

Capítulo 3

La relación de la física con las otras ciencias

Contenido:

Introducción

Química

Biología

Astronomía

Geología

Psicología

¿Cómo se llegó a ello?

Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias, y ha tenido un efecto profundo sobre todo el desarrollo científico. De hecho, la física es el equivalente actual a lo que se solía llamar *filosofía natural*, de la que surgieron la mayoría de nuestras ciencias modernas. Quienes estudian muchos otros campos tienen que estudiar también física debido al papel básico que ésta desempeña en todos los fenómenos. En este capítulo trataremos de explicar cuáles son los problemas fundamentales en las otras ciencias, aunque, por supuesto, es imposible tratar en un espacio tan pequeño las materias complejas, sutiles y bellas que constituyen estos otros campos. La falta de espacio nos impide también discutir las relaciones de la física con la ingeniería, la industria, la sociedad y la guerra, e incluso la relación más notable entre matemáticas y física. (La matemática no es una ciencia desde nuestro punto de vista, en el sentido de que no es una ciencia *natural*. La prueba de su validez no es el experimento.) Dicho sea de paso, debemos dejar claro de entrada que el hecho de que algo no sea una ciencia no quiere decir necesariamente que sea malo. Por ejemplo, el amor no es una ciencia. Por lo tanto, si se dice que algo no es una ciencia, no quiere decir que haya algo erróneo en ello; quiere decir simplemente que no es una ciencia.

Química

La ciencia que quizá está más profundamente afectada por la física es la química. Históricamente, la química empezó siendo casi exclusivamente lo que ahora llamamos química inorgánica, la química de las sustancias que no están asociadas con los seres vivos. Se necesitó mucho trabajo analítico para descubrir la existencia de los diversos elementos y sus relaciones: cómo se forman los diversos compuestos relativamente simples encontrados en las rocas, la tierra, etc. Esta química primitiva fue muy importante para la física. La interacción entre las dos ciencias fue muy intensa porque la teoría de los átomos estaba apoyada en gran medida en experimentos de química. La teoría de la química, o sea, de las propias reacciones, estaba resumida en gran medida en la tabla periódica de Mendeléev, que revelaba muchas relaciones extrañas entre los diversos elementos; y fue la colección de reglas acerca de qué sustancias se combinaban con cuáles, y cómo, lo que constituyó la química inorgánica. Todas estas reglas fueron finalmente explicadas por la mecánica cuántica, de modo que la química teórica es de hecho física. Por otra parte, debe resaltarse que se trata de una explicación *en teoría*. Ya hemos discutido la diferencia entre conocer las reglas del juego de ajedrez y ser capaz de jugarlo. Por eso podemos conocer las reglas y no ser capaces de jugar muy bien. Resulta que es muy difícil predecir exactamente lo que sucederá en una reacción química dada; en cualquier caso, la parte más profunda de la química teórica debe terminar en la mecánica cuántica.

Existe también una rama de la física y la química que fue desarrollada por ambas ciencias a la par, y que es extraordinariamente importante. Se trata de los métodos estadísticos aplicados a situaciones para las que existen leyes mecánicas, lo que con propiedad se denomina *mecánica estadística*. En cualquier situación química están implicados un gran número de átomos, y hemos visto que todos los átomos están agitándose de una forma muy aleatoria y complicada. Si pudiéramos analizar cada colisión y ser capaces de seguir en detalle el movimiento de cada molécula, quizá podríamos calcular lo que iba a suceder, pero los enormes números necesarios para seguir la pista a todas estas moléculas superan tan abrumadoramente la capacidad de cualquier ordenador, y ciertamente la capacidad del cerebro, que se hacía necesario desarrollar un método para tratar con situaciones tan complicadas. La mecánica estadística es entonces la ciencia de los fenómenos del calor, o

termodinámica. La química inorgánica, como ciencia, está ahora reducida esencialmente a lo que se denominan química física y química cuántica; la química física para estudiar las velocidades a las que tienen lugar las reacciones y lo que está sucediendo en detalle (¿cómo chocan las moléculas?, ¿qué fragmentos se desprenden primero?, etc.), y la química cuántica para ayudar a entender lo que sucede en términos de las leyes físicas.

La otra rama de la química es la *química orgánica*, la química de las sustancias que están asociadas con seres vivos. Durante un tiempo se creyó que las sustancias que están asociadas con seres vivos eran tan maravillosas que no podían fabricarse artificialmente a partir de materiales inorgánicos. Esto no es cierto en absoluto: son simplemente las mismas sustancias fabricadas en la química inorgánica, aunque ahora estén implicadas disposiciones más complejas de átomos. La química orgánica tiene obviamente una relación muy estrecha con la biología que le suministra sus sustancias, y con la industria; y además, mucha química física y mucha mecánica cuántica pueden aplicarse a los compuestos orgánicos tanto como a los inorgánicos. Sin embargo, los principales problemas de la química orgánica no radican en estos aspectos, sino más bien en el análisis y la síntesis de las sustancias que se forman en sistemas biológicos, en seres vivos. Esto conduce imperceptiblemente, paso a paso, hacia la bioquímica, y luego a la propia biología, o la biología molecular.

Biología

Así es como llegamos a la ciencia de la *biología*, que es el estudio de los seres vivos. En los primeros días de la biología los biólogos tenían que tratar el problema puramente descriptivo de descubrir *qué* seres vivos había, y así tenían simplemente que contar cosas tales como los pelos de las patas de las moscas. Una vez que todas estas materias hubieran sido desarrolladas con una gran dedicación, los biólogos se adentraron en la *maquinaria* interior de los cuerpos vivientes, primero desde un punto de vista muy general, naturalmente, porque se necesita algún esfuerzo para entrar en los detalles más finos.

