

descubriendo al mismo tiempo una descripción concisa de la totalidad del flujo, compuesta de regularidades comprimidas y de información aleatoria suplementaria incompresible. Análogamente, un programa breve que haga que el ordenador imprima el mensaje (y luego se detenga) puede modificarse para que consista en un programa básico que describa las regularidades de la cadena más una parte adicional que aporte información sobre sus circunstancias específicas accidentales.

Aunque nuestras disquisiciones sobre el concepto de teoría apenas han arañado la superficie de este tema, hemos mencionado ya la teorización sobre los topónimos, sobre fórmulas empíricas en estadística, sobre la altura de los montones de arena y sobre el electromagnetismo clásico y la gravitación. Aunque hay una gran similitud formal entre estas diversas clases de teorización, cada una implica descubrimientos en muchos niveles diferentes, entre los que resulta útil hacer una distinción. ¿Se están estudiando las leyes básicas de la física? ¿O leyes aproximadas aplicadas a objetos físicos desordenados como los montones de arena? ¿O leyes empíricas, generales aunque aproximadas, sobre instituciones humanas, como ciudades o compañías financieras? ¿O reglas específicas, cargadas de excepciones, sobre los nombres que la gente aplica a una región geográfica determinada? Existen claras e importantes diferencias en exactitud y generalidad entre toda esta diversidad de principios teóricos. Esas diferencias se discuten frecuentemente en términos de cuáles son más fundamentales que los demás. Pero, ¿qué significa esto?

## 9

### ¿Qué es lo fundamental?

El quark y el jaguar se encuentran prácticamente en los extremos opuestos de la escala de lo fundamental. La física de las partículas elementales y la cosmología son las dos disciplinas científicas más básicas, mientras que el estudio de la materia viva altamente compleja es mucho menos básico, aunque obviamente de la mayor importancia. A fin de discutir esta jerarquía de las ciencias, es necesario desenredar al menos dos ovillos distintos, uno de los cuales tiene que ver con convenciones y el otro con las afinidades reales entre las diferentes materias.

Una vez me contaron que la facultad de ciencias de una universidad francesa solía tratar los asuntos relativos a sus diversas cátedras en un orden fijo: primero las matemáticas, y después la física, la química, la fisiología, etc. Cabe pensar que los asuntos de los biólogos debían de estar bastante desatendidos.

Igualmente, en el testamento de Alfred Nobel, el magnate sueco de la dinamita que estableció los premios que llevan su nombre, los premios científicos están ordenados con la física en primer lugar, la química en segundo, y la medicina y fisiología en tercero. Debido a ello, el premio de física es el primero en entregarse al comenzar la ceremonia en Estocolmo. Si sólo hay un galardonado y se trata de un hombre casado, su mujer acude del brazo del rey a la cena que se celebra más tarde (cuando mi amigo Abdus Salam, paquistaní musulmán, compartió el Nobel de física en 1979, se presentó en Suecia con sus dos esposas, provocando no pocos problemas de protocolo). El ganador o ganadores del Nobel de química ocupan el segundo lugar en el protocolo, y los de medicina y fisiología el tercero. Las matemáticas no fueron incluidas en el testamento de Nobel por razones algo oscuras. Un persistente rumor afirma que Nobel estaba enemistado con un matemático sueco, Mittag-Leffler, por el amor de una mujer, pero, por lo que sé, no es más que una leyenda.

El origen de esta jerarquía en las ramas de la ciencia puede situarse en el trabajo del filósofo decimonónico francés Auguste Comte, quien sostuvo que la astronomía era la disciplina científica fundamental, la física la segunda, etc. (consideraba la matemática más como un útil lógico que como una auténtica ciencia). ¿Estaba en lo cierto? Y si es así, ¿en qué sentido? Llegados a este punto, hay que dejar de lado las cuestiones de prestigio e intentar comprender qué significa realmente esta jerarquía en términos científicos.

