

# Átomos en movimiento

## Introducción

Este curso de física en dos años se presenta partiendo de la base de que usted, el lector, va a ser físico. Este no es necesariamente su caso, por supuesto, ¡pero es lo que suponen todos los profesores en todas las disciplinas! Si usted va a ser un físico, tendrá mucho que estudiar: doscientos años del campo de conocimiento con más rápido desarrollo que existe. Tanto conocimiento, de hecho, que usted quizá piense que no puede aprenderlo todo en cuatro años, y realmente no puede hacerlo; ¡tendrá que ir a cursos para graduados!

Resulta bastante sorprendente el hecho de que, a pesar de la tremenda cantidad de trabajo realizado durante todo este tiempo, es posible condensar en gran medida la enorme masa de resultados; es decir, encontrar leyes que resuman todo nuestro conocimiento. Incluso así, las leyes son tan difíciles de captar que no es justo que usted empiece a explorar esta enorme disciplina sin algún tipo de mapa o panorámica de la relación entre las diversas disciplinas científicas. De acuerdo con estos comentarios preliminares, los primeros tres capítulos esbozarán la relación de la física con el resto de las ciencias, las relaciones de las ciencias entre sí, y el significado de la ciencia, lo que nos servirá para hacernos una «idea» del tema.

Usted podría preguntarse por qué no podemos enseñar física exponiendo simplemente las leyes básicas en la página uno y mostrando luego cómo se aplican en todas las circunstancias posibles, tal como hacemos con la geometría euclidiana, donde establecemos los axiomas y luego hacemos todo tipo de deducciones. (¿De modo que, no contento con aprender física en cuatro años, quiere usted aprenderla en cuatro minutos?) No podemos hacerlo de esta forma por dos razones. La primera es que *no conocemos* aún todas las leyes básicas: la frontera entre el conocimiento y la ignorancia está en continua expansión. La segunda razón es que el enunciado correcto de las leyes de la física implica algunas ideas no muy familiares cuya descripción requiere matemáticas avanzadas. Por lo tanto, es necesaria una considerable cantidad

de entrenamiento preparatorio incluso para aprender lo que significan las *palabras*. No, no es posible hacerlo de ese modo. Sólo podemos hacerlo fragmento a fragmento.

Todo fragmento, o parte, de la totalidad de la naturaleza es siempre una mera *aproximación* a la verdad completa, o la verdad completa hasta donde la conocemos. De hecho, todo lo que sabemos es tan sólo algún tipo de aproximación porque *sabemos que todavía no conocemos todas las leyes*. Por lo tanto, las cosas deben ser aprendidas sólo para ser desaprendidas de nuevo o, lo que es más probable, para ser corregidas.

El principio de la ciencia, casi la definición, es el siguiente: *La prueba de todo conocimiento es el experimento*. El experimento es el único juez de la «verdad» científica. Pero ¿cuál es la fuente del conocimiento? ¿De dónde proceden las leyes que van a ser puestas a prueba? El experimento por sí mismo ayuda a producir dichas leyes, en el sentido de que nos da sugerencias. Pero también se necesita imaginación para crear grandes generalizaciones a partir de estas sugerencias: conjeturar las maravillosas, y simples, pero muy extrañas estructuras que hay debajo de todas ellas, y luego experimentar para poner a prueba una vez más si hemos hecho la conjetura correcta. Este proceso de imaginación es tan difícil que hay una división del trabajo en la física: están los físicos *teóricos*, quienes imaginan, deducen y conjeturan nuevas leyes pero no experimentan, y luego están los físicos *experimentales*, que experimentan, imaginan, deducen y conjeturan.

