

La relación de la física con otras ciencias

- 3-1 Introducción
- 3-2 Química
- 3-3 Biología
- 3-4 Astronomía
- 3-5 Geología
- 3-6 Psicología
- 3-7 ¿Cómo se llegó a eso?

3-1 Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias, y ha tenido un profundo efecto en todo el desarrollo científico. En realidad, la física es el equivalente actual de lo que se acostumbra a llamar *filosofía natural*, de la cual provienen la mayoría de nuestras ciencias modernas. Estudiantes de muchas disciplinas se encuentran estudiando física a causa del papel básico que esta juega en todos los fenómenos. En este capítulo trataremos de explicar cuáles son los problemas fundamentales en las otras ciencias, pero, por supuesto, es imposible realmente tratar en un espacio tan reducido las materias complejas, sutiles y hermosas de esos otros campos. La falta de espacio también impide que discutamos la relación entre la física y la ingeniería, la industria, la sociedad y la guerra, o aún la más notable relación entre la matemática y la física. (La matemática no es una ciencia desde nuestro punto de vista, en el sentido que no es una ciencia *natural*. El experimento no es una prueba de su validez.) Debemos, incidentalmente, dejar en claro desde un comienzo que si una cosa no es una ciencia, no es necesariamente mala. Por ejemplo, el amor no es una ciencia. De manera que, si se dice que algo no es ciencia, no significa que hay a algo malo en esto; significa simplemente que no es una ciencia.

3-2 Química

La ciencia quizás más profundamente afectada por la física es la química. Históricamente, en su comienzo, la química trataba casi enteramente de lo que ahora llamamos química inorgánica, la química de las sustancias que no están asociadas con los objetos vivientes. Se necesitó de un análisis considerable para descubrir la existencia de muchos elementos y sus relaciones --cómo forman los numerosos compuestos relativamente simples que se encuentran en las rocas, la tierra, etc.-. Esta química primitiva fue muy importante para la física. La interacción entre las dos ciencias era muy grande porque la teoría de los átomos fue comprobada en gran parte con experimentos de química. La teoría de la química, es decir, de las reacciones mismas, fue resumida ampliamente en la tabla periódica de Mendeleev, la cual establece numerosas relaciones extrañas entre los diversos elementos, y fue la colección de reglas sobre qué sustancia se combina con cuál otra y cómo, lo que constituyó la química inorgánica. Todas estas reglas se explicaron por fin, en principio, por la mecánica cuántica, y por tanto, la química teórica es en realidad física. Por otro

lado, debe hacerse énfasis en que esta explicación es *en principio*. Ya hemos discutido la diferencia entre saber las reglas del juego de ajedrez y ser capaz de jugar. De manera que podemos conocer las reglas, pero no podemos jugar muy bien. Resulta así muy difícil predecir precisamente qué sucederá en una reacción química dada; sin embargo, la parte más profunda de la química teórica debe terminar en la mecánica cuántica.

Hay también una rama de la física y la química que ambas ciencias desarrollaron conjuntamente y que es en extremo importante. Este es el método estadístico aplicado a una situación en que hay leyes mecánicas, que se llama propiamente, *mecánica estadística*. Cualquier situación química implica un gran número de átomos y hemos visto que los átomos se agitan todos en una forma complicada y casual. Si pudiéramos analizar cada colisión y fuéramos capaces de seguir en detalle el movimiento de cada molécula, esperaríamos poder deducir lo que sucede, pero enorme cantidad de datos que se necesitan para seguir la trayectoria de todas esas moléculas exceden con mucho la capacidad de cualquier computadora, y, por cierto, la capacidad de la mente, que fue necesario desarrollar un método para tratar con tales situaciones complicadas. La mecánica estadística es entonces la ciencia de los fenómenos del calor, o la termodinámica. La química inorgánica es una ciencia, ahora reducida esencialmente a lo que se llama la fisico-química y la química cuántica; la fisico-química para estudiar las velocidades con que ocurren las reacciones y qué es lo que está sucediendo en detalle (¿cómo chocan las moléculas? ¿Qué parte se rompe primero?, etc.), y la química cuántica para ayudarnos a comprender 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 los seres vivos. Por un tiempo se creyó que las sustancias que están asociadas con las cosas vivientes eran tan maravillosas que no podían manufacturarse a partir de materiales inorgánicos. Esto no es cierto, en absoluto; son exactamente lo mismo que las sustancias hechas en química inorgánica. Pero tienen arreglos más complicados de los átomos. Es evidente que la química orgánica tiene una relación muy estrecha con la biología que provee sus sustancias y con la industria; más aún, puede aplicarse mucha fisico-química y mecánica cuántica tanto a los compuestos orgánicos como a los inorgánicos. Sin embargo, los principales problemas de la química orgánica no están en esos aspectos, sino más bien en el análisis y síntesis de las sustancias que se forman en los sistemas biológicos, en las cosas vivas. Esto conduce imperceptiblemente, a pasos, hacia la bioquímica y luego a la biología misma, o biología molecular.

