

—*flecha del tiempo cosmológica*: determinada por la dirección que marca la expansión del universo (el tiempo crece según aumenta el radio del universo);

—*flecha del tiempo «elemental»*: la que establece un tipo de no invariancia en procesos elementales, microscópicos, en las interacciones débiles.

Explicar estas asimetrías del tiempo, y en particular la relación que existe entre ellas (el físico nunca renuncia a establecer conexiones, es la esencia de su trabajo), constituye una de las grandes tareas pendientes de la ciencia contemporánea.

U

UNIVERSO. Desde muy joven pensé que si hubiese tenido la oportunidad de ser tentado como lo fue Fausto, una de las pocas ofertas que habría considerado sería la de conocer la historia, completa, del universo; si hubo realmente un principio, y, en ese caso, qué quiere decir «un principio»; si lo que denominamos «el universo» es único, o existen otros universos, como proponen, por ejemplo, algunas interpretaciones de la mecánica cuántica [véase MUCHOS UNIVERSOS, TEORIA DE LOS]; además, naturalmente, de todos los detalles de la historia de ese —o esos— universo.

Ahora la pregunta me sigue, por supuesto, interesando, fascinando incluso, aunque ya no estoy nada seguro de que vendiera mi alma —entre otras razones porque tampoco está bien mercadear con algo que no se sabe muy bien lo que es, ni si existe— a un imaginario diablo por semejantes explicaciones. Si he cambiado de idea, que no lo sé con seguridad, probablemente es porque me importan más las cosas más próximas, porque encuentro en ellas mayor grandeza, dentro de su temporalidad y aparente pequeñez, que en lo cósmico. Pero no sólo por eso. Desde mi juventud he aprendido muchas cosas acerca del universo, y he visto cómo la humanidad ha ampliado de manera sustancial lo que sabemos acerca de él. Estoy seguro de que el cosmos nos guarda todavía muchas sorpresas, y a mí me gustaría, naturalmente, conocerlas, pero ninguna será tan básica, tan fundamental como la propia existencia del universo, y no creo que exista ninguna explicación ontológicamente satisfactoria a esta cuestión. Como sugiero en otros lugares de este diccionario, existen límites ontológicos a la capacidad explicativa de la física, y, por otra parte, tampoco creo que recurrir a un ente superior como creador de todo constituya ninguna explicación auténtica [véase DIOS], así que para qué jugarse tanto cuando se tienen esperanzas tan limitadas.

Por razones algo parecidas, entiendo muy bien una tentativa lanzada en 1948 por Thomas Gold (1920-2004), Hermann Bondi (1919-2005) y Fred Hoyle. Estos tres científicos, que trabajaban en Inglaterra, propusieron la idea (denominada «cosmología del estado estable») de que el universo no ha tenido principio ni tendrá final. «Es posible —escribió Hoyle— obtener un universo en expansión, en el que la densidad de materia permanezca constante, mediante la creación continua de materia. Esta posibilidad parece atractiva, especialmente cuando se toma en conjunción con objeciones estéticas a la creación del universo en el pasado remoto. *Ya que es contrario al espíritu de la investigación científica el considerar efectos observables como debidos a “causas desconocidas a la ciencia”, y esto es lo que en principio implica la creación en el pasado.*»

Sin duda que se habrán dado cuenta de que incluso en esta *materialista* explicación científica, se recurre a la creación (de materia) para evitar una creación cósmica. Es, sin duda, una contradicción, pero no tan grande como se pueda pensar: dentro de ciertas teorías de la física —como la electrodinámica cuántica— se recurre a la creación —y aniquilación— de partículas. El que se tenga que aceptar que se deben *crear* aproximadamente tres átomos de hidrógeno por metro cúbico cada millón de años, no es satisfactorio, por supuesto, pero tampoco es esencialmente diferente a otros tipos de recursos que utiliza la física. Subjetivamente, me parece que una gran explosión que dio lugar a «todo» es algo diferente.

Pero estoy avanzando demasiado rápidamente. ¿Cómo —hay que preguntarse antes que nada— se llegó a la idea, ampliamente aceptada en la actualidad, de que existió un

origen del universo, un *big bang*? Contestaré a esta pregunta, tan fascinante, de una manera —ya lo sé— excesivamente esquemática, pero es que este libro es sólo un diccionario.