Decíamos que las leyes de la naturaleza son aproximadas: que primero encontramos las «erróneas», y luego encontramos las «correctas». Ahora bien, ¿cómo puede ser «erróneo» un experimento? En primer lugar, de un modo trivial: si algo está mal en el aparato que usted no advirtió. Pero estas cosas se pueden arreglar fácilmente, y comprobar una y otra vez. Así, sin reparar en estos detalles menores, ¿cómo *pueden* ser erróneos los resultados de un experimento? Sólo siendo imprecisos. Por ejemplo, la masa de un objeto nunca parece cambiar: una peonza en movimiento tiene el mismo peso que una peonza en reposo. De este modo se concibió una «ley»: la masa es constante, independiente de la velocidad. Ahora se ha encontrado que esta «ley» es incorrecta. Resulta que la masa aumenta con la velocidad, pero un aumento apreciable requiere velocidades próximas a la de la luz. Una ley *verdadera* es: si un objeto se mueve con una velocidad menor que 100 kilómetros por segundo, su masa es constante dentro de un margen de una parte en un millón. En esta forma aproximada, esta es una ley correcta. Uno podría pensar que la nueva ley no supone ninguna diferencia significativa en la práctica. Bien, sí y no. Para velocidades ordinarias podemos ciertamente olvidarla y utilizar la sencilla ley de la masa constante como una buena aproximación. Pero si las velocidades son altas cometeremos errores, y cuanto más alta es la velocidad, mayor será el error.

Finalmente, y lo que es más interesante, *filosóficamente estamos completamente equivocados* con la ley aproximada. Nuestra imagen entera del mundo tiene que ser modificada incluso si los cambios en las masas son muy pequeños. Esto es algo muy peculiar de la filosofía, o las ideas, que subyacen en las leyes. Incluso un efecto muy pequeño requiere a veces cambios profundos en nuestras ideas.

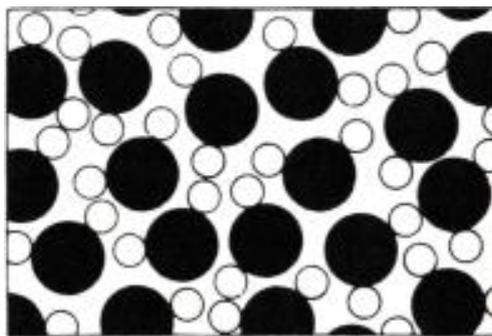
Ahora bien, ¿qué deberíamos enseñar primero? ¿Deberíamos enseñar la ley *correcta* pero poco familiar con sus extrañas y difíciles ideas conceptuales, por ejemplo

la teoría de la relatividad, el espacio-tiempo tetradimensional y cosas similares? ¿O deberíamos enseñar primero la sencilla ley de la «masa constante», que es sólo aproximada pero no implica ideas tan difíciles? La primera es más excitante, más maravillosa y más divertida, pero la segunda es más fácil de captar al principio, y es un primer paso hacia una comprensión real de la segunda idea. Esta cuestión surge una y otra vez al enseñar física. En diferentes momentos tendremos que resolverla de diferentes formas, pero en cada etapa vale la pena aprender lo que ahora se conoce, cuán aproximado es, cómo encaja en todo lo demás, y cómo puede cambiar cuando aprendamos más cosas.

Sigamos ahora con la panorámica, o mapa general, de nuestra comprensión de la ciencia actual (en particular, la física, pero también otras ciencias en la periferia), de modo que cuando nos centremos más tarde en algún punto concreto tendremos alguna idea del contexto general, de por qué este punto particular es interesante y cómo encaja en la gran estructura. Así que ¿cuál es nuestra imagen global del mundo?

### La materia está hecha de átomos

Si, por algún cataclismo, todo el conocimiento quedara destruido y sólo una sentencia pasara a las siguientes generaciones de criaturas, ¿qué enunciado contendría la máxima información en menos palabras? Yo creo que es la *hipótesis atómica* (o el *hecho atómico*, o como quiera que ustedes deseen llamarlo) según la cual *todas las cosas están hechas de átomos: pequeñas partículas que se mueven en movimiento perpetuo, atrayéndose mutuamente cuando están a poca distancia, pero repeliéndose al ser apretadas unas contra otras*. Verán ustedes que en esa simple sentencia hay una enorme cantidad de información acerca del mundo, con tal de que se aplique un poco de imaginación y reflexión.