3-3 Biología

Así llegamos a la ciencia de la *biología*, que es el estudio de las cosas vivas. En los primeros días de la biología, los biólogos tenían que tratar con problemas puramente descriptivos de buscar qué cosas son vivas, y así, tenían sólo que contar cosas tales como los pelos de las patas de las pulgas. Después que se resolvieron estos asuntos con gran interés, los biólogos se dirigieron hacia la *maquinaria* interior de los cuerpos vivos, primero desde un punto de vista global, naturalmente, porque se requiere algún

esfuerzo para entrar en los detalles más finos.

Había una interesante relación primaria entre la física y la biología en la cual la biología ayudaba a la física en el descubrimiento de *la conservación de la energía*, lo cual fue, por primera vez, demostrado por Mayer en conexión con la cantidad de calor que recibe y cede una criatura viva

Si miramos más de cerca los procesos biológicos de los animales vivos, vemos muchos fenómenos físicos: la circulación de la sangre, bombas, presión, etc. Hay nervios: sabemos qué es lo que pasa cuando pisamos una piedra puntiaguda, y que de una manera u otra la información va desde la pierna hacia arriba. Es interesante cómo sucede. En sus estudios sobre los nervios, los biólogos han llegado a la conclusión que los nervios son tubos muy finos con una compleja pared muy delgada; a través de esta pared la célula bombea iones; así, hay iones positivos en el exterior y negativos en el interior, como en un capacitor. Ahora bien, esta membrana tiene una propiedad interesante; si se "descarga" en un lugar, es decir, si algunos iones son capaces de atravesar en algún lugar de manera que allí se reduce el voltaje eléctrico, dicha influencia eléctrica se hace sentir sobre los iones vecinos y afecta la membrana de tal manera, que deja pasar también los iones en los puntos vecinos. Esto a su vez la afecta más allá, etc., y así hay una onda de "penetrabilidad" de la membrana que recorre la fibra cuando se "excita" en un punto, al pararse sobre una piedra puntiaguda. Esta onda es algo análogo a una larga secuencia de fichas de dominó verticales; si se empuja la del extremo, esta empuja a la próxima, etc. Por cierto, esto transmitirá solamente un mensaje, a no ser que las fichas de dominó se paren de nuevo; en forma análoga, en una célula nerviosa hay procesos que bombean lentamente de nuevo los iones hacia afuera para que el nervio quede listo para el próximo impulso. Así es como sabemos lo que estamos haciendo (o por lo menos dónde estamos). Por supuesto, los efectos eléctricos asociados con este impulso nervioso pueden captarse con instrumentos eléctricos y, debido a que son efectos eléctricos, es evidente que la física de los efectos eléctricos ha tenido mucha influencia en la comprensión del fenómeno.

El efecto opuesto es que, desde algún lugar del cerebro, se envía hacia afuera un mensaje a lo largo de un nervio. ¿Qué sucede en el extremo del nervio? Allí el nervio se ramifica en hilos finos, conectadas a una estructura cerca de un músculo llamada placa terminal. Por razones que no se comprenden con exactitud, cuando un impulso llega al término del nervio, se eyectan pequeños paquetes (cinco a diez moléculas de una vez) de un compuesto químico llamado acetilcolina que afectan la fibra muscular y la hacen contraerse -¡Cuán simple! ¿Qué hace que se contraiga un músculo? Un músculo es un número muy grande de fibras muy cerca unas de otras, que contiene dos sustancias diferentes, miosina y actomiosina, pero el mecanismo mediante el cual la reacción química inducida por la acetilcolina puede modificar las dimensiones de la molécula es aún desconocido. Así, los procesos fundamentales en el músculo que producen los movimientos mecánicos no se conocen.

La biología es un campo tan enorme y vasto que hay montones de otros problemas que ni siquiera podemos mencionar:- problemas de cómo funciona la visión (qué produce la

luz en el ojo), cómo funciona el oído, etc. (La forma en que funciona el pensamiento la discutiremos más tarde bajo psicología). Bien, esas cosas concernientes a la biología que hemos discutido aquí no son, desde un punto de vista biológico, realmente fundamentales en el fondo de la vida, en el sentido que aun si las comprendiéramos todavía no comprenderíamos la vida misma. Para dar un ejemplo: los hombres que estudian los nervios estiman que su trabajo es muy importante porque, después de todo, usted no puede tener animales sin nervios, Pero *se puede tener vida sin nervios*. Las plantas no tienen ni nervios ni músculos, pero están funcionando, están igualmente vivas. Así, para los problemas fundamentales de la biología debemos observar más profundamente; cuando lo hacemos así, descubrimos que todos los seres vivientes tienen un gran número de características en común. El rasgo más común es que están hechos de *células*, dentro de cada una de las cuales hay un mecanismo complejo para hacer cosas químicamente. En las células de las plantas, por ejemplo hay un mecanismo para recoger luz y generar sacarosa, la que se consume en la oscuridad para mantener la planta viva. Cuando el animal se come la planta, la sacarosa genera una serie de reacciones químicas muy estrechamente relacionadas con la fotosíntesis (y su efecto opuesto en la oscuridad) en las plantas.