### *El carácter especial de la matemática*

En primer lugar, es cierto que la matemática no es realmente una ciencia, si por ciencia entendemos una disciplina dedicada a la descripción de la naturaleza y de sus leyes. La matemática se ocupa de demostrar las consecuencias lógicas de determinados conjuntos de suposiciones. Se puede por tanto omitir de la lista de las ciencias (como hizo Nobel) y considerarla tanto una materia interesante por derecho propio (matemática pura) como una herramienta extremadamente útil para las ciencias (matemática aplicada).

Otra manera de enfocar el asunto consiste en considerar la matemática aplicada como el estudio de todas aquellas estructuras que se dan en las teorías científicas, mientras que la matemática pura cubre no sólo éstas, sino todas aquellas que podrían haberse dado (o podrían darse en el futuro). La matemática se convierte así en el estudio riguroso de mundos hipotéticos. Desde este punto de vista, la matemática es una clase de ciencia, la ciencia de lo que es y de lo que podría haber sido.

Considerada de esta forma, ¿es la matemática la más fundamental de las ciencias? En cuanto a las otras disciplinas ¿qué significa la afirmación de que la física es más fundamental que la química, o la química más que la biología? ¿Qué pasa con las diferentes partes de la física: son algunas más fundamentales que las otras? En general, ¿qué es lo que hace que una ciencia sea más fundamental que otra?

Sugiero que la ciencia A tiene un carácter más fundamental que la ciencia B cuando:

1. Las leyes de la ciencia A abarcan los fenómenos y leyes de la ciencia B.
2. Las leyes de la ciencia A son más generales que las de la

ciencia B (es decir, las propias de B son válidas bajo unas condiciones más restrictivas que las de A).

Si consideramos la matemática como una ciencia, entonces, de acuerdo con estos criterios, ésta tiene un carácter evidentemente más fundamental que cualquier otra. Todas las estructuras matemáticas concebibles entran dentro de su esfera, mientras que las útiles para describir fenómenos naturales representan sólo un pequeño subconjunto de aquellas que son, o serán, estudiadas por los matemáticos. Este subconjunto de leyes matemáticas cubre todas las teorías empleadas en las demás ciencias. Pero, ¿qué sucede con estas otras ciencias? ¿Cuáles son las relaciones entre ellas?

### *La física del electrón y la química*

Se dice que en 1928, cuando publicó su ecuación mecanocuántica relativista para el electrón, el destacado físico teórico inglés Paul Adrien Maurice Dirac declaró que su fórmula explicaba la mayor parte de la física y toda la química. Naturalmente, era una exageración. No obstante, se puede entender lo que quería decir, especialmente en lo referente a la química, que estudia principalmente el comportamiento de átomos y moléculas, compuestos a su vez por un núcleo masivo rodeado de electrones ligeros que se mueven a su alrededor. Casi todos los fenómenos químicos están gobernados en gran medida por el comportamiento de los electrones, que interactúan entre sí y con el núcleo a través de fuerzas electromagnéticas.

La ecuación de Dirac, que describe la interacción del electrón con el campo electromagnético, dio lugar en pocos años a la eclosión de la teoría mecanocuántica relativista del electrón y el electromagnetismo. Esta teoría, la electrodinámica cuántica, abreviada QED (del inglés *quantum electrodynamics*), ha sido verificada experimentalmente con enorme precisión repetidas veces (y merece por ello la abreviatura, que a algunos nos recuerda aquellos días de escuela en que al final de una demostración matemática poníamos las siglas latinas «QED» para indicar *quod erat demonstrandum*, «lo que se quería demostrar»).

La QED explica, en principio, una gran parte de la química. Puede aplicarse rigurosamente a todos aquellos problemas en que los núcleos pesados pueden aproximarse por partículas puntuales cargadas e in-

móviles. Extensiones simples de la QED permiten incorporar también el movimiento del núcleo y su tamaño finito.