1.1 Agua ampliada mil millones de veces

Para ilustrar la potencia de la idea atómica, supongamos que tenemos una gota de agua de 5 milímetros de diámetro. Si la miramos muy de cerca no vemos otra cosa que agua: agua uniforme y continua. Si la ampliamos con el mejor microscopio óptico disponible —aproximadamente dos mil veces— la gota de agua tendrá aproximadamente 10 metros de diámetro, el tamaño aproximado de una habitación grande, y si ahora la miráramos desde muy cerca, *aún* veríamos agua relativamente uniforme, pero aquí y allí nadan de un lado a otro pequeñas cosas con forma de un

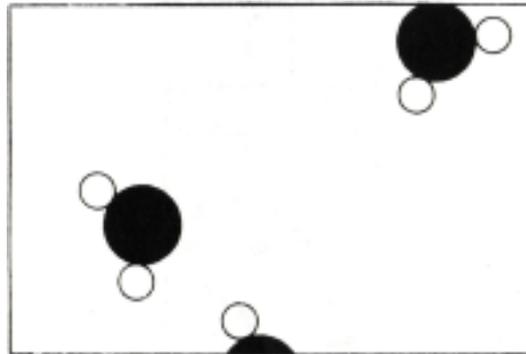
balón de rugby. Muy interesante. Son paramecios. Quizá ustedes se queden en este punto y sientan tanta curiosidad por los paramecios con sus cilios cimbreantes y cuerpos contorsionados que ya no sigan más adelante, excepto quizá para ampliar aún más los paramecios y ver qué hay en su interior. Esto, por supuesto, es un tema para la biología, pero por el momento continuaremos y miraremos aún más de cerca al propio material acuoso, ampliándolo dos mil veces más. Ahora la gota de agua se extiende hasta 20 kilómetros de diámetro, y si la miramos muy de cerca vemos una especie de hormigueo, algo que ya no tiene una apariencia lisa; se parece a una multitud en un partido de fútbol vista a gran distancia. Para ver qué es este hormigueo, lo ampliaremos otras doscientas cincuenta veces y veremos algo similar a lo que se muestra en la figura 1.1. Esta es una imagen del agua ampliada mil millones de veces, pero idealizada en varios sentidos. En primer lugar, las partículas están dibujadas de una forma muy simple con bordes definidos, lo que no es exacto. En segundo lugar, y por simplicidad, están esbozadas casi esquemáticamente en una formación bidimensional, pero por supuesto se mueven en tres dimensiones. Nótese que hay dos tipos de «manchas» o círculos que representan los átomos de oxígeno (negros) e hidrógeno (blancos), y que a cada oxígeno hay unidos dos hidrógenos. (Cada grupo pequeño de un oxígeno con sus dos hidrógenos se denomina una molécula.) La imagen aún está más idealizada por el hecho de que las partículas reales en la naturaleza están agitándose y rebotando continuamente, girando y moviéndose unas alrededor de las otras. Ustedes tendrán que imaginarse esto como una imagen dinámica más que estática. Otra cosa que no puede ilustrarse en un dibujo es el hecho de que las partículas están «adheridas»: que se atraen entre sí, ésta atraída por esa otra, etc. El grupo entero está «pegado», por así decir. Por otra parte, las partículas no se interpenetran. Si ustedes tratan de comprimir dos de ellas y juntarlas demasiado, ellas se repelen.

Los átomos tienen  $1 \text{ o } 2 \times 10^{-8}$  cm de radio. Ahora bien,  $10^{-8}$  cm se denomina un *ångström* (tan sólo otro nombre), de modo que decimos que tienen  $1 \text{ o } 2 \text{ ångströms}$  (Å) de radio. Otra manera de recordar este tamaño es la siguiente: si se ampliara una manzana hasta el tamaño de la Tierra, entonces los átomos de la manzana tendrían aproximadamente el tamaño de la manzana original.