Hubo una interesante relación inicial en la que la biología ayudó a la física en el descubrimiento de la *conservación de la energía*, que fue demostrada inicialmente

por Mayer en relación con la cantidad de calor tomada y cedida por una criatura viviente.

Si consideramos más de cerca los procesos de la biología de los animales vivos vemos *muchos* fenómenos físicos: la circulación de la sangre, el bombeo, la presión, etc. Están los nervios: sabemos qué está sucediendo cuando pisamos una piedra puntiaguda, y que de un modo u otro la información viene de la pierna. Es interesante cómo sucede esto. En su estudio de los nervios, los biólogos han llegado a la conclusión de que los nervios son tubos muy finos con una pared compleja y muy delgada; las células bombean iones a través de esta pared, de modo que hay iones positivos en el exterior e iones negativos en el interior, como en un condensador. Esta membrana tiene una propiedad interesante; si se «descarga» en un lugar, es decir, si algunos de los iones son capaces de atravesarla en un lugar, de modo que la tensión eléctrica se reduce en ese punto, la influencia eléctrica se hace sentir en los iones próximos, y afecta a la membrana de tal forma que hace que los iones también la atraviesen en puntos vecinos. Esto, a su vez, afecta a las zonas situadas un poco más lejos, etc.; y así hay una onda de «penetrabilidad» de la membrana que recorre la fibra cuando es «excitada» en un extremo al pisar la piedra puntiaguda. Esta onda es análoga en cierto modo a una larga hilera de fichas de dominó verticales; si se empuja una ficha en un extremo, ésta empuja a la siguiente, etc. Por supuesto, esto transmitirá sólo un mensaje a menos que las fichas de dominó se pongan de pie de nuevo; y de forma análoga, en las células nerviosas existen procesos que bombean de nuevo los iones lentamente para dejar al nervio dispuesto para el próximo impulso. Así es como sabemos lo que estamos haciendo (o al menos dónde estamos). Por supuesto, los efectos eléctricos asociados con este impulso nervioso deben ser registrados con instrumentos eléctricos, y puesto que hay efectos eléctricos, la física de los efectos eléctricos ha tenido obviamente mucha influencia en la comprensión del fenómeno.

El efecto opuesto consiste en que, desde alguna parte del cerebro, se envía un mensaje a lo largo de un nervio. ¿Qué sucede en el extremo del nervio? Allí el nervio se ramifica en cosas pequeñas y finas, conectadas a una estructura próxima a un músculo, denominada placa terminal. Por razones que no se entienden exactamente, cuando el impulso llega al extremo del nervio se desprenden

pequeños paquetes de una sustancia química denominada acetilcolina (cinco o diez moléculas cada vez), y éstos afectan a la fibra muscular y hacen que se contraiga, ¡qué fácil! ¿Qué hace que un músculo se contraiga? Un músculo consiste en un número muy grande de fibras juntas, que contienen dos sustancias diferentes, miosina y actomiosina, pero el mecanismo por el que la reacción química inducida por la acetilcolina puede modificar las dimensiones de la molécula no se conoce aún. Así pues, los procesos fundamentales en el músculo que crean los movimientos mecánicos no son conocidos.

La biología es un campo tan enormemente amplio que hay muchos otros problemas que ni siquiera podemos mencionar: problemas acerca del mecanismo de la visión (qué hace la luz en el ojo), el mecanismo del oído, etc. (La forma en que trabaja el pensamiento la discutiremos más adelante en la psicología.) Ahora bien, estas cosas concernientes a la biología que acabamos de discutir no son, desde un punto de vista biológico, realmente fundamentales, no están en la base de la vida, en el sentido de que incluso si las comprendiéramos seguiríamos sin comprender la propia vida. Para ilustrarlo: los hombres que estudian los nervios piensan que su trabajo es muy importante porque, después de todo, no puede haber animales sin nervios. Pero ustedes *pueden* tener *vida* sin nervios. Las plantas no tienen nervios ni músculos, pero están trabajando, están vivas, en cualquier caso. De modo que para ver los problemas fundamentales de la biología debemos mirar más profundamente; cuando lo hacemos descubrimos que todos los seres vivos tienen muchas características en común. La característica más común es que están hechos de *células*, dentro de cada una de las cuales hay una maquinaria compleja para hacer cosas por medios químicos. En las células de las plantas, por ejemplo, hay maquinaria para captar la luz y generar sacarosa, que es consumida en la oscuridad para mantener viva la planta. Cuando un animal la come, la propia sacarosa genera en éste una serie de reacciones químicas relacionadas muy estrechamente con la fotosíntesis (y su efecto opuesto en la oscuridad) en las plantas.

En las células de los sistemas vivos se producen muchas reacciones químicas elaboradas, en las que un compuesto se transforma en otro y en otro más, y así sucesivamente. Para dar alguna idea de los enormes esfuerzos que están implicados en el estudio de la bioquímica, la gráfica de la figura 3.1 resume nuestro

conocimiento hasta la fecha de sólo una pequeña parte de las muchas series de reacciones que tienen lugar en las células, quizá un 1 por 100 más o menos de ellas.