Aprovechándose del desarrollo de los medios observacionales (como telescopios o espectrógrafos), los astrofísicos de finales del siglo XIX y comienzos del XX pudieron responder a la pregunta de si la Vía Láctea agota, engloba, o no todo el universo. A finales de 1924 el denominado «Gran debate» quedó definitivamente sentenciado: tras identificar cefeidas (estrellas de luminosidad variable, aunque regular, descubiertas por Henrietta Leavitt [véase MUJERES y CIENCIA]) en nebulosas espirales, Edwin Hubble (1889-1953) pudo determinar la distancia a que se encuentran las nebulosas espirales que se observaban. Ésta era mayor que las dimensiones de nuestra galaxia; en consecuencia estaban fuera de ella: el universo, había que concluir, está formado por una colección de galaxias.

El 1 de enero de 1925, Hubble hizo público su descubrimiento, en uno de esos raros momentos en los que nuestro conocimiento de la naturaleza experimenta una modificación auténticamente fundamental, dramática. Pocos años después, en 1929, Hubble realizaba —utilizando también cefeidas— otro descubrimiento básico y mucho más inesperado: las galaxias se separan entre sí, a mayor velocidad cuanto más alejadas se encuentran. Y si esto es así, retrocediendo hacia el pasado, debió de existir un momento en el que todas las galaxias se encontrasen en un mismo lugar, del que habrían partido en una gran explosión. Así surgió la idea de la expansión del universo. Nunca volvería la especie humana a mirar el cosmos —con los ojos del intelecto— de la forma en que lo había hecho hasta entonces.

Fue, por consiguiente, un descubrimiento experimental, aunque de manera independiente y prácticamente simultánea estuviesen realizándose aportaciones teóricas en la cosmología relativista fundada por Einstein en 1916, que conducían a modelos cosmológicos en los que el universo se expandía. Teoría y observación confluían en una hermosa síntesis.

Existen otras evidencias que apoyan la creencia de que hace, aproximadamente, trece mil quinientos millones de años se produjo una Gran Explosión, un *big bang*. La principal, la que hizo que, salvo para unos pocos (esencialmente Hoyle), se abandonase la idea de la cosmología del estado estable, es el descubrimiento, en 1964, por Arno Penzias (1933) y Robert Wilson (1936), que trabajaban en los laboratorios Bell, de lo que se denomina «fondo de radiación cósmica de microondas». Al detectar esta radiación se estaba observando —parece mentira que se pueda lograr algo así— un resto, una reliquia, del universo primitivo. El que tal fondo corresponda a una temperatura de unos tres grados Kelvin, obviamente mucho más pequeña de la que debió imperar en los primeros instantes del universo, se debe a que éste ha estado expandiéndose desde entonces, ocupando la misma cantidad de radiación un volumen cada vez mayor, enfriándose en definitiva. (Una de las características del fondo de microondas es su gran uniformidad espacial. Recientemente, ha sido posible detectar —con el denominado satélite COBE, de «Cosmic Background Explorer Satellite»— algunas irregularidades, *arrugas en el tiempo* que se asocian con los gérmenes de las galaxias, que surgieron, cuando el universo tenía alrededor de trescientos mil años de vida, de aquella caótica pero uniforme explosión inicial).

Desde el punto de vista teórico, no se produjeron excesivas novedades en lo que se refiere a nuestro conocimiento de los primeros instantes del universo hasta que, a partir de finales de los años sesenta, algunos físicos de altas energías se dedicaron a utilizar sus recursos en aquel escenario, en el que si algo hubo fue, precisamente, altas energías. Ya he descrito [véanse SIMETRÍA y NUCLEOSÍNTESIS] algunos de los principales resultados obtenidos en este campo, que han iluminado —y sin duda seguirán haciéndolo— nuestra

comprensión no sólo del universo, sino de las distintas interacciones que se dan en la naturaleza.

En cuanto al universo desde una perspectiva más global y más madura, en la actualidad se admite la existencia de objetos astronómicos que hace unas pocas décadas ni siquiera se sospechaba que podían existir, como agujeros negros, púlsares, quásares o estrellas de neutrones, que también he mencionado en otros lugares de este libro. Otro descubrimiento notable realizado recientemente (en los años setenta), que introduce un tipo diferente de jerarquización en el universo, es el de que la Vía Láctea se mueve por el cosmos a seiscientos kilómetros por segundo, una velocidad esta que no se puede entender únicamente basándose en un Gran Estallido. Lo que esta velocidad parece indicar es que existe una concentración de masa muy grande y lejana (se estima que está situada a algunos cientos de millones de años-luz de la Tierra y se la denomina «Gran atractor») que arrastra a nuestra galaxia. Surge de esta manera una imagen cósmica esencialmente nueva, que ha terminado concretándose en un modelo con algunas regiones del universo virtualmente desprovistas de galaxias, mientras que otros miles de millones de ellas forman inmensos supercúmulos galácticos que ejercen una enorme influencia gravitacional sobre otras distantes de ellas cientos de millones de años-luz. El universo, en definitiva, no es tan uniforme como creíamos.