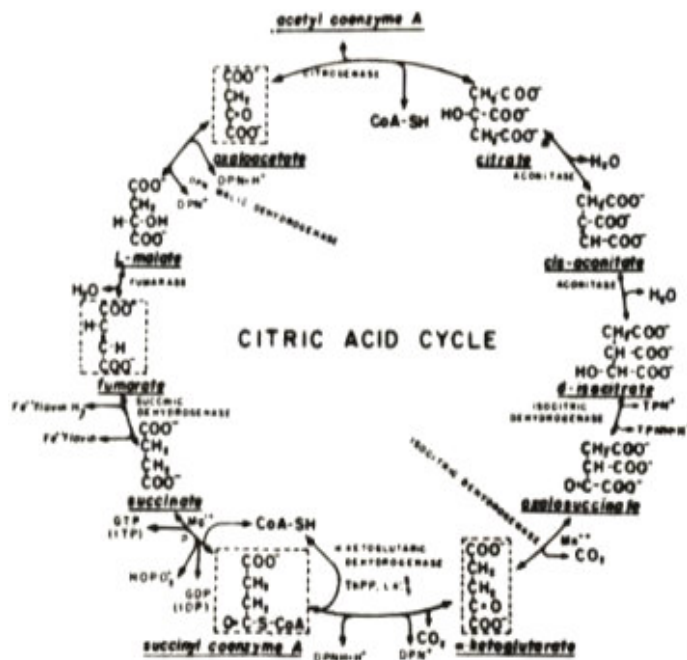


Fig. 3-1. El ciclo de Krebs

En las células de los sistemas vivos hay muchas reacciones químicas complicadas que transforman un compuesto en otro y otro. Para dar una idea del enorme esfuerzo que se ha hecho en el estudio de la química, el cuadro en la figura 3-1 resume nuestro conocimiento actualizado sobre solo una pequeña parte de las muchas series de reacciones que ocurren en las células, quizás un pequeño porcentaje o algo así de ellas.

Aquí vemos una serie entera de moléculas que cambian de una a otra en una secuencia o ciclo de pasos más bien pequeños. Se le llama el ciclo Krebs, el ciclo

respiratorio. Cada uno de los compuestos químicos y cada uno de los pasos es bastante simple, en función de qué cambios se hacen en la molécula, pero --y esto es un descubrimiento central importante en bioquímica- estos cambios son *relativamente difíciles de realizar en un laboratorio*. Si tenemos una sustancia y otra muy similar a la primera no se convierte simplemente en la otra porque las dos formas están corrientemente separadas por una barrera o “colina” de energía. Consideren esta analogía: si queremos trasladar un objeto de un lugar a otro que está en el mismo nivel pero en el otro lado de una colina, podemos empujarlo por encima de la cumbre; pero hacerlo así requiere que se le agregue alguna energía. Por tanto, la mayoría de las reacciones químicas no ocurren, porque hay lo que se llama una *energía de activación* de por medio. Para agregar un átomo extra a nuestro compuesto químico se necesita que lo acerquemos lo suficiente para que pueda ocurrir un reordenamiento; entonces se pegará. Pero si no podemos darle suficiente energía para acercarlo lo necesario, no se alcanzará el propósito: hará parte del camino hacia arriba de la colina y rodará hacia abajo de nuevo. Sin embargo, si pudiéramos literalmente coger las moléculas con nuestras manos y apretar y estirar los átomos de tal manera que abramos un hueco para permitir la entrada del nuevo átomo, y luego dejarlos acomodarse, habríamos encontrado otro camino *alrededor* de la colina, que no necesitaría energía extra, y la reacción procedería fácilmente. Ahora, en la realidad, hay en las células moléculas *muy* grandes, mucho más grandes que de las que estamos describiendo, que en alguna forma complicada sujetan a las moléculas pequeñas en forma adecuada para que la reacción pueda realizarse fácilmente. Esas cosas muy grandes y complicadas se llaman *enzimas*. (En un principio, se llamaron fermentos porque se descubrieron originalmente en la fermentación del azúcar. En realidad, algunas de las primeras reacciones en el ciclo fueron descubiertas allí.) La reacción procederá en presencia de una enzima.

Una enzima está hecha de otra sustancia llamada *proteína*. Las enzimas son muy complicadas y cada una es diferente, estando cada una construida para controlar cierta reacción especial. Los nombres de las enzimas están escritos en la figura 3-1 en cada reacción. (Algunas veces la misma enzima puede controlar dos reacciones.) Hacemos énfasis en que las enzimas mismas no se afectan directamente por la reacción. No cambian: solamente dejan pasar un átomo de un lugar a otro. Habiendo hecho esto, la enzima está lista para repetirlo con la próxima molécula, como una máquina de una fábrica. Por cierto, debe haber un suministro de ciertos átomos y una forma de eliminar otros átomos. Tómese el hidrógeno por ejemplo: hay enzimas que poseen unidades especiales que transportan el hidrógeno para todas las reacciones químicas. Por ejemplo hay tres o cuatro enzimas hidrogeno-reductoras que se usan en diferentes lugares sobre todo nuestro ciclo. Es interesante que el mecanismo que libera hidrogeno en algún lugar, tomará aquel hidrogeno y lo usará en algún otro lugar.