Imaginemos ahora esta gran gota de agua con todas estas partículas zigzagueantes adheridas y siguiéndose unas a otras. El agua mantiene su volumen; no se deshace, porque hay una atracción mutua entre las moléculas. Si la gota está en una pendiente, donde puede moverse de un lugar a otro, el agua fluirá, pero no desaparece simplemente —las cosas no se desvanecen— porque existe una atracción molecular. Este movimiento de agitación es lo que representamos como *calor*: cuando aumentamos la temperatura, aumentamos el movimiento. Si calentamos el agua, la agitación aumenta y aumenta el volumen entre los átomos, y si el calentamiento continúa llega un momento en que la atracción entre las moléculas no es suficiente para mantenerlas juntas y se *disgregan* separándose unas de otras. Por supuesto, así es como producimos vapor a partir del agua: aumentando la temperatura; las partículas se separan debido al incremento del movimiento.

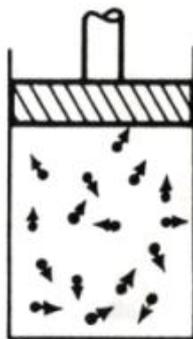
En la figura 1.2 tenemos una imagen del vapor. Esta imagen del vapor falla en un aspecto: a la presión atmosférica ordinaria podría haber tan sólo unas pocas moléculas en toda una habitación, y difícilmente llegaría a haber tres en una figura como esta. La

mayoría de los cuadrados de este tamaño no contendrían ninguna, pero nosotros tenemos accidentalmente dos y media o tres en la imagen (sólo para que no estuviera completamente vacía). Ahora bien, en el caso del vapor vemos las moléculas características de forma más clara que en el agua. Por simplicidad, las moléculas se han dibujado de modo que haya un ángulo de  $120^\circ$  entre los átomos de hidrógeno. En realidad el ángulo es de  $105^\circ 3'$ , y la distancia entre el centro de un hidrógeno y el centro del oxígeno es de  $0,957\text{\AA}$ , de modo que conocemos muy bien esta molécula.



1.2 Vapor de agua

Veamos cuáles son algunas de las propiedades del vapor de agua o cualquier otro gas. Las moléculas, estando separadas unas de otras, rebotarán contra las paredes. Imaginemos una habitación con varias pelotas de tenis (un centenar más o menos) rebotando en movimiento perpetuo. Cuando bombardean la pared se produce un empuje sobre la misma. (Por supuesto, nosotros tendríamos que empujar la pared desde atrás para mantenerla fija.) Esto significa que el gas ejerce una fuerza agitatoria que nuestros torpes sentidos (al no estar nosotros mismos ampliados mil millones de veces) sienten sólo como un *empuje promedio*. Para confinar un gas debemos aplicar una presión.



1.3 Recipiente estándar para mantener gases

La figura 1.3 muestra un recipiente estándar para mantener gases (utilizado en todos los libros de texto), un cilindro provisto de un pistón. Ahora bien, no hay ninguna diferencia en cuáles sean las formas de las moléculas de agua, de modo que por simplicidad las dibujaremos como pelotas de tenis o puntos pequeños. Estas cosas están en movimiento perpetuo en todas direcciones. Tantas están golpeando el pistón superior continuamente que para evitar que se salgan del tanque por este golpeteo

tendremos que sujetar el pistón mediante una cierta fuerza que llamamos *presión* (en realidad, la fuerza es la presión multiplicada por el área). Evidentemente, la fuerza es proporcional al área, pues si aumentamos el área pero mantenemos constante el número de moléculas por centímetro cúbico, aumentamos el número de colisiones con el pistón en la misma proporción en que aumenta el área.