Otro descubrimiento, muy reciente y sorprendente, del que me ocupo en otro lugar de este diccionario, es que hay más materia y energía en el universo de la que sospechábamos. [Véase MATERIA OSCURA].

Qué otras novedades conceptuales y observacionales nos puede traer el futuro es algo sobre lo que por el momento es difícil especular.

[Véase también MUCHOS UNIVERSOS, TEORÍA DE LOS].

V

VIDA. Me hubiera gustado terminar mi diccionario con esta alegre voz, lo mismo que comencé con ADN, la esencia molecular de la vida. Pero la ordenada aleatoriedad del alfabeto me lo impide; todavía resta virus.

La vida es un fenómeno peculiar, que se da en al menos un lugar del universo, la Tierra (sería francamente extraño que sólo existiera en este planeta), y que resulta bastante difícil de definir. Una definición procedente de la biología molecular sostiene que la vida es una propiedad de los «organismos que contienen información hereditaria reproducible codificada en moléculas de ácido nucleico, y que metabolizan al controlar el ritmo de reacciones químicas utilizando catalizadores proteínicos conocidos como enzimas». Yo prefiero una definición más simple: «Los organismos vivos son aquellos que poseen la capacidad de reproducirse y metabolizar sustancias (alimentarse)». De esta manera, se evita hacer hincapié en los ácidos nucleicos; tal vez, en algún lugar del universo exista vida que no dependa de estas moléculas.

En las antiguas civilizaciones se creía que la vida aparecía de manera espontánea a partir de materia inanimada. Observaciones diarias parecían confirmar tal idea: se veía aparecer gusanos de la descomposición de materiales orgánicos, y moscas de trozos de carne expuestos al Sol. Hacia el final del siglo XVII, Francesco Redi (1626-1698) observó que en un frasco abierto el pescado putrefacto generaba, al cabo de un tiempo, moscas, mientras que no ocurría lo mismo con un jarro idéntico pero cerrado. De este experimento extrajo la consecuencia de que las moscas no surgían del pescado, sino de huevos. Sin embargo, la meticulosidad científica de Redi no fue lo suficientemente poderosa como para impedir el paso a especulaciones religiosas que utilizaron sus descubrimientos para señalar que aunque era cierto que la vida no surgía espontáneamente sino sólo de vida preexistente, la cadena de progenitores biológicos que esta idea requería debía tener un punto de partida: en el comienzo Dios había creado todos los animales y plantas que existen.

En las décadas que siguieron al descubrimiento de Redi, la invención y utilización del microscopio sirvió para observar microorganismos de todo tipo. Estas observaciones revivieron entre muchos la creencia en la generación espontánea de la vida. Sería Louis Pasteur (1822-1895), en 1862, quien demostró claramente que la vida sólo procede de la vida. Para llegar a esta conclusión se sirvió de experimentos no demasiado diferentes de los de Redi. En primer lugar, demostró que hay microorganismos que viven en el aire que nos rodea y que pueden contaminar incluso el cultivo más estéril. A continuación mostró que si un caldo de este tipo de cultivos era introducido en un recipiente sellado al vacío, en el que no podía penetrar el aire, no surgía en él ningún microorganismo. «No, no hay ninguna circunstancia hoy conocida —manifestaba Pasteur orgullosamente en una conferencia que pronunció en la Sorbona en 1864— en la que se pueda afirmar que seres microscópicos han venido al mundo sin gérmenes, sin padres semejantes a ellos. Los que lo pretenden han sido juguetes de ilusiones, de experiencias mal hechas, plagadas de errores que no han sabido percibir o que no han sabido evitar». La vida, por tanto, sólo procede de la vida.

Pero si concluimos que el único origen de la vida es la propia vida, ¿debemos recurrir, como aquellos que utilizaron los experimentos de Redi, a un Dios todopoderoso que en algún momento del pasado creó todo lo que contiene la naturaleza? Éste es el problema: ¿cómo surgió la vida inicialmente?