En principio, un físico teórico que trabaje con la QED puede determinar el comportamiento de cualquier sistema químico en el que la estructura interna del núcleo atómico no sea importante. Los cálculos sobre estos procesos químicos, que se valen de aproximaciones válidas de la QED, predicen satisfactoriamente los resultados experimentales. De hecho, hay una aproximación particular bien justificada de la QED que producirá buenos resultados en la mayoría de casos: es la llamada ecuación de Schrödinger con interacciones coulombianas, aplicable cuando el sistema es «no relativista», es decir, cuando electrones y núcleos se mueven con velocidades muy pequeñas comparadas con la de la luz. Esta aproximación fue descubierta en los primeros días de la revolución cuántica, tres años antes de la aparición de la ecuación relativista de Dirac.

Para que de las teorías físicas fundamentales se deriven propiedades químicas es preciso, por así decirlo, formular preguntas de química a la física. Deben introducirse en los cálculos no sólo las ecuaciones básicas, sino también las condiciones que caracterizan el sistema o proceso químico en cuestión. Tenemos, por ejemplo, que el estado de mínima energía de dos átomos de hidrógeno es la molécula de hidrógeno  $H_2$ . Una cuestión importante en química es la energía de enlace de esta molécula, es decir, la diferencia entre la energía de la molécula y la suma de las energías de los dos átomos individuales que la componen. Una vez planteada, la respuesta a esta pregunta puede obtenerse por medio de la QED. Pero es necesario «preguntar a la ecuación» cuáles son las propiedades del estado de mínima energía de esa molécula en particular.

Las condiciones de baja energía en que surgen estas cuestiones químicas no son universales. En el centro del sol, donde reina una temperatura de decenas de millones de grados, los átomos de hidrógeno se disgregan en sus electrones y protones constituyentes. Ni átomos ni moléculas están presentes allí en cantidades apreciables. Se puede decir que la química no existe en el centro del sol.

La QED satisface los dos criterios que permiten considerarla más fundamental que la química: las leyes de la química son derivables, en principio, de las de la QED, siempre que se suplementen las ecuaciones con información adicional que describa las condiciones químicas adecuadas, y por otra parte, estas condiciones son especiales, no son válidas en todo el universo.

### *La química en su propio nivel*

Aun con la ayuda de los mayores y más rápidos ordenadores disponibles en la actualidad, a partir de la teoría física básica sólo son abordables los problemas químicos más simples. El número de problemas tratables está creciendo, pero la mayoría de procesos químicos se describe todavía haciendo uso de ideas, conceptos y fórmulas propios de la química.

En general, los científicos suelen desarrollar teorías para describir resultados observados en un campo particular sin derivarlos de las teorías de un campo más fundamental. Tal derivación, aunque en principio resulta posible si se suministra la información adicional necesaria, es en la mayor parte de casos muy difícil o imposible de llevar a la práctica.

Por ejemplo, los químicos diferencian varios tipos de enlace entre átomos (un ejemplo es el enlace entre los dos átomos de la molécula de hidrógeno). En el curso de su experiencia, han desarrollado numerosas ideas prácticas sobre el enlace químico que les permiten realizar predicciones sobre el comportamiento de las reacciones químicas. Al mismo tiempo, los químicos teóricos intentan derivar esas ideas, en la medida de lo posible, de aproximaciones de la QED. Salvo en los casos más simples, su propósito sólo se ha visto parcialmente coronado por el éxito, pero no albergan dudas de que en principio, con la suficiente potencia de cálculo, podrían alcanzar su objetivo con gran precisión.

### *Escaleras (o puentes) y reducción*

Nos vemos así abocados a la metáfora común de los diferentes niveles de la ciencia, con los más fundamentales en la base y los menos en la cima. La química no nuclear ocupa un nivel «por encima» de la QED. En casos muy simples se puede emplear una aproximación de la QED para realizar predicciones directas en el nivel químico, pero en la mayoría de casos las leyes se formulan en el nivel superior (químico) para explicar y predecir fenómenos en ese mismo nivel, y más tarde se intenta derivar esas leyes, en la medida de lo posible, del nivel inferior (la QED). La ciencia se

desarrolla en ambos niveles, a la vez que se intenta construir escaleras (o puentes) entre ambos.