La característica más importante del ciclo de la figura 3-1 es la transformación de GDP en GTP (di-fosfato de guanidina en trifosfato de guanidina) porque una sustancia contiene mucha más energía que la otra. Así como hay una "caja" en ciertas enzimas para transportar átomos de hidrogeno, hay ciertas "cajas" transportadoras de *energía* que contienen el grupo trifosfato. Como la GTP tiene más energía que la GDP y el ciclo funciona en una dirección, estamos produciendo moléculas que tienen una energía

extra que puede movilizar otro ciclo que *requiere* energía, por ejemplo la contracción de un músculo. El músculo no se contraerá a no ser que haya GTP. Podemos tomar fibra muscular, ponerla en agua y agregar GTP, y las fibras se contraerán transformando GTP en GDP si está presente la enzima correcta. Así el sistema real está en la transformación GDP-GTP; en la oscuridad la GTP, que se ha estado almacenando durante el día, se usa para producir el ciclo completo en la otra dirección. Una enzima, ustedes ven, no se preocupa en que dirección procede la reacción pues, si lo hiciera, violaría una de las leyes de la física.

La física es de gran importancia en la biología y otras ciencias por otra razón aún, que tiene que ver con *técnicas experimentales*. En realidad, si no fuera por el gran desarrollo de la física experimental, estos cuadros bioquímicos no se conocerían hoy. La razón es que la herramienta más útil de todas para el análisis de este sistema fantásticamente complejo es *marcar* los átomos que se usan en las reacciones. Así, si pudiéramos introducir en el ciclo algún dióxido de carbono que tiene una "marca verde", y luego medir después de tres segundos donde está la marca verde, y de nuevo medir después de 10 segundos, etc., podríamos seguir el curso de las reacciones. ¿Qué son las "marcas verdes"? Son isótopos diferentes. Recordemos que las propiedades químicas de los átomos están determinadas por el número de electrones, no por la masa del núcleo. Pero puede haber, en el carbono por ejemplo, seis neutrones o siete neutrones junto con 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 eso son distinguibles. Usando estos isótopos de pesos diferentes, o aún isótopos radioactivos como el C^{14} , que provee un medio más sencillo para seguir cantidades muy pequeñas, es posible seguir las reacciones.

Ahora volvemos a la descripción de enzimas y proteínas. Todas las proteínas no son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Hay muchas proteínas, tales como las proteínas de los músculos, las proteínas estructurales que están, por ejemplo, en los cartílagos, pelo, piel, etc., que no son enzimas en sí mismas. Sin embargo, las proteínas son una sustancia muy característica de la vida: en primer lugar forman todas las enzimas, y, segundo, forman gran parte del resto de la materia viviente. Las proteínas tienen una estructura muy interesante y simple. Son una serie, o cadena, de diferentes aminoácidos. Hay veinte aminoácidos diferentes, y todos ellos pueden combinarse entre sí para formar cadenas cuya espina dorsal 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 especial. Algunos, por ejemplo, tienen un átomo de azufre en cierto lugar; cuando dos átomos de azufre están en la misma proteína, forman un enlace, esto es, unen la cadena en dos puntos y forman un anillo. Otro tiene átomos de oxígeno extra que lo hace una sustancia ácida, otro tiene una característica básica. Algunos tienen grandes grupos colgando hacia afuera por un lado, de modo que ocupan mucho espacio. Uno de los aminoácidos llamado prolina no es realmente un aminoácido, sino un iminoácido. Esta pequeña diferencia produce como resultado que, cuando la prolina está en la cadena, ésta se retuerce. Si quisiéramos producir una proteína en particular, daríamos estas instrucciones: coloque uno de esos ganchos de azufre aquí; luego agregue algo que ocupe lugar; luego pegue

algo para poner una rosca en la cadena. En esta forma obtendremos una cadena de aspecto complicado, enganchada a sí misma y con una estructura compleja; presumiblemente ésta es precisamente la manera como se forman todas las variedades de enzimas. Uno de los grandes triunfos en los tiempos recientes (desde 1960), fue descubrir por fin la disposición atómica espacial exacta de ciertas proteínas, que contienen unos 56 a 60 aminoácidos en hilera. Más de un millar de átomos (más cercano a dos mil, si contamos los átomos de hidrógeno) se han localizado en una estructura compleja en dos proteínas. La primera fue la hemoglobina. Uno de los aspectos tristes de este descubrimiento es que no podemos ver cosa alguna en esta estructura; no comprendemos cómo funciona y la forma en que lo hace. Por cierto, ese es el próximo problema por resolver.

Otro problema es: ¿cómo saben las enzimas qué cosa son? Una mosca de ojos rojos forma una mosca de ojos rojos, y así la información de la estructura entera de enzimas para hacer un pigmento rojo debe pasar de una mosca a la siguiente. Esto es hecho por una sustancia en el núcleo de la célula, no una proteína, llamada ADN (abreviación de ácido desoxirribonucleico). Esta es la sustancia clave que pasa de una célula a otra (por ejemplo, las células de semen consisten principalmente en ADN) y lleva la información de cómo hacer las enzimas. El ADN es el "programa" ¿Qué aspecto tiene el programa y cómo funciona? Primero, el programa debe ser capaz de reproducirse a sí mismo. Segundo, debe ser capaz de instruir a las proteínas. Respecto a la reproducción, podemos pensar que procede como en la reproducción celular. Las células simplemente aumentan de tamaño y luego se dividen por la mitad. ¿Deberá ser así con las moléculas de ADN, por tanto, que también aumenten de tamaño y se dividan por la mitad? ¡Cada átomo, por supuesto, no aumenta de tamaño y se divide por la mitad! No, es imposible reproducir una molécula excepto de un modo algo más inteligente.