Instalados en el familiar escenario terráqueo, ¿cómo aproximarnos a la pregunta del

origen de la vida? Desde luego no como uno se acerca a, por ejemplo, la cuestión del origen de la especie humana. En este caso disponemos de fósiles, mientras que no existe ningún registro geológico acerca de la evolución prebiótica. Sólo nos quedan, pues, experimentos y teorías. Pero si hemos podido construir modelos, aparentemente satisfactorios, del origen del universo, ¿por qué no podemos ser capaces de hacer lo mismo con la vida?

El estudio de la evolución prebiótica se divide en tres etapas principales: la geofísica, la química y la biológica. La primera se ocupa de la historia de la Tierra primitiva y especialmente de la atmósfera que reinaba entonces. La fase química trata de la síntesis, mediante procesos naturales que debieron tener lugar en la atmósfera y en los océanos, de los bloques químicos de la vida; esto es, de grupos nucleicos y aminoácidos de los que se pudieron fabricar, posteriormente, las proteínas y ácidos nucleicos como el ADN y ARN. La etapa biológica es el escenario en el que aparecieron las primeras organizaciones biológicas, poblaciones coordinadas de proteínas y ácidos nucleicos.

Lo primero que hay que hacer, por tanto, es intentar imaginar cómo fue la Tierra primitiva. Pero hay muchos escenarios en los que tuvo lugar aquella representación.

Uno de esos escenarios, el más importante de la primera etapa, es el atmosférico. En la década de los años veinte y treinta del siglo XX (su famoso libro *El origen de la vida sobre la Tierra* se publicó en 1936) el bioquímico ruso Alexander Oparin (1894-1980) y, unos pocos años más tarde, el británico John Burton S. Haldane (1892-1964), propusieron que la atmósfera de la Tierra primitiva era muy diferente de la actual; que estaba formada por una mezcla de moléculas de hidrógeno, gas metano, vapor de agua y amoníaco. Experimentos posteriores demostraron que es muy posible que éste fuera el caso, ya que en presencia de moléculas de hidrógeno (H_2) en abundancia, carbono, oxígeno y nitrógeno no pueden permanecer libres sino que forman moléculas como H_2O , NH_3 y CH_4 (agua, amoníaco y metano).

La atmósfera primitiva era, por tanto, altamente reductora, en contraste con la atmósfera oxidante actual, compuesta por nitrógeno y oxígeno. Antes de la aparición de la vida —es decir, durante la fase prebiótica de la historia de la Tierra— la mayor parte del oxígeno terrestre estaba combinado, en forma de óxidos, en los minerales y el agua. El oxígeno molecular no apareció en la atmósfera hasta hace unos dos mil millones de años, con el advenimiento de los organismos fotosintéticos que liberan oxígeno a partir del agua.

También es muy importante considerar el intercambio entre atmósfera y medios líquidos (estanques, lagos, mares y océanos) primitivos. Éstos debieron de estar expuestos a todo tipo de agentes físicos, como la luz ultravioleta o cambios de temperatura (debidos, por ejemplo, a la alternancia de día y noche), que producían evaporación y lluvia, que se mezclaban con la atmósfera. Aquellos mares arcaicos albergaban los ingredientes químicos de los que se formaron combinaciones de moléculas que se rompían y volvían a formar de nuevo, siendo la entrada constante de energía procedente del Sol la causa de aquellas uniones moleculares. A medida que los microambientes se estabilizaban, se iban formando cadenas de moléculas cada vez más complejas y que permanecían intactas por periodos mayores.

En la década de los años cincuenta Stanley Miller (1930), siguiendo los consejos de Harold Urey (1893-1981), fabricó moléculas orgánicas en una atmósfera de hidrógeno, amoníaco, metano y cianuro, irradiándola con luz ultravioleta o provocando descargas eléctricas de hasta 160 000 voltios. Miller —que con estas investigaciones abrió un nuevo campo de la ciencia, la «química prebiótica»— obtuvo una enorme variedad de moléculas, entre las que había algunos aminoácidos y azúcares.

Los seguidores de Miller introdujeron nuevos métodos y fuentes energéticas. Melvin Calvin (1911-1997), por ejemplo, bombardeó atmósferas primitivas con electrones muy energéticos que habían sido acelerados en un ciclotrón. De esta forma logró aminoácidos, azúcares, urea y otras sustancias orgánicas.