No es necesario restringir la discusión a los fenómenos no nucleares. Desde su desarrollo en los años treinta la QED ha sido ampliamente generalizada, y ha dado lugar a toda una nueva disciplina, la física de las partículas elementales. La teoría de las partículas elementales, en la que he trabajado casi toda mi vida, se ocupa de la descripción de todas las partículas elementales (las piezas básicas con que está construida la materia) y de todas las fuerzas de la naturaleza, no únicamente de los electrones y el electromagnetismo. La teoría de las partículas elementales describe el comportamiento de los electrones y lo que ocurre en el interior del núcleo atómico. Por lo tanto, la relación entre la QED y la parte de la química que se ocupa de los electrones puede considerarse como un caso especial de la relación entre la física de las partículas elementales (en conjunto) en el nivel más fundamental, y la química (también en conjunto, incluyendo la química nuclear) en el nivel menos fundamental.

La explicación del nivel superior en términos del inferior se suele denominar «reducción». No sé de ningún científico serio que crea en la existencia de fuerzas químicas especiales que no puedan explicarse a partir de las interacciones físicas subyacentes. Aunque a algunos químicos no les guste verlo así, lo cierto es que la química podría derivarse, en principio, de la física de las partículas elementales. En este sentido todos somos reduccionistas, al menos en lo referente a la química y la física. Pero, dado que al aplicarse únicamente bajo ciertas condiciones particulares que permiten la existencia de fenómenos químicos, la química es más restringida que la física de las partículas elementales, es necesario introducir en las ecuaciones de la física de partículas la información concerniente a esas condiciones para poder derivar, al menos en teoría, las leyes de la química. Sin estas consideraciones, la noción de reducción resulta incompleta.

De todo esto se desprende una lección útil, y es que, aunque las diferentes ciencias residen efectivamente en diferentes niveles, forman parte de una única estructura conexas. La unicidad de esta estructura está basada en las relaciones entre las partes. Una ciencia perteneciente a un nivel determinado abarca las leyes de otra ciencia menos fundamental, situada en un nivel superior. Pero esta última, al ser especial, precisa de información adicional además de las leyes del nivel inferior. En cada nivel hay leyes por descubrir, importantes por sí mismas. El desarrollo de la ciencia implica investigar esas leyes a

todos los niveles, a la vez que se trabaja, de arriba abajo, en la construcción de escaleras entre ellos.

Estas consideraciones se aplican también dentro de la física. Las leyes de la física de partículas son válidas para toda la materia, en todo el cosmos, bajo cualesquiera condiciones. No obstante, en los primeros instantes de la expansión del universo la física nuclear no era de hecho aplicable, pues la densidad era demasiado elevada para permitir la existencia de núcleos aislados, o incluso de neutrones o protones. Aun así, la física nuclear es crucial para comprender qué sucede en el centro del sol, donde reacciones termonucleares (similares a las que tienen lugar dentro de una bomba de hidrógeno) liberan la energía que emite el astro, aunque las condiciones allí sean demasiado extremas como para que exista la química.

La física de la materia condensada, que se ocupa de sistemas tales como vidrios, cristales y líquidos, o superconductores y semiconductores, es una disciplina muy restringida, aplicable únicamente bajo condiciones que permitan la existencia de las estructuras objeto de su estudio (como, por ejemplo, temperaturas suficientemente bajas). Para poder derivarla, teóricamente, a partir de la física de partículas, es necesario también especificar las condiciones en que se aplica.

### *La información necesaria para la reducción de la biología*

¿Qué se puede decir de la relación entre la física y la química y otro nivel jerárquico, el de la biología? ¿Existen todavía, como era común en épocas pasadas, biólogos serios que crean en la existencia de «fuerzas vitales» que no tengan un origen fisicoquímico? Deben ser muy pocos, si es que queda alguno. Todos estamos virtualmente convencidos de que la vida se fundamenta en las leyes de la física y la química, tal como las leyes de la química surgen de las de la física, y en este sentido todos somos de alguna manera reduccionistas. Sin embargo, como ocurre con la química, sigue siendo muy provechoso estudiar la biología en sus propios términos y en su propio nivel, mientras prosigue la construcción de la escalera.