Aquí vemos una serie completa de moléculas que se transforman unas en otras en una secuencia o ciclo de pasos bastante pequeños. Se denomina el ciclo de Krebs, el ciclo respiratorio. Cada una de las sustancias químicas y cada uno de los pasos es bastante simple, en términos de los cambios que se producen en la molécula, pero y este es un descubrimiento de capital importancia en la bioquímica estos cambios son *relativamente difíciles de llevar a cabo en un laboratorio*. Si tenemos una sustancia y una segunda sustancia muy similar, una no se transforma simplemente en la otra, porque las dos formas están normalmente separadas por una «colina» o barrera energética. Consideremos esta analogía: si quisiéramos llevar un objeto de un lugar a otro, situado al mismo nivel pero al otro lado de una colina, tendríamos que subirlo hasta la cima, pero hacer eso requiere añadir alguna energía. Así pues, la mayoría de las reacciones químicas no ocurren porque existe lo que se denomina una *energía de activación* en el camino. Para añadir un átomo extra a nuestra sustancia química es necesario *acercarlo* lo suficiente para que puedan producirse algunas recombinaciones; entonces se quedará adherido. Pero si no podemos darle bastante energía para acercarlo lo suficiente, no llegará a la culminación, sino que se quedará sin llegar a la cima de la «colina» y volverá a bajar. Sin embargo, si pudiéramos tomar literalmente las moléculas con nuestras manos y empujar y apartar los átomos para abrir un hueco hasta el nuevo átomo, y luego tapar el hueco de nuevo, habríamos encontrado otra vía, *alrededor* de la colina, que no requeriría energía extra y la reacción tendría lugar fácilmente. Ahora bien, *existen* realmente, en las células, moléculas *muy* grandes, mucho mayores que aquellas cuyos cambios hemos estado describiendo, que de un modo complicado mantienen a las moléculas más pequeñas en la forma precisa para que la reacción pueda ocurrir fácilmente. Estas cosas muy grandes y complicadas se denominan *enzimas*. (Inicialmente se denominaron fermentos, porque fueron originalmente descubiertos en la fermentación del azúcar. De hecho, algunas de las primeras reacciones del ciclo se descubrieron allí.) En presencia de una enzima la reacción continuará.



3.1 El ciclo de Krebs.

Una enzima está hecha de otra sustancia denominada *proteína*. Las enzimas son muy grandes y complicadas, y cada una es diferente de la otra, pues cada una de ellas está construida para controlar una determinada reacción. Los nombres de las enzimas están escritos junto a cada reacción en la figura 3.1. (A veces la misma enzima puede controlar dos reacciones.) Hacemos énfasis en que las propias enzimas no están implicadas directamente en la reacción. Ellas no cambian; simplemente llevan un átomo de un lugar a otro. Una vez hecho esto, la enzima está dispuesta para hacerlo con la siguiente molécula, como una máquina en una fábrica. Por supuesto, debe haber un suministro de ciertos átomos y un medio de desprenderse de otros átomos. Tomemos el hidrógeno, por ejemplo: existen enzimas que tienen unidades especiales que transportan el hidrógeno para todas las reacciones químicas. Por ejemplo, existen tres o cuatro enzimas reductoras de hidrógeno que se utilizan en diferentes lugares a lo largo de nuestro ciclo completo.

Es interesante que la maquinaria que libera parte del hidrógeno en un lugar tomará dicho hidrógeno y lo utilizará en algún otro lugar.

El aspecto más importante del ciclo de la figura 3.1 es la transformación de ADP en ATP (difosfato de adenosina en trifosfato de adenosina) debida a que una sustancia tiene una energía mucho mayor que la otra. De la misma forma que hay una «caja» en ciertas enzimas para transportar átomos de hidrógeno, existen «cajas» especiales para transportar *energía* en las que está implicado el grupo trifosfato. Así, el ATP tiene más energía que el ADP y, si el ciclo tiene lugar en una dirección, estamos produciendo moléculas que tienen energía extra y que pueden dar impulso a algún otro ciclo que *requiera* energía, por ejemplo la contracción de un músculo. El músculo no se contraerá a menos que haya ATP. Podemos tomar una fibra muscular, ponerla en agua y añadir ATP, y la fibra se contrae, transformando ATP en ADP si están presentes las enzimas correctas. De este modo, el sistema real consiste en la transformación ADP-ATP; en la oscuridad el ATP que ha sido almacenado durante el día se utiliza para recorrer el ciclo entero en sentido contrario. Ven ustedes que una enzima no se preocupa de la dirección en que marcha la reacción, pues si lo hiciera violaría una de las leyes de la física.

La física es de gran importancia en biología y otras ciencias por una razón adicional, que tiene que ver con las *técnicas experimentales*. De hecho, si no fuera por el gran desarrollo de la física experimental estas tablas bioquímicas no serían conocidas hoy. La razón es que la herramienta más útil de todas para analizar este sistema fantásticamente complejo consiste en *etiquetar* los átomos que se utilizan en las reacciones. Así, si pudiéramos introducir en el ciclo algún dióxido de carbono que tenga una «marca verde» encima, y luego medir dónde está la marca verde al cabo de tres segundos, y medirla otra vez al cabo de diez segundos, etc., podríamos rastrear el curso de las reacciones. ¿Cuáles son las «marcas verdes»? Son diferentes *isótopos*. Recordemos que las propiedades químicas de los átomos están determinadas por el número de *electrones*, no por la masa del núcleo. Pero, por ejemplo, en el carbono puede haber seis neutrones o siete neutrones, además de los seis protones que tienen todos los núcleos de carbono. Químicamente, los dos átomos C^{12} y C^{13} son iguales, pero difieren en peso y tienen propiedades nucleares diferentes, y por ello son distinguibles. Utilizando estos isótopos de pesos

diferentes, o incluso isótopos radiactivos como el C^{14} , que proporcionan un medio más sensible para rastrear cantidades muy pequeñas, es posible seguir el curso de las reacciones.