La estructura de la sustancia ADN fue estudiada por largo tiempo, primero químicamente para encontrar la composición, y luego con rayos X para encontrar la estructura en el espacio. El resultado fue el siguiente descubrimiento notable: la molécula de ADN es un par de cadenas enrolladas una sobre la otra. La espina dorsal de cada una de estas cadenas, que son análogas a las cadenas de las proteínas pero químicamente bastante diferentes, es una serie de grupos azúcar y fosfato, como se muestra en la figura 3-2. Ahora vemos cómo la cadena puede contener instrucciones, pues si pudiéramos dividir esta cadena por la mitad, tendríamos un gene BAIDC... y cada cosa viviente podría tener una serie diferente. Así, tal vez, de alguna manera, las instrucciones específicas para la manufactura de proteínas están contenidas en la serie específica del ADN.

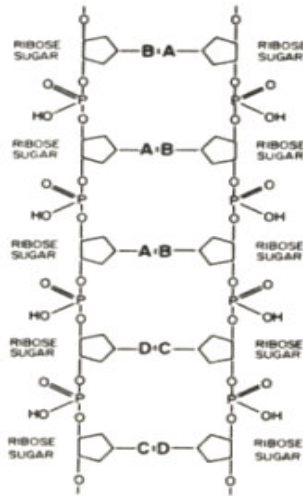


Fig. 3-2. Diagrama esquemático del ADN.

Unidos a cada azúcar a lo largo de la línea y ligando las dos cadenas entre sí, hay ciertos pares de uniones enlazadas. Sin embargo, no son todas de la misma naturaleza; hay cuatro tipos, llamados adenina, timina, citosina y guanina, pero llamémoslas A, B, C, y D. Lo interesante es que solo ciertos pares pueden situarse uno opuesto al otro, por ejemplo A con B y C con D. Estos pares están puestos en ambas cadenas de tal manera que "encajan entre sí" y tienen una fuerte energía de interacción. Sin embargo, C no encajará con A, y B no encajará con C; solo encajarán en pares, A con B, y C con D. Por lo tanto, si uno es C, el otro debe ser D, etc. Cualesquiera sean las letras en una cadena, cada una debe tener una letra complementaria específica en la otra cadena.

¿Qué pasa entonces con la reproducción? Supóngase que separamos esta cadena en dos. ¿Cómo podemos hacer otra exacta a ésta? Si, en el interior de las células hay un departamento productor que entrega fosfato, azúcar y unidades de A, B, C, D, que no están conectadas en cadena, los únicos que se unirán a nuestra cadena separada serán los correctos, los complementos de BAADC..., es decir, ABBCD... Por tanto, lo que sucede es que la cadena se divide por la mitad durante la división celular, una mitad que terminará con una célula y la otra mitad que terminará en la otra célula; cuando se separan, se forma una nueva cadena complementaria de cada mitad de cadena.

A continuación viene la pregunta, precisamente, ¿cómo determina el orden de las unidades A, B, C, D la disposición de los aminoácidos en la proteína? Este es el problema central no resuelto actualmente en biología. Las primeras claves o partes de información, sin embargo, son estas: hay en la célula pequeñísimas partículas llamadas microsomas, y se sabe ahora que éste es el lugar donde se fabrican las proteínas. Pero los microsomas no están en el núcleo, donde están el ADN y sus instrucciones. Algo debe suceder. Sin embargo, también se sabe que pequeñas piezas moleculares se desprenden del ADN --no tan largas como la gran molécula de ADN que lleva toda la información en sí misma, pero como una pequeña sección de ella--. Esta se llama RNA, pero no es lo esencial. Es una especie de copia de ADN, una copia resumida. El RNA, que en cierta forma lleva un mensaje acerca de qué proteína debe fabricar, va

hacia el microsoma. Eso se sabe. Cuando llega allí, la proteína se sintetiza en el microsoma. Esto también se sabe. Sin embargo, los detalles de cómo los aminoácidos entran y se ordenan de acuerdo con el código que esta contenido en el RNA, son, hasta ahora, desconocidos. No sabemos cómo leerlo. Si conociéramos, por ejemplo, la “alineación” A, B, C, C, A, no podríamos decir qué proteína se producirá.

Por cierto, ninguna otra ciencia o campo está progresando más en tantos nuevos frentes, en el momento presente, como la biología, y si tuviéramos que escoger la suposición más poderosa de todas que se aproxime más y más a comprender la vida, es: *todas las cosas están hechas de átomos*, y todo lo que las cosas vivas hacen, puede comprenderse en términos de las agitaciones y movimientos de los átomos.