Por otra parte, la biología terrestre es una ciencia extremadamente particular, pues se ocupa de las formas de vida de este planeta, que pueden resultar muy diferentes de los otros sistemas complejos adaptativos que seguramente existen en planetas girando en torno a estre-

llas distantes. En algunos de estos planetas tal vez no describiríamos como seres vivos a los sistemas complejos adaptativos que allí encontrásemos (para tomar prestado un ejemplo trivial de la ciencia ficción, imaginemos una sociedad compuesta de robots y ordenadores muy avanzados, descendientes de otros contruidos largo tiempo atrás por una raza extinguida de seres que sí habríamos descrito como «vivos»). Incluso si nos limitamos a los seres propiamente vivos, muchos de ellos presumiblemente exhibirían propiedades muy distintas de los de la Tierra. Es necesario aportar una enorme cantidad de información específica adicional, por encima de las leyes de la física y la química, para caracterizar los fenómenos biológicos terrestres.

Para empezar, es probable que muchos de los rasgos comunes que caracterizan cualquier forma de vida en la Tierra sean el resultado de accidentes ocurridos al principio de la historia de la vida sobre el planeta, accidentes que pudieron haber tenido un resultado diferente (formas de vida para las cuales estos accidentes tuvieron un resultado distinto quizá existieron sobre la Tierra hace mucho tiempo). Incluso la regla de que los genes deben estar compuestos por cuatro nucleótidos, denominados abreviadamente A, C, G y T, que parece regir para toda la vida actual en nuestro planeta, podría no ser universal a escala cósmica. Puede haber muchas otras reglas posibles válidas en otros planetas, y seres que obedeciesen estas otras reglas podrían haber poblado la Tierra hace miles de millones de años, hasta que perdieron la batalla contra la vida basada en los nucleótidos ahora familiares y desaparecieron.

### *Bioquímica: Complejidad efectiva frente a profundidad*

No sólo el conjunto particular de nucleótidos que caracteriza el ADN de la vida terrestre puede resultar o no único; la misma cuestión se plantea respecto de todas las propiedades generales que caracterizan la química de la vida en la Tierra. Algunos teóricos proclaman que la bioquímica debe tomar formas diferentes en los distintos planetas dispersos por el universo. El caso de la Tierra sería sólo el resultado de una larga sucesión de sucesos azarosos, cada uno de los cuales habría contribuido a las notables peculiaridades de la bioquímica terrestre, proporcionándole así una gran cantidad de complejidad efectiva.

En el otro extremo están quienes creen que la bioquímica es

esencialmente única, y que las leyes de la química, basadas en las leyes más fundamentales de la física, dejan muy pocas posibilidades para otra química de la vida diferente de la observada en la Tierra. Los defensores de este punto de vista afirman que el paso de las leyes fundamentales a las de la bioquímica no implica de hecho ninguna información adicional, y que contribuye muy poco al aumento de la complejidad efectiva. No obstante, un ordenador tendría que hacer una enorme cantidad de cálculos para deducir, a partir de las leyes fundamentales de la física, la cuasiunicidad de la bioquímica como proposición teórica. En cualquier caso, la bioquímica seguiría poseyendo una gran profundidad, aunque no tuviese una gran complejidad. Otra forma de presentar la cuestión sobre la cuasiunicidad de la bioquímica terrestre consiste en preguntarse si la biología depende principalmente de plantear las cuestiones físicas correctas, o si también la historia tiene un papel importante.