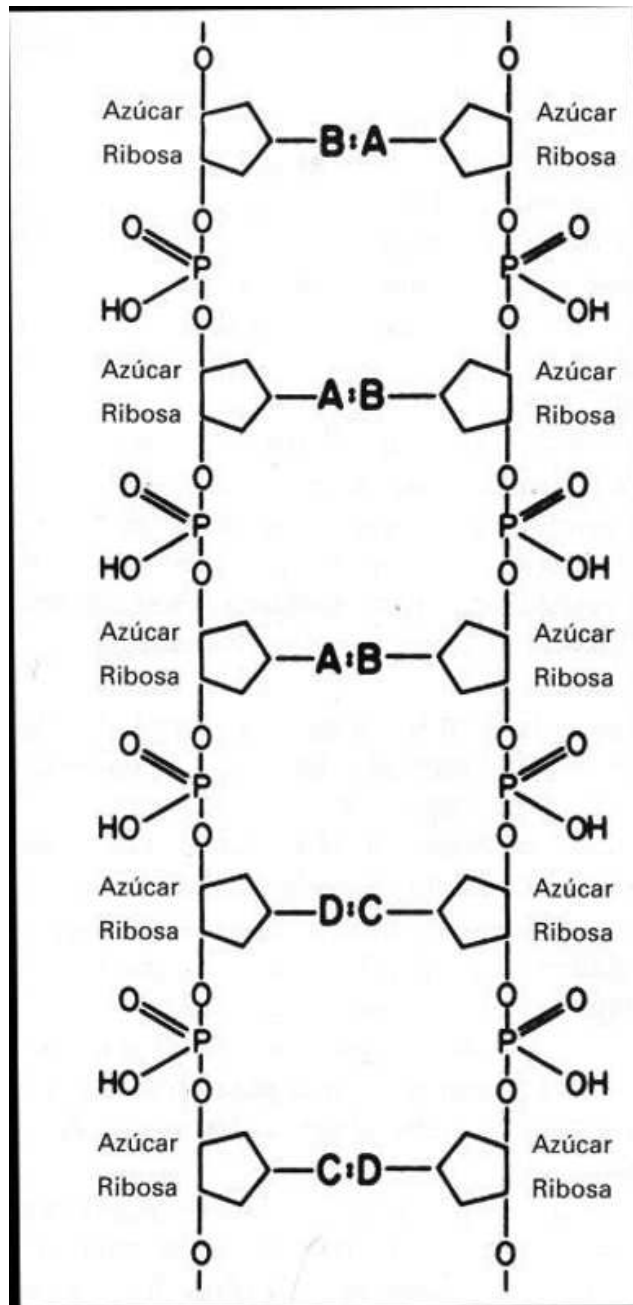
Volvamos ahora a la descripción de las enzimas y las proteínas. No todas las proteínas son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Existen muchas proteínas, tales como las proteínas de los músculos, las proteínas estructurales que están, por ejemplo, en los cartílagos y el pelo, la piel, etc., que no son enzimas propiamente dichas. Sin embargo, las proteínas son unas sustancias muy características de la vida: en primer lugar, constituyen todas las enzimas, y en segundo lugar constituyen buena parte del resto del material viviente. Las proteínas tienen una estructura simple y muy interesante. Cada una de ellas es una serie, o cadena, de *aminoácidos* diferentes. Existen veinte aminoácidos distintos, y todos ellos pueden combinarse entre sí para formar cadenas en las que la columna vertebral es CO-NH, etc. Las proteínas no son otra cosa que cadenas de varios de estos veinte aminoácidos. Cada uno de los aminoácidos sirve probablemente para algún propósito concreto. Algunos, por ejemplo, tienen un átomo de azufre en un determinado lugar; cuando dos átomos de azufre están en la misma proteína forman un enlace, es decir, se unen a la cadena siguiente en dos puntos y forman un lazo. Otras tienen átomos de oxígeno extra que las convierten en sustancias ácidas, otras tienen una característica básica. Algunas de ellas tienen grupos grandes que cuelgan de un extremo, de modo que ocupan mucho espacio. Uno de los aminoácidos, llamado prolina, no es realmente un aminoácido, sino un iminoácido. Hay una ligera diferencia, con el resultado de que, cuando la prolina está en la cadena, hay un codo en la misma. Si quisiéramos fabricar una proteína particular daríamos estas instrucciones: colóquese aquí uno de aquellos ganchos de azufre; a continuación añádase algo para ocupar espacio; únase entonces algo para poner un codo en la cadena. De este modo, obtendríamos una cadena de apariencia complicada, retorcida sobre sí misma y con cierta estructura compleja; esta es presumiblemente la manera en que se han hecho todas las diversas enzimas. Uno de los grandes triunfos de los tiempos recientes (a partir de 1960) fue el descubrimiento final de la disposición atómica espacial exacta de ciertas proteínas, que implican aproximadamente cincuenta y seis o sesenta aminoácidos en una

hilera. Más de mil átomos (más cerca de dos mil, si contamos los átomos de hidrógeno) han sido localizados en una estructura compleja en dos proteínas. La primera fue la hemoglobina. Uno de los aspectos decepcionantes de este descubrimiento es que no podemos ver nada a partir de la estructura; no entendemos por qué funciona tal como lo hace. Por supuesto, este es el siguiente problema que hay que atacar.