3-4 Astronomía

En esta rápida visión del mundo entero, pasemos ahora a la astronomía. La astronomía es más antigua que la física. En realidad, dio origen a la física al mostrar la hermosa simplicidad del movimiento de las estrellas y planetas, cuya comprensión fue el comienzo de la física. Pero el descubrimiento más notable de toda la astronomía es que *las estrellas están hechas de átomos de la misma naturaleza de los que encontramos en la tierra*.*

- ¡Qué manera de precipitarme a través de esto! ¡Cuánto contenido tiene cada frase de esta breve historia! Las estrellas están hechas de los mismos átomos que los de la tierra. De ordinario, utilizo un tópico como este para dictar una clase. Los poetas dicen que la ciencia elimina la belleza de las estrellas --meros globos de átomos de gas--. Nada es “mero”. Yo también puedo ver las estrellas en una noche despejada y sentirlas. ¿Pero veo yo más o menos? La vastedad de los cielos ensancha mi imaginación, anclado en este puerto, mi pequeño ojo puede recoger luz de un millón de años de edad. Una vasta estructura de la cual yo soy una parte- quizás alguna estrella olvidada expulsó el material de mi cuerpo como el que está expulsando una allí. O verlas con el ojo más grande de Palomar, apartándose desde un punto común de partida donde quizás estuvieron todas juntas. ¿Cuál es la estructura o el significado, o el por qué? No le hace daño al misterio conocer un poco de él. ¡Porque la verdad es mucho más maravillosa de lo que algún artista en el pasado imaginó! ¿Por qué los poetas del presente no hablan de ella? ¿Qué hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera un hombre, pero si es una inmensa esfera rotante de metano y amoníaco deben permanecer mudos?

(Cómo se llegó a esto? Los átomos liberan luz que tiene frecuencias definidas, algo así como instrumento musical que tiene tonos definidos o frecuencias de sonido. Cuando escuchamos varios tonos diferentes podemos distinguirlos, pero cuando miramos con nuestros ojos una mezcla de colores no podemos distinguir los colores que la componen, porque el ojo no puede, ni cercanamente, discernir como el oído, en este respecto. Sin embargo, con un espectroscopio podemos analizar las frecuencias de las ondas luminosas y de esa manera podemos ver los tipos de átomos que hay en las diferentes estrellas. De hecho, dos elementos químicos se descubrieron en una estrella antes que se encontraran en la tierra. El helio se descubrió en el sol, de ahí su nombre, y el tecnecio se descubrió en ciertas estrellas frías. Esto, por supuesto, nos permite

progresar en comprender por qué las estrellas están hechas de los mismos tipos de átomos que existen en la tierra. Ahora sabemos mucho acerca de los átomos, especialmente en cuanto a su comportamiento bajo condiciones de alta temperatura, pero no de alta densidad: así podemos analizar con la mecánica estadística el comportamiento de la sustancia estelar. Aun cuando no podemos reproducir las condiciones en la tierra usando leyes básicas de la física, podemos decir, a menudo con precisión, o muy aproximadamente, qué sucederá.

Así es como la física ayuda a la astronomía. Por extraño que parezca, comprendemos la distribución de materia en el interior del sol mucho mejor que lo que comprendemos el interior de la tierra. Lo que sucede en el *interior* de una estrella se comprende mejor que lo que pudiera adivinarse de la dificultad de tener que mirar un pequeño punto luminoso a través de un telescopio, porque podemos *calcular* qué deben hacer 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, qué hace que continúen quemándose. Uno de los hombres que descubrió esto había salido con su amiga la noche siguiente de haberse dado cuenta que en las estrellas se debían estar produciendo *reacciones nucleares* para que brillaran. Ella dijo: “Mira qué bonito brillan las estrellas” El dijo: “Sí, y justamente ahora, soy el único hombre en el mundo que sabe *por qué* brillan”. Ella simplemente se rió. No le impresionaba haber salido con el único hombre del mundo que, en ese momento, sabía por qué brillan las estrellas. Bueno, es triste estar solo, pero así son las cosas.

Es la “combustión” nuclear del hidrógeno la que suministra la energía del sol; el hidrógeno se convierte en helio. Además, en última instancia, la producción de los diversos elementos químicos se lleva a cabo en los centros de las estrellas a partir del hidrógeno. El material del que estamos hechos nosotros fue “cocinado” alguna vez en una estrella y expulsado fuera. ¿Cómo lo sabemos? Porque hay una clave. La proporción de los diferentes isótopos (cuánto C^{12} , cuánto C^{13} , etc.) es algo que nunca cambia en las reacciones químicas, porque las reacciones químicas son tan idénticas para las dos. Las proporciones son puramente el resultado de reacciones *nucleares*. Observando las proporciones de los isótopos en el rescoldo frío y apagado en que estamos, podemos descubrir cómo fue el horno donde se formaron los materiales de que estamos hechos. Aquel horno fue como las estrellas, y por tanto es muy probable que nuestros elementos se “hicieron” en las estrellas y arrojados en las explosiones que llamamos novas y supernovas. La astronomía está tan cerca de la física que estudiaremos muchas cosas astronómicas a medida que avancemos.