### *La vida: Alta complejidad efectiva entre el orden y el desorden*

Aunque la química propia de la vida terrestre dependa en poca medida de la historia, todavía queda una enorme cantidad de complejidad efectiva dentro de la biología, mucha más que en la química o la física de la materia condensada. Consideremos el inmenso número de cambios evolutivos aleatorios acaecidos durante los cuatro mil millones de años transcurridos desde el origen de la vida en la Tierra. Algunos de estos accidentes (probablemente un pequeño porcentaje, pero aun así muchos) han desempeñado papeles capitales en la subsiguiente historia de la vida en este planeta y en las características de las diferentes formas de vida que pueblan la biosfera. Las leyes de la biología dependen de las leyes de la física y la química, pero también de una ingente cantidad de información adicional acerca del resultado de aquellos accidentes. En este caso —y con mucha más razón que para la física nuclear, la física de la materia condensada o la química— puede observarse la gran diferencia entre la clase de reducción que es posible en principio en biología y la idea trivial que la palabra «reducción» despertaría en la mente de un lector ingenuo. La ciencia de la biología es mucho más compleja que las leyes fundamentales de la física porque gran parte de las regularidades que se observan en la biología terrestre proceden tanto de sucesos casuales como de dichas leyes.

El estudio de los sistemas complejos adaptativos de cualquier clase y sobre cualquier planeta no deja de ser bastante singular. El medio ambiente debe presentar una regularidad suficiente, que el sistema explotará para aprender o adaptarse, pero, al mismo tiempo, esa regularidad no debe ser tanta como para que no suceda nada en absoluto. Si el ambiente en cuestión es, por ejemplo, el centro del sol, a una temperatura de decenas de millones de grados, reina en él un estado de total aleatoriedad, con un contenido de información algorítmica casi máximo, y no hay lugar para la complejidad efectiva o para la profundidad —no puede existir nada parecido a la vida—. Tampoco puede darse la vida si el medio ambiente es un cristal perfecto a una temperatura de cero absoluto, con un contenido de información algorítmica prácticamente nulo y escasas posibilidades para la complejidad efectiva o la profundidad. Para que un sistema complejo adaptativo pueda funcionar se requieren condiciones intermedias entre el orden y el desorden.

La superficie del planeta Tierra proporciona un medio ambiente con un contenido de información algorítmica intermedio, en el que puede haber complejidad efectiva y profundidad; esta es una de las razones por las que la vida ha podido evolucionar aquí. Naturalmente, en un principio, bajo las condiciones que imperaban en la Tierra hace miles de millones de años, sólo se desarrollaron formas de vida muy primitivas. Pero, posteriormente, estos mismos seres vivos alteraron la biosfera, en particular al enriquecer en oxígeno la atmósfera, produciendo condiciones similares a las actuales y permitiendo la evolución de formas de vida superiores, con una organización más compleja. Las condiciones intermedias entre el orden y el desorden absolutos caracterizan el medio ambiente en que puede darse la vida, y también la propia vida, con su alta complejidad efectiva y gran profundidad.

### *Psicología y neurobiología: La mente y el cerebro*

Los sistemas complejos adaptativos en la Tierra han dado origen a varios niveles de ciencia situados «por encima» de la biología. Uno de los más importantes es el estudio de la psicología animal, especialmente la del animal de más compleja psicología, el ser humano. De nuevo, puede que haya algún raro científico contemporáneo que crea en la existencia de «fuerzas mentales» de origen no biológico y,

en última instancia, no físico-químico, pero virtualmente todos somos, en este sentido, reduccionistas. Aún así, a veces, en conexión con disciplinas como la psicología (y también la biología), la palabra «reduccionista» tiene un carácter peyorativo, incluso entre científicos. (Por ejemplo, el Instituto Tecnológico de California, en el que he enseñado durante casi cuarenta años, es a menudo tachado de «reduccionista»: de hecho, yo mismo he empleado el término para condenar lo que considero serias deficiencias de nuestro Instituto.) Ahora bien, ¿sobre qué se discute en realidad?

La cuestión es que el estudio de la psicología —aunque resulte sin duda derivable de la neurofisiología, la endocrinología de los neurotransmisores, etc.— es valioso en su propio nivel. Muchos, yo entre ellos, creen que cuando se hayan construido las escaleras entre la psicología y la biología, la mejor estrategia será trabajar tanto desde arriba como desde abajo. Es esta proposición la que no goza de aceptación universal, por ejemplo en Caltech, donde virtualmente no hay investigación sobre psicología humana.