Otro problema es: ¿cómo saben las enzimas lo que hay que hacer? Una mosca de ojos rojos hace una mosca bebé de ojos rojos, de modo que la información de la estructura global de las enzimas para hacer pigmento rojo debe ser transmitida de una mosca a la siguiente. Esto se hace mediante una sustancia que hay en el núcleo de la célula, y que no es una proteína, denominada ADN (abreviatura de ácido desoxirribonucleico). Esta es la sustancia clave que se transmite de una célula a otra (por ejemplo, las células del esperma consisten básicamente en ADN) y transporta la información sobre cómo hacer las enzimas. El ADN es el «plano». ¿Qué aspecto tiene el plano y cómo funciona? En primer lugar, el plano debe ser capaz de reproducirse a sí mismo. En segundo lugar, debe ser capaz de instruir a la proteína. Respecto a la reproducción, podríamos pensar que ésta procede como la reproducción celular. Las células sencillamente se hacen más grandes y luego se dividen por la mitad. ¿Sucederá entonces lo mismo con las moléculas de ADN, que se hacen demasiado grandes y se dividen por la mitad? ¡Ciertamente cada átomo no se hace más grande ni se divide por la mitad! No, es imposible reproducir una molécula salvo que sea por algún medio más astuto.

La estructura del ADN fue estudiada durante mucho tiempo, primero químicamente para encontrar la composición, y luego con rayos X para encontrar la estructura espacial. El resultado fue el siguiente descubrimiento notable: la molécula de ADN consiste en un par de cadenas, enroscadas una alrededor de la otra. La columna vertebral de cada una de estas cadenas, que son análogas a las cadenas de las proteínas aunque bastante diferentes químicamente, consiste en una serie de grupos de azúcares y fosfatos, tal como se muestra en la figura 3.2. Ahora vemos cómo puede la cadena contener instrucciones, pues si pudiera dividirse esta cadena por la mitad tendríamos una serie *BAAD C...* y cada ser viviente podría tener una

serie diferente. Es posible así que las *instrucciones* específicas para la fabricación de proteínas estén contenidas de algún modo en las *secuencias* específicas del ADN.



3.2 Diagrama esquemático del ADN

Unidos a cada azúcar en la línea, y enlazando las dos cadenas, hay ciertos pares de eslabones. Sin embargo, no todos ellos son del mismo tipo; existen cuatro tipos, llamados adenina, timina, citosina y guanina, pero los llamaremos *A*, *B*, *C*, y *D*. Lo

interesante es que sólo ciertos pares pueden emparejarse, por ejemplo *A* con *B* y *C* con *D*. Estos pares están colocados en las dos cadenas de tal modo que «encajan», y tienen una fuerte energía de interacción. Sin embargo, *C* no encaja con *A*, y *B* no encaja con *C*; sólo encajan ciertas parejas, *A* frente a *B* y *C* frente a *D*. Así pues, si uno es *C*, el otro debe ser *D*, etc. Cualesquiera que puedan ser las letras en una cadena, cada una de ellas debe tener su letra complementaria específica en la otra cadena.

¿Qué sucede entonces en la reproducción? Supongamos que dividimos esta cadena en dos. ¿Cómo podemos hacer otra exactamente igual? Si en las sustancias de las células hay un departamento de fabricación que aporta fosfato, azúcar, y unidades *A*, *B*, *C*, *D* que no están conectadas en una cadena, las únicas que se unirán a nuestra cadena escindida serán las correctas, las complementarias de *BAAD C...*, a saber, *ABBCD...* Así pues, lo que sucede es que la cadena se divide por la mitad durante la división celular, y una mitad va finalmente a una célula y la otra mitad termina en la otra célula; cuando se han separado, cada media cadena construye una nueva cadena complementaria.

Ahora viene la pregunta, ¿cómo queda determinada exactamente la disposición de los aminoácidos en la proteína por el orden de las unidades *A*, *B*, *C* y *D*? Este es el problema central todavía no resuelto en la biología. No obstante, las primeras claves, o fragmentos de información, son estas: hay en la célula minúsculas partículas llamadas microsomas, y se sabe ahora que es en este lugar donde se fabrican las proteínas. Pero los microsomas no están en el núcleo, que es donde está el ADN y sus instrucciones. Parece que falta algo. Sin embargo, se sabe también que fragmentos de pequeñas moléculas salen del ADN, no tan largos como la gran molécula de ADN que transporta toda la información, sino como una pequeña sección de ella. Esto se denomina ARN, pero esto no es esencial. Es una especie de copia del ADN, una copia abreviada. El ARN, que de algún modo lleva un mensaje acerca de qué tipo de proteína hacer, llega al microsoma; esto es conocido. Cuando está allí, la proteína es sintetizada en el microsoma. Esto también es conocido. Sin embargo, los detalles de cómo entran los aminoácidos y se ordenan de acuerdo con un código que está en el ADN son todavía desconocidos. No

sabemos cómo leerlo. Si conociésemos, por ejemplo, la «secuencia» A, B, C, C, A, no podríamos decirles qué proteína iba a ser fabricada.

Ciertamente ninguna disciplina o campo está haciendo actualmente más progresos en tantos frentes como la biología, y si tuviéramos que nombrar la hipótesis más poderosa de todas, que nos lleva a perseverar en el intento de comprender la vida, tal hipótesis es que *todas las cosas están hechas de átomos*, y que todo lo que hacen los seres vivos puede entenderse en términos de las agitaciones y oscilaciones de los átomos.