Por otra parte, sabemos que se han detectado en cometas algunas moléculas orgánicas, como cianuro de hidrógeno (HCN) y amoníaco. En 1960, el bioquímico español Juan Oro (1923-2004) combinó estas sustancias en una solución de agua que calentó durante 24 horas a 90 °C, y, para su sorpresa, encontró que había sintetizado adenina (H₅C₅N₅), uno de los nucleótidos que componen el ADN y el ARN. Claro que también está la posibilidad de que cinco moléculas de HCN se combinen produciendo H₅C₅N₅, con lo cual realmente no sabemos en qué medida algunos elementos necesarios para la vida pudieron proceder del cosmos o fabricarse en la Tierra. (También se han encontrado moléculas orgánicas en nubes de polvo interestelar y en meteoritos; por ejemplo, alcohol etílico, CH₃-CH₂-OH. Probablemente estas moléculas fueron sintetizadas durante la condensación de planetas o en la nebulosa solar de la que terminaría surgiendo también la Tierra).

Otras investigaciones han mostrado que CH₄ y NH₃, elementos de la atmósfera primitiva, pueden producir HCN, que, como acabamos de ver, genera a su vez adenina. También la combinación de metano y moléculas de agua puede dar lugar a formaldehído, CH₂O, que con el cianuro de hidrógeno puede dar lugar a diversas moléculas orgánicas.

La demostración de que esto era así, la proporcionaron más experimentos. Cyril Ponnamperna (1923-1994) expuso una solución de HCN a la acción de lámparas ultravioletas. Después de una semana encontró adenina, guanina y urea.

Los gases calientes y materiales incandescentes emitidos por los volcanes debieron de ser otra fuente energética disponible en la Tierra primitiva. Sidney Fox (1912) ha simulado este escenario calentando a 1000 °C una mezcla prebiótica de agua, metano y amoníaco, obteniendo todos, salvo dos, de los aminoácidos existentes.

Hacia mediados de la década de 1970, por consiguiente, se hizo evidente que todas las moléculas orgánicas relevantes para la formación de aminoácidos, azúcares y adenina pudieron ser fabricadas en las condiciones que reinaron en la Tierra primitiva.

Pero a pesar de todos estos avances, estamos todavía lejos de dar el salto que va de los constituyentes básicos que forman la vida a los organismos vivos más elementales, que no obstante su aparente simplicidad, poseen una gran complejidad. En la actualidad sabemos, por ejemplo, que la bacteria intestinal *Escherichia coli*, un diminuto microorganismo ocupante habitual e inocuo de nuestro colon, contiene un complejo sistema de moléculas de proteínas y ácidos nucleicos que almacenan una cantidad enorme de información biológica altamente específica. Algunos científicos, como Lynn Margulis (1938), una de las investigadoras más destacadas en el campo del origen de la vida, piensan que los varios miles de genes de *Escherichia coli* parecen ser el número mínimo de genes que ha de poseer incluso el microorganismo más simple para llevar una existencia autónoma. Los virus, que ciertamente tienen menor complejidad estructural que las bacterias y contienen menos genes, no deben, como explico a continuación, incluirse en la categoría de los organismos vivos.

No sabemos aún cómo construir estos organismos, ni siquiera el ARN, más simple que el ADN pero acaso más básico. Es probable, en definitiva, que los sistemas bioquímicos actuales, aquellos con los que estamos ya bastante familiarizados, sólo sean una pequeña muestra de todos los que se ensayaron durante la etapa prebiótica. En última