Allí donde se trabaja en biología y psicología, así como en la construcción de las escaleras entre ambas disciplinas, el énfasis en el lado biológico recae sobre el cerebro (junto con el resto del sistema nervioso, el sistema endocrino, etc.), mientras que en el lado psicológico recae sobre la mente —es decir, el conjunto de manifestaciones fenomenológicas del funcionamiento del cerebro y otros órganos relacionados—. Cada tramo de escalera es un puente entre el cerebro y la mente.

En Caltech, gran parte de la investigación en esta área está dedicada al cerebro. La mente está descuidada y, en algunos círculos, la propia palabra «mente» resulta sospechosa (un amigo mío la llama la palabra M). No obstante, no hace mucho se llevaron a cabo en Caltech importantes investigaciones psicológicas, en especial los trabajos del psicobiólogo Roger Sperry y sus colaboradores sobre las correlaciones mentales entre los hemisferios izquierdo y derecho del cerebro humano. Estudiaron pacientes cuyo cuerpo calloso —una parte del cerebro que conecta ambos hemisferios— había sido seccionado a consecuencia de un accidente o de un tratamiento quirúrgico contra la epilepsia. Se sabía que el habla y el control del lado derecho del cuerpo están asociados al hemisferio izquierdo, mientras que el lado izquierdo del cuerpo se halla asociado al hemisferio derecho. En sus investigaciones hallaron que un paciente con el cuerpo calloso seccionado era incapaz de expresar verbalmente información adqui-

rida por el lado izquierdo de su cuerpo, a la vez que mostraba evidencias indirectas de poseer tal información.

Al disminuir con la edad la actividad de Sperry, las investigaciones que inició las prosiguieron en otros centros sus antiguos colaboradores y otros muchos científicos nuevos en este campo. Se hallaron nuevas evidencias de que el hemisferio izquierdo está relacionado con el habla, así como con la lógica y el análisis, mientras que el hemisferio derecho está asociado con la comunicación no verbal, los aspectos afectivos del lenguaje y las funciones integrativas, como el reconocimiento de caras. Algunos científicos han llegado a relacionar el hemisferio derecho con la intuición y la percepción de cuadros generales. Desafortunadamente, la divulgación popular ha exagerado y distorsionado muchos de los resultados obtenidos, y en la polémica desatada se ha ignorado en gran medida la advertencia de Sperry de que «los dos hemisferios de un cerebro normal intacto tienden regularmente a funcionar en coordinación, como una unidad...». No obstante, los descubrimientos realizados son realmente notables. A mí me intriga particularmente saber hasta qué punto es cierta la afirmación de que los aficionados perciben usualmente la música con su hemisferio derecho, mientras que los músicos profesionales lo hacen principalmente con su hemisferio izquierdo.

*Concentración en el mecanismo o en la explicación: «Reduccionismo»*

¿Por qué en la actualidad se realiza tan poca investigación psicológica en Caltech? Por supuesto, es un centro pequeño y en él no se puede hacer de todo. Pero, ¿por qué tan poca biología evolutiva? (A veces digo, bromeando, que si fuéramos una institución creacionista, apenas tendríamos menos.) ¿Por qué tan poca ecología, lingüística o arqueología? Uno llega a sospechar que todas ellas tienen algo en común que desconcierta a nuestro claustro.

Los programas de investigación científica en Caltech tienden a favorecer el estudio de mecanismos, procesos subyacentes y explicaciones. Naturalmente simpatizo con estos fines, porque son los propios de la física de partículas elementales. De hecho, el énfasis en los mecanismos subyacentes ha conducido a impresionantes logros en multitud de campos. En los años veinte, T.H. Morgan fue invitado a fundar la división de biología mientras se hallaba secuenciando los

genes de la mosca de la fruta, sentando así las bases de la genética moderna. Max Delbrück, que ingresó en los años cuarenta, se convirtió en uno de los fundadores de la biología molecular.