Astronomía

En esta rápida explicación del mundo en conjunto, debemos dirigirnos ahora a la astronomía. La astronomía es más vieja que la física. De hecho, la astronomía puso en marcha la física al mostrar la bella simplicidad del movimiento de las estrellas y los planetas, cuya comprensión constituyó el principio de la física. Pero el descubrimiento más notable de toda la astronomía es que las estrellas están hechas de átomos del mismo tipo que los de la Tierra². ¿Cómo se hizo? Los átomos liberan luz que tiene frecuencias definidas, algo parecido al timbre de un instrumento musical que tiene unos tonos o frecuencias de sonido definidos.

Cuando estamos oyendo diferentes tonos podemos separarlos, pero cuando miramos con nuestros ojos una mezcla de colores no podemos decir de qué partes está compuesta porque el ojo no discrimina tan bien como el oído en este aspecto. Sin embargo, con un espectroscopio *podemos* analizar las frecuencias de las ondas luminosas y de este modo podemos ver los propios tonos de los átomos que hay en diferentes estrellas. De hecho, dos de los elementos químicos fueron descubiertos en una estrella antes de que se descubrieran en la Tierra. El helio fue descubierto en el Sol, de ahí su nombre, y el tecnecio fue descubierto en ciertas estrellas frías.

² ¡Estoy yendo muy rápido! ¡Cuánto contenido hay en cada frase de esta breve historia! «Las estrellas están hechas de átomos del mismo tipo que los de la Tierra.» Suelo escoger temas como este para dar alguna conferencia. Los poetas dicen que la ciencia despoja de belleza a las estrellas, meros montones de átomos de gas. Nada es «mero». También yo puedo ver las estrellas en una noche clara, y sentir las. Pero ¿veo menos o veo más? La vastedad de los cielos extiende mi imaginación: atado a este carrusel mi ojo puede captar luz de hace un millón de años. En esta vasta estructura -de la que yo formo parte- tal vez la materia que me constituye fue vomitada desde alguna estrella olvidada, del mismo modo otra está siendo vomitada allí. O vemos las estrellas con el gran ojo de Palomar, alejándose rápidamente de un punto de partida común en el que quizá estaban juntas. ¿Cuál es la estructura, o el significado, o el porqué? Al misterio no le perjudica que se sepa algo sobre él. ¡Pues la verdad es mucho más maravillosa que lo que cualquier artista del pasado pudo imaginar! ¿Por qué los poetas del presente no hablan de ello? ¿Qué clase de hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera un hombre, pero deben guardar silencio si es una inmensa esfera de metano y amoníaco en rotación?

Esto nos permite, por supuesto, entrar en la comprensión de las estrellas, ya que están hechas de los mismos tipos de átomos que hay en la Tierra. Ahora sabemos muchas cosas sobre los átomos, especialmente respecto a su comportamiento en condiciones de alta temperatura pero no muy alta densidad, de modo que podemos analizar el comportamiento de la sustancia estelar mediante la mecánica estadística. Aunque no podemos reproducir estas condiciones en la Tierra, sí podemos decir a menudo, utilizando las leyes físicas básicas, lo que va a suceder exactamente, o con mucha aproximación. Así es como la física ayuda a la astronomía. Por extraño que pueda parecer, entendemos la distribución de materia en el interior del Sol mucho mejor de lo que entendemos el interior de la Tierra. Lo que sucede *dentro de* una estrella se entiende mejor de lo que cabría imaginar ante la dificultad de tener que mirar un pequeño punto luminoso a través de un telescopio, y ello se debe a que podemos *calcular* lo que harían los átomos en las estrellas en la mayoría de las circunstancias.

Uno de los descubrimientos más impresionantes fue el origen de la energía de las estrellas, que hace que sigan quemándose. Uno de los hombres que lo descubrió estaba con su novia la noche siguiente al momento en que comprendió que en las estrellas deben tener lugar *reacciones nucleares* para hacer que brillen. Ella dijo: «¡Mira qué bellas brillan las estrellas!». Él dijo: «Sí, y en este momento yo soy el único hombre en el mundo que sabe *por qué* brillan». Ella simplemente le sonrió. No estaba impresionada por estar con el único hombre que, en ese instante, sabía por qué brillan las estrellas. Bien, es triste estar solo, pero así son las cosas en este mundo.

Es la «combustión» nuclear del hidrógeno la que proporciona la energía del Sol; el hidrógeno se transforma en helio. Más aún, la fabricación de los diversos elementos químicos tiene lugar, en definitiva, en los centros de las estrellas a partir del hidrógeno. La materia de la que *nosotros* estamos hechos fue «cocinada» alguna vez en una estrella y luego escupida. ¿Cómo lo sabemos? Porque hay una clave. La proporción de los diferentes isótopos cuánto C^{12} , cuánto C^{13} , etc. es algo que permanece invariable en las reacciones *químicas*, porque las reacciones químicas son exactamente las mismas para los dos. Las proporciones son simplemente el resultado de reacciones *nucleares*. Mirando las proporciones de los isótopos en el

rescoldo frío y muerto que somos nosotros, podemos descubrir cómo era el *horno* en el que se formó la materia de la que estamos hechos. Este horno era como las estrellas, y por ello es muy probable que nuestros elementos fueran «hechos» en las estrellas y escupidos en las explosiones que llamamos novas y supernovas. La astronomía está tan cerca de la física que estudiaremos muchas cosas relativas a la astronomía a medida que sigamos adelante.