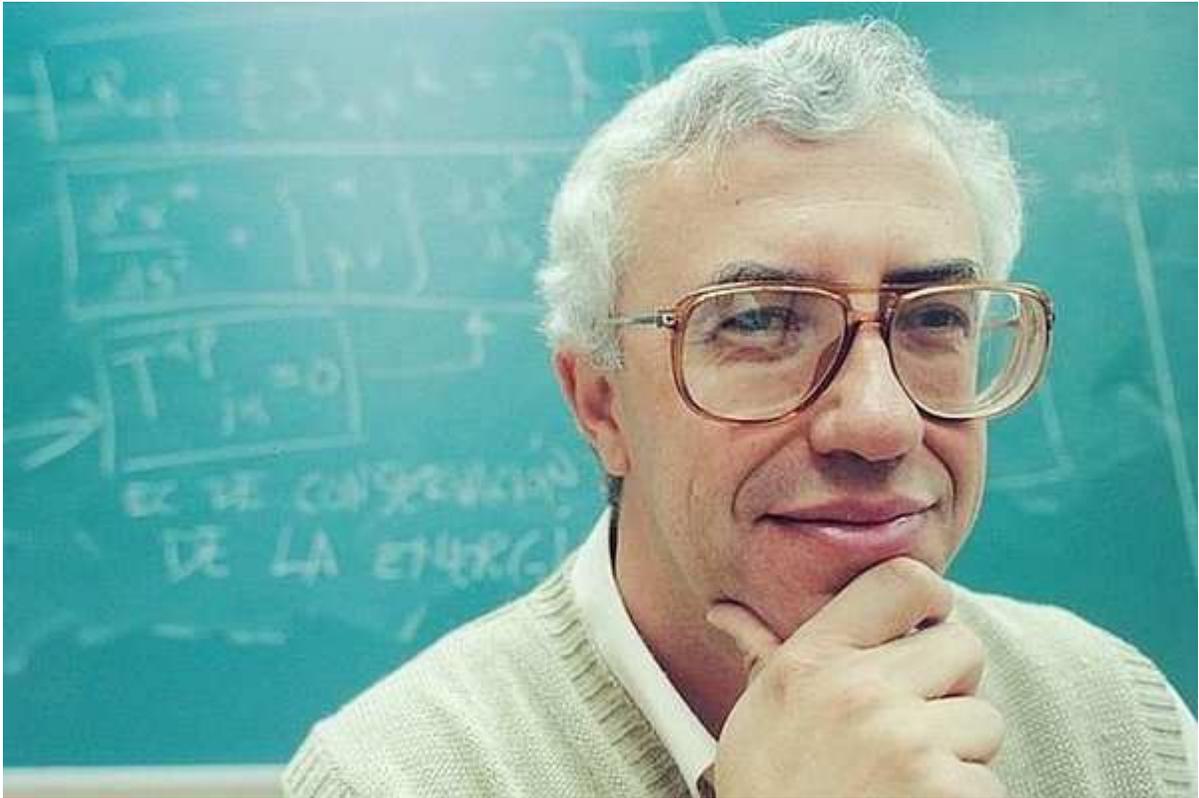
instancia, no debemos olvidar que el camino que estamos intentando recorrer será, sin duda, muy largo. Una molécula «normal» puede estar formada por diez átomos, pero una célula contiene del orden de 10^{10} (diez mil millones) átomos, y un organismo con algún grado de autonomía «vital» 10^{20} .

[Véanse también AGUA y PROTEÍNA].

VIRUS. Agente patógeno de tamaño ultramicroscópico, formado por un núcleo de ácido nucleico (ADN o ARN) protegido por una cubierta proteica. Los virus son organismos que no poseen actividad metabólica (no pueden traducir a proteínas su información genética), por lo que únicamente pueden sobrevivir y reproducirse si invaden una célula viva, de cuyos sistemas se benefician, aunque en el proceso pueden alterar profundamente el ADN de la célula que los acoge (en este sentido, no son seres vivos). Un cuerpo humano sano reacciona ante la invasión de un virus produciendo una proteína antiviral, el interferón, que impide que la infección se extienda a las células adyacentes.

Muchos virus mutan constantemente, de manera que el cuerpo que los recibe tiene pocas posibilidades de desarrollar una resistencia permanente a ellos. Entre las enfermedades producidas por virus se encuentran la viruela, la varicela, los herpes, la fiebre amarilla, la rabia, y el sida y algunas formas de cáncer.

Los virus son, por consiguiente, objetos biológicos sencillos, acaso incluso simples, pero no por ello carentes de «inteligencia», por decirlo de alguna manera. Han sido capaces de diseñar buenas tácticas de supervivencia. Y es que la sencillez, no se olvide, tiene bastantes aspectos positivos. En la naturaleza, en la ciencia y, también, en la vida.



JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON, nacido en Madrid el 6 de enero de 1949, es un físico, historiador de la ciencia, académico de la Real Academia Española de la Lengua y catedrático de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid. Es autor de una obra considerable en física teórica y, sobre todo, en historia de la ciencia. Una obra en la que combina el rigor del análisis histórico y científico con la claridad, la belleza narrativa y pasión de los mejores humanistas.