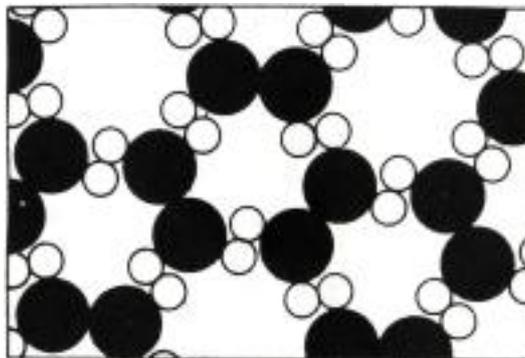
Pongamos ahora el doble de moléculas en este tanque, de modo que se duplique la densidad, y hagamos que tengan la misma velocidad, es decir, la misma temperatura. Entonces, en una buena aproximación, el número de colisiones se duplicará y, puesto que cada una de ellas será igual de «energética» que antes, la presión será proporcional a la densidad. Si consideramos la verdadera naturaleza de las fuerzas entre los átomos, cabría esperar una ligera disminución en la presión debida a la atracción entre los mismos, y un ligero incremento debido al volumen finito que ocupan. De todas formas, con una aproximación excelente, si la densidad es lo suficientemente baja para que no haya muchos átomos, la *presión es proporcional a la densidad*.

También podemos ver algo más: si aumentamos la temperatura sin cambiar la densidad del gas, o sea, si aumentamos la velocidad de los átomos, ¿qué sucederá con la presión? Bien, los átomos golpean con más fuerza porque se están moviendo con más rapidez, y además golpean con más frecuencia, de modo que la presión aumenta. Veán ustedes qué simples son las ideas de la teoría atómica.

Consideremos otra situación. Supongamos que el pistón se mueve hacia adentro, de modo que los átomos son lentamente comprimidos en un espacio menor. ¿Qué sucede cuando un átomo golpea contra el pistón en movimiento? Evidentemente gana velocidad en la colisión. Ustedes pueden intentarlo haciendo rebotar una pelota de ping-pong en una pala que se mueve hacia ella, por ejemplo, y encontrarán que sale rebotada con más velocidad con la que chocó. (Ejemplo especial: si resulta que un átomo está en reposo y el pistón le golpea, el átomo ciertamente se moverá.) Así pues, los átomos están «más calientes» cuando vuelven del pistón que antes de que chocasen en él. Por consiguiente, todos los átomos que están en el recipiente habrán ganado velocidad. Esto significa que *cuando comprimimos lentamente un gas, la temperatura del gas aumenta*. De este modo, en una *compresión* lenta, un gas *aumentará* su temperatura, y en una *expansión* lenta *disminuirá* su temperatura.

Volvamos ahora a nuestra gota de agua y consideremos otro aspecto. Supongamos que disminuimos la temperatura de nuestra gota de agua. Supongamos que la agitación de las moléculas de los átomos del agua está decreciendo continuamente. Sabemos que existen fuerzas atractivas entre los átomos, de modo que al cabo de algún tiempo ya no serán capaces de agitarse tanto. Lo que sucederá a temperaturas muy bajas está indicado en la figura 1.4: las moléculas se quedarán bloqueadas en una nueva estructura, el *hielo*. Este diagrama esquemático concreto del hielo no es muy bueno porque está en dos dimensiones, pero es cualitativamente correcto. El punto interesante es que en el material hay un *lugar definido para cada átomo*, y ustedes pueden apreciar fácilmente que si de un modo u otro mantuviéramos todos los átomos de un extremo de la gota en una cierta disposición, cada uno de ellos en un determinado lugar, entonces, debido a la estructura de las interconexiones, que es rígida, el otro extremo a kilómetros de distancia (en nuestra escala ampliada) tendría una posición definida. Así, si agarramos una aguja de hielo

por un extremo, el otro extremo aguanta nuestra fuerza, a diferencia del caso del agua en el que la estructura se desmorona debido a la agitación creciente que hace que todos los átomos se muevan de formas diferentes. La diferencia entre sólidos y líquidos consiste entonces en que en un sólido los átomos están dispuestos en algún tipo de formación, llamada una *red cristalina*, y no tienen una posición aleatoria a grandes distancias; la posición de los átomos en un extremo del cristal está determinada por la de otros a millones de átomos de distancia al otro extremo del cristal. La figura 1.4 es una disposición imaginaria para el hielo pero, aunque contiene muchas de las características correctas del hielo, no es la disposición verdadera. Una de las características correctas es que hay una parte de la simetría que es hexagonal. Ustedes pueden ver que, si giramos la figura  $120