Geología

Dirijámonos ahora a lo que se denominan *ciencias de la Tierra*, o geología. En primer lugar, la meteorología y la predicción del tiempo. Por supuesto, los *instrumentos* de la meteorología son instrumentos físicos, y el desarrollo de la física experimental hizo posibles estos instrumentos, como se explicó antes. Sin embargo, la teoría de la meteorología nunca ha sido desarrollada de forma satisfactoria por los físicos. «Bien dirán ustedes-, no hay nada más que aire, y conocemos las ecuaciones de los movimientos del aire.» Sí, las conocemos. «Entonces, si conocemos la situación del aire hoy, ¿por qué no podemos calcular la situación del aire mañana?» En primer lugar, no sabemos *realmente* cuál es la situación hoy, porque el aire está moviéndose y girando en todas partes. Resulta ser muy sensible, e incluso inestable. Si ustedes han visto alguna vez el agua que circula suavemente en una presa, y luego se convierte en un gran número de pegotes y gotas cuando cae, ustedes entenderán lo que quiero decir por inestable. Ustedes conocen la situación del agua antes de que llegue al aliviadero: es perfectamente uniforme. Pero en el momento que comienza a caer, ¿dónde empiezan a formarse las gotas? ¿Qué es lo que determina el tamaño de las gotas y dónde estarán? Esto no se conoce, porque el agua es inestable. Incluso una masa de aire en movimiento suave se transforma en vórtices y remolinos complejos cuando rebasa una montaña. En muchos campos encontramos esta situación de *flujo turbulento* que no podemos analizar hoy. ¡Dejemos rápidamente el tema de la predicción del tiempo y discutamos la geología!

La pregunta básica de la geología es: ¿qué hace que la Tierra sea como es? Los procesos más obvios están delante de sus propios ojos: los procesos de erosión de los ríos, los vientos, etc. Son bastante fáciles de entender, pero por cada cantidad

de erosión hay una cantidad equivalente de algún otro proceso. Las montañas no son hoy más bajas, en promedio, de lo que eran en el pasado. Debe haber procesos de formación-de-montañas. Ustedes descubrirán, si estudian geología, que hay procesos de formación de montañas y vulcanismo, que nadie entiende pero que es la mitad de la geología. El fenómeno de los volcanes no es realmente entendido. No hay una comprensión definitiva de lo que da lugar a un terremoto. Se entiende que si algo empuja a alguna otra cosa, la aparta y la arrastra, esto es correcto. Pero ¿qué es lo que empuja y por qué? La teoría es que hay corrientes dentro de la Tierra corrientes circulatorias, debidas a la diferencia de temperaturas en el interior y el exterior que, en su movimiento, arrastran lentamente a la superficie. Entonces, si hay dos circulaciones opuestas próximas, la materia se acumulará en la región donde ambas se encuentran y se formarán cinturones de montañas que están en condiciones de mucha tensión, y producen así volcanes y terremotos.

¿Qué pasa en el interior de la Tierra? Se conoce mucho sobre la velocidad de las ondas de un terremoto a través de la Tierra y sobre la distribución de la densidad en la Tierra. Sin embargo, los físicos han sido incapaces de obtener una buena teoría acerca de la densidad que debería tener una sustancia a las presiones que cabría esperar en el centro de la Tierra. En otras palabras, no podemos calcular muy bien las propiedades de la materia en estas circunstancias. Sabemos mucho menos de la Tierra de lo que sabemos sobre las condiciones de la materia en las estrellas. Las matemáticas implicadas parecen demasiado difíciles, por ahora. Pero quizá no pase mucho tiempo antes de que alguien se dé cuenta de que es un problema importante, y realmente lo resuelva. El otro aspecto, por supuesto, es que incluso si conociéramos la densidad, no podríamos concebir las corrientes circulatorias. Ni podemos calcular realmente las propiedades de rocas a alta presión. No podemos decir con qué rapidez «cederían» las rocas; todo esto debe ser estudiado a partir de experimentos.

Psicología

A continuación, vamos a considerar la ciencia de la *psicología*. Dicho sea de paso, el psicoanálisis no es una ciencia: como mucho es un procedimiento médico, y quizá algo más parecido a la brujería. Tiene una teoría sobre las causas de la

enfermedad: montones de «espíritus» diferentes, etc. El hechicero tiene la teoría de que una enfermedad como el paludismo es causada por un espíritu que está en aire; no se cura agitando una serpiente, pero la quinina sirve para el paludismo. Por esto, si ustedes se ponen enfermos yo les aconsejaría que vayan al hechicero porque él es la persona de la tribu que sabe más sobre la enfermedad; por otra parte, su conocimiento no es ciencia. El psicoanálisis no ha sido puesto a prueba cuidadosamente por experimentos, y no hay forma de encontrar una lista del número de casos en el que funciona, el número de casos en los que no funciona, etc.

Las otras ramas de la psicología, que incluyen cosas como la psicología de la sensación qué sucede en el ojo, y qué sucede en el cerebro son, si ustedes quieren, menos interesantes. Pero se han hecho algunos progresos pequeños aunque reales en su estudio. Uno de los problemas técnicos más interesantes puede o no puede ser llamado psicología. El problema central de la mente, si ustedes quieren, o del sistema nervioso, es este: cuando un animal aprende algo, puede hacer algo diferente de lo que podía hacer antes y, si está hecho de átomos, sus células cerebrales deben haber cambiado también. *¿De qué manera es diferente?* No sabemos dónde mirar, o qué buscar, cuando algo es memorizado. No sabemos lo que significa, o qué cambio hay en el sistema nervioso, cuando se aprende algo. Este es un problema muy importante que no ha sido resuelto en absoluto. Suponiendo, sin embargo, que existe algún tipo de memoria, el cerebro es una masa tan enorme de cables interconectados y nervios que probablemente no pueda ser analizado de una forma directa. Hay una analogía con los ordenadores y elementos de computación, en cuanto que también tienen un montón de líneas, y tienen algún tipo de elemento análogo quizá a la sinapsis o conexión de un nervio con otro. Este es un tema muy interesante que no tenemos tiempo de discutir más: la relación entre pensamiento y máquinas computadoras. Debe entenderse, por supuesto, que este tema nos dirá muy poco sobre las complejidades reales del comportamiento humano ordinario. Los seres humanos son muy diferentes. Necesitaríamos mucho tiempo antes de llegar a ello. Debemos empezar mucho más atrás. Si pudiéramos siquiera concebir cómo funciona un *perro*, habríamos llegado

muy lejos. Los perros son más fáciles de entender, pero nadie sabe todavía cómo funciona un perro.