3-5 Geología

Ahora pasemos a lo que se llama ciencias de la tierra, o geología. Primero la meteorología y el tiempo. Por cierto, que los instrumentos de meteorología son instrumentos físicos, y el desarrollo de la física experimental hizo posible estos

instrumentos, como se explicó anteriormente. Sin embargo, la teoría de la meteorología nunca ha sido investigada satisfactoriamente por los físicos. Bien, dirán ustedes, no hay otra cosa que aire, y conocemos las ecuaciones de los movimientos del aire". Eso es cierto. Así, si sabemos las condiciones del aire de hoy, ¿por qué no podemos calcular las condiciones del aire de mañana?'- Primero, no sabemos realmente cuál es la condición de hoy, porque el aire está arremolinándose y dando vueltas por todas partes. Resulta ser muy susceptible y aún inestable. Si han visto alguna vez correr suavemente el agua sobre una represa y luego convertirse en un gran número de burbujas y gotas cuando sale, comprenderán lo que quiero decir con inestable. Ustedes conocen la condición del agua antes de salir del vertedero; es perfectamente tranquila; pero en el momento que comienza a caer, ¿dónde empiezan las gotas? ¿Qué determina lo grande que van a ser y dónde estarán? Esto no se sabe, porque el agua es inestable. Una masa de aire moviéndose suavemente sobre una montaña se convierte en complejos remolinos y torbellinos- En muchos campos encontramos esta situación de flujo turbulento que no podemos analizar actualmente- ¡Dejemos rápidamente el asunto del tiempo y discutamos sobre geología!

El asunto básico para la geología es: ¿Qué hace que la tierra sea lo que es? Los procesos más obvios están al frente de nuestros ojos, los procesos de erosión de los ríos, los vientos, etc. Es bastante fácil comprenderlos, pero por cada poco de erosión hay algo más que está sucediendo. Las montañas no son más bajas hoy en promedio de lo que fueron en el pasado. Debe haber procesos formadores de montañas. Encontrarán, si estudian geología, que hay procesos formadores de montañas y volcanismo, que nadie comprende pero que son la mitad de la geología. El fenómeno de los volcanes no se comprende realmente. Lo que produce un terremoto, a la postre, no se comprende. Se comprende que si hay algo empujando a otra cosa, cede repentinamente y se desliza --eso está bien--. Pero ¿Qué es lo que empuja, y por qué? La teoría es que hay corrientes en el interior de la tierra --corrientes circulantes debido a la diferencia de temperatura interior y exterior--, las cuales en su movimiento empujan ligeramente la superficie. Así, si hay dos circulaciones opuestas vecinas, la materia se acumula en la región donde se juntan y forman cadenas de montañas que están en condiciones desafortunadas de tensión y así producen volcanes y terremotos.

¿Que pasa en el interior de la tierra? Mucho se sabe acerca de la velocidad de las ondas sísmicas a través de la tierra y la distribución de densidades de la tierra. Sin embargo, los físicos han sido incapaces de obtener una buena teoría sobre lo denso que deberá ser una sustancia a las presiones que se esperarían en el centro de la tierra. En otras palabras, no podemos calcular las propiedades de la materia en dichas circunstancias. Lo hacemos mucho menos bien con la tierra que lo hacemos con las condiciones de la materia en las estrellas. La matemática implicada parece ser un poco difícil, hasta ahora, pero quizás no pasará mucho tiempo antes de que alguien se dé cuenta que es un problema importante y que realmente lo solucione. El otro aspecto, por cierto, es que aun si supiéramos la densidad, no podríamos calcular las corrientes de circulación. Tampoco podemos realmente deducir las propiedades de las rocas a elevadas presiones. No podemos decir con que rapidez las rocas cederán; todo eso debe resolverse por medio de experimentos.

3-6 Psicología

Consideremos a continuación la ciencia de la psicología. Incidentalmente, el psicoanálisis no es una ciencia: en el mejor de los casos es un proceso médico, o quizás aún brujería. Tiene una teoría acerca de qué produce la enfermedad --muchos "espíritus" diferentes, etc.-. El hechicero tiene una teoría de que una enfermedad como la malaria está causada por un espíritu que viene del aire- no se sana agitando una culebra sobre él; en cambio, la quinina sí ayuda la malaria. Así, si están enfermos, yo les aconsejaría que vayan al hechicero, porque es el hombre en la tribu que sabe más acerca de enfermedades; por otro lado, su conocimiento no es ciencia. El psicoanálisis no ha sido cuidadosamente comprobado por el experimento, y no hay manera de encontrar una lista del número de casos en los que funciona, el número de casos en los que no funciona, etc.

Las otras ramas de la psicología, que implican cosas como la fisiología de las sensaciones --qué sucede en el ojo, y qué sucede en el cerebro- son, si quieren, menos interesantes. Pero cierto progreso, pequeño pero real, se ha logrado al estudiarlas. Uno de los progresos técnicos más interesantes puede ser o no, llamado psicología. El problema central de la mente, si quieren, o del sistema nervioso es este: cuando un animal aprende algo, puede hacer algo diferente de lo que podía hacer antes y sus células cerebrales deben haber cambiado también, si es que está hecho de átomos.

¿En qué sentido es diferente? No sabemos dónde mirar, o qué buscar, cuando algo se memoriza. No sabemos qué significa o qué cambio hay en el sistema nervioso cuando se aprende una realidad. Este es un problema muy importante que no ha sido resuelto. Suponiendo, sin embargo, que existe algo como la memoria, el cerebro es una masa tan enorme de alambres y nervios interconectados que probablemente no puede ser analizado en una forma directa. Hay una analogía de esto con las máquinas computadoras y los elementos de computación, en que también tienen muchas líneas, y que tienen algún tipo de elemento análogo, quizás, a la sinapsis o conexión de un nervio con otro. Esto es una materia muy interesante que no tenemos tiempo de discutir con más detalle --las relaciones entre el pensamiento y las máquinas computadoras--. Debe apreciarse, por cierto, que esta materia nos dirá muy poco acerca de las complejidades reales del comportamiento humano ordinario. Todos los seres humanos son tan diferentes. Pasará mucho tiempo antes que lleguemos ahí. Debemos empezar mucho más taras. Si pudiéramos siquiera deducir como funciona un perro, habríamos avanzado bastante. Los perros son más fáciles de comprender, pero nadie aún sabe como funcionan los perros.