Pero si una disciplina se considera demasiado descriptiva y fenomenológica, no situada todavía en el nivel en que sus mecanismos pueden estudiarse, nuestro claustro la considera insuficientemente «científica». Si Caltech hubiese existido en la época de Darwin, con estas mismas inclinaciones, ¿le hubiesen invitado a él a unirse al claustro? Después de todo, Darwin formuló su teoría de la evolución sin muchas pistas sobre sus procesos fundamentales. Sus escritos indican que, si le hubieran presionado para explicar los mecanismos de variación, probablemente hubiese optado por una explicación de tipo lamarckiano (los lamarckianos pensaban que cortando la cola a ratones durante varias generaciones se obtendría una cepa de ratones rabones, o que los largos cuellos de las jirafas se debían a generaciones de antepasados que se pasaban el día estirándolos para alcanzar ramas de acacia más altas). Sin embargo, su contribución a la biología resultó monumental. En particular, su teoría de la evolución sentó las bases para el principio unificador de que todos los organismos existentes proceden de un único ancestro. Qué contraste con la complejidad de la noción antes imperante de la estabilidad de las especies, que afirmaba que cada una de ellas había sido creada por medios sobrenaturales.

Aunque yo estuviera de acuerdo en que disciplinas como la psicología no son todavía lo suficientemente científicas, mis preferencias se decantarían por abordarlas y disfrutar así del placer de hacerlas más científicas. Además de favorecer, como regla general, la construcción de escaleras interdisciplinarias —partiendo de lo más fundamental hacia lo menos fundamental—, yo me mostraría, en el caso de la psicología y en otros muchos, partidario de una aproximación de arriba abajo, que comenzase con la identificación de las principales regularidades en el nivel menos fundamental y dejase para más tarde el conocimiento de los mecanismos fundamentales subyacentes. Pero la atmósfera del campus de Caltech está impregnada de una fuerte propensión a abordar los problemas desde abajo, lo que ha propiciado la mayor parte de los espectaculares logros responsables de la reputación del centro. Es también esta propensión la que invita a acusarlo de reduccionismo, con sus connotaciones peyorativas.

Las disciplinas como la psicología, la biología evolutiva, la ecología, la lingüística y la arqueología, trabajan con sistemas complejos

adaptativos. Todas ellas son objeto de estudio en el Instituto de Santa Fe, donde se da un gran énfasis a las semejanzas entre estos sistemas y a la importancia de estudiarlos en sus propios niveles, no meramente como consecuencias de otras disciplinas científicas más fundamentales. En este sentido el Instituto de Santa Fe forma parte de una revolución en contra del exceso de reduccionismo.

### *Simplicidad y complejidad entre el quark y el jaguar*

Aunque considero que Caltech está cometiendo un grave error al despreciar la mayoría de las «ciencias de la complejidad», me satisface el soporte que proporciona a la física de partículas y a la cosmología, las ciencias más fundamentales de todas, dedicadas a la búsqueda de las leyes básicas del universo.

Uno de los grandes desafíos de la ciencia contemporánea es el explorar la mezcla de simplicidad y complejidad, regularidad y aleatoriedad, orden y desorden, escaleras arriba desde la física de partículas y la cosmología hasta el reino de los sistemas complejos adaptativos. Tenemos que comprender la manera en que surgieron, a partir de la simplicidad, el orden y la regularidad del universo primigenio, las condiciones intermedias entre orden y desorden que han prevalecido en muchos lugares en épocas posteriores, y que han hecho posible, entre otras cosas, la existencia de sistemas complejos adaptativos como los seres vivos.

A este fin, tenemos que examinar la física fundamental desde la perspectiva de la simplicidad y la complejidad, e interrogarnos sobre el papel desempeñado por la teoría unificada de las partículas elementales, las condiciones iniciales del universo, la indeterminación de la mecánica cuántica y las incertidumbres de la teoría clásica del caos, en la producción de los patrones de regularidad y aleatoriedad universales que han permitido la evolución de los sistemas complejos adaptativos.

## Segunda parte El universo cuántico