¿Cómo se llegó a ello?

Para que la física sea útil a otras ciencias de un modo *teórico*, además de por la invención de instrumentos, la ciencia en cuestión debe suministrar al físico una descripción del objeto en el lenguaje del físico. Se puede preguntar «¿porqué salta una rana?», y el físico no puede responder. Si le dicen lo que es una rana, que tiene tantas moléculas, hay un nervio aquí, etc., eso es diferente. Si nos dicen, más o menos, cómo es la Tierra o las estrellas, entonces podemos trabajar. Para que una teoría física sea útil debemos saber dónde están situados los átomos. Para entender la química debemos saber exactamente qué átomos están presentes, pues de otra forma no podemos analizarla. Esto no es más que una limitación, por supuesto.

Hay otro tipo de problemas en las ciencias hermanas que no se dan en la física; podríamos llamarlo, a falta de un término mejor, la cuestión histórica. ¿Cómo llegó a ser así? Si entendemos todo sobre la biología, queremos saber cómo llegaron a ser todas las cosas que hay en la Tierra. Existe la teoría de la evolución, una parte importante de la biología. En geología no sólo queremos saber cómo se forman las montañas, sino cómo se formó toda la Tierra en el principio, el origen del Sistema Solar, etc. Eso, por supuesto, nos lleva a querer saber qué tipo de materia había en el mundo. ¿Cómo evolucionaron las estrellas? ¿Cuáles eran las condiciones iniciales? Este es el problema de la historia astronómica. Se ha descubierto mucho acerca de la formación de las estrellas, la formación de los elementos de los que estamos hechos, e incluso algo sobre el origen del universo.

No hay cuestión histórica por estudiar en la física en el momento actual. No nos planteamos una pregunta: «Aquí están las leyes de la física, ¿cómo llegaron a ser así?». No imaginamos, por el momento, que las leyes de la física estén cambiando de algún modo con el tiempo, que fueran diferentes en el pasado de lo que son ahora. Por supuesto, *podrían* serlo, y en el momento en que descubramos que lo son, la cuestión histórica de la física será tratada con el resto de la historia del universo, y entonces el físico estará hablando de los mismos problemas que los astrónomos, los geólogos y los biólogos.

Finalmente, existe un problema físico que es común a muchos campos, que es muy viejo y que no ha sido resuelto. No es el problema de encontrar nuevas partículas fundamentales, sino algo que se viene arrastrando desde hace mucho tiempo, durante un centenar de años. Nadie en la física ha sido realmente capaz de analizarlo de forma matemáticamente satisfactoria a pesar de su importancia para las ciencias hermanas. Es el análisis de los fluidos *circulantes o turbulentos*. Si observamos la evolución de una estrella llega un momento en el que podemos deducir que va a empezar la convección, y a partir de entonces ya no podemos deducir qué sucederá. Unos millones de años más tarde la estrella explota, pero no podemos concebir la razón. No podemos analizar el tiempo meteorológico. No sabemos la pauta de los movimientos que debería haber dentro de la Tierra. La forma más simple del problema consiste en tomar un tubo muy largo y hacer pasar a través de él agua a gran velocidad. Preguntamos: ¿cuánta presión se necesita para impulsar una cantidad dada de agua a través de dicho tubo? Nadie puede analizarlo a partir de primeros principios y las propiedades del agua. Si el agua fluye muy lentamente, o si utilizamos algo muy viscoso como la miel, entonces lo podemos hacer bastante bien. Ustedes encontrarán eso en sus libros de texto. Lo que realmente no podemos hacer es tratar el agua real y húmeda que fluye a través de un tubo. Este es el problema central que deberíamos resolver un día, y que no hemos hecho.

Un poeta dijo en cierta ocasión: «Todo el universo está en un vaso de vino». Probablemente nunca sabremos en qué sentido lo decía, pues los poetas no escriben para ser entendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino suficientemente cerca, vemos el universo entero. Están los objetos de la física: el líquido que se mueve y que se evapora dependiendo del viento y del clima, los reflejos en el vaso, y nuestra imaginación añade los átomos. El vaso es una destilación de las rocas de la Tierra, y en su composición vemos los secretos de la edad del universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraña ordenación de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo llegaron a formarse? Existen los fermentos, las enzimas, los substratos y los productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda la vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como hizo Louis Pasteur, la causa de muchas

enfermedades. ¡Qué vivo es el color, que impone su existencia en la consciencia de quien lo observa! Aunque, por conveniencia, nuestras pequeñas mentes dividan este vaso de vino, este universo, en partes física, biología, geología, astronomía, psicología y demás-, es bueno recordar que la naturaleza no lo sabe! Así que volvamos a situarlo todo en su sitio, sin olvidar en última instancia para qué sirve. Permitámonos un placer final: ¡bebámoslo y olvidémoslo todo!