3-7 ¿Cómo se llegó a eso?

Para que la física sea útil a las otras ciencias en una forma teórica, que no sea la invención de instrumentos, la ciencia en cuestión debe suministrar al físico una descripción del tema en el lenguaje del físico. Ellos pueden decir: "¿por qué salta una rana? Y el físico no puede contestar. Si ellos le dicen lo que es una rana; que hay tantas

moléculas; que hay un nervio aquí, etc., eso es diferente. Si ellos nos dijeran, más o menos, a qué se parecen la tierra y las estrellas, entonces podemos resolverlo. Para que la teoría física sea de alguna utilidad, debemos saber exactamente dónde están colocados los átomos. Para comprender la química, debemos saber exactamente qué átomos están presentes, pues de lo contrario no podemos analizarla. Esta es solamente la primera limitación, por supuesto.

Hay otro tipo de problema en las ciencias hermanas, que no existe en la física; podemos llamarlo, a falta de un término mejor, el asunto histórico. ¿Cómo se llegó a ego? Si comprendemos todo acerca de la biología, quisiéramos saber cómo aparecieron todas las cosas que hay en la tierra. Existe la teoría de la evolución, una parte importante de la biología. En geología, no solo queremos saber cómo se están formando las montañas, sino cómo se formó la tierra entera en el comienzo, el origen del sistema solar, etc. Esto, por supuesto, nos conduce a querer saber qué tipo de materia existía en el mundo. ¿Cómo evolucionan las estrellas? ¿Cuáles fueron las condiciones iniciales? Este es el problema de la historia de la astronomía.

Se ha descubierto mucho acerca de la formación de las estrellas, de la formación de los elementos de los cuales estamos hechos y hasta un poco acerca del origen del universo.

No hay problemas históricos que se estén estudiando en la física actualmente. No tenemos una pregunta: Aquí están las leyes de la física, ¿cómo se llegó a ellas? No nos imaginamos, por ahora, que las leyes de la física estén en cierto modo cambiando con el tiempo, que en el pasado fueran diferentes de lo que son en el presente. Por supuesto que puede ser, y en el momento en que encontremos que sí lo están, la pregunta histórica de la física estará ligada con el resto de la historia del universo y entonces los físicos estarán hablando de los mismos problemas que los astrónomos, los geólogos y los biólogos.

Finalmente, hay 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 quedo desde hace mucho tiempo atrás --más de cien años--. Nadie en la física ha sido realmente capaz de analizarlo matemáticamente en forma satisfactoria a pesar de su importancia para las ciencias hermanas. Es el análisis de fluidos circulantes o turbulentos. Si observamos la evolución de una estrella, se llega a un punto donde podemos deducir que va a comenzar la convección, y a partir de esto ya no podemos deducir qué va a pasar. Unos pocos millones de años más tarde la estrella hace explosión, pero no podemos explicar la razón.

No podemos analizar el tiempo. No conocemos los esquemas de los movimientos que debería haber en el interior de la tierra. La forma más simple del problema es tomar una tubería muy larga y hacer fluir agua a través de ella a gran velocidad. Preguntamos: para hacer fluir una cantidad dada de agua a través de esa tubería, ¿cuanta presión se necesita? Nadie puede analizarlo partiendo de primeros principios y de las propiedades del agua. Si el agua fluye muy lentamente, o si usamos algo espeso como la miel, entonces podemos calcularlo exactamente. Ustedes lo encontraran en su texto. Lo que

no podemos realmente hacer es tratar con agua real y fresca que corre a través de una tubería. Este es el problema central que deberíamos resolver algún día y que no lo hemos hecho.

Decía una vez un poeta: El universo entero esta en un vaso de vino". Probablemente nunca sabremos lo que quería decir, pues los poetas no escriben para ser comprendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino lo suficientemente cerca, vemos el universo entero. Ahí están los temas de la física: el líquido que se arremolina y se evapora dependiendo del viento y del tiempo, las reflexiones en el vidrio, y nuestra imaginación agrega los átomos. El vidrio es un destilado de las rocas terrestres y en su composición vemos los secretos de la edad del universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraño arreglo de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo se formaron? Están los fermentos, las enzimas, los substratos y sus productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como lo hizo Louis Pasteur, la causa de muchas enfermedades. ¡Cuán vivido es el vino tinto que imprime su existencia dentro del conocimiento de quien lo observa! ¡Si nuestras pequeñas mentes, por conveniencia, dividen este vaso de vino, este universo, en partes- física, biología, geología, astronomía, psicología, etc.- recuerden que la naturaleza no lo sabe! Así, unamos todo de nuevo, sin olvidar en última instancia para qué sirve. Dejemos que nos dé un placer final más: ¡bébanlo y olvídense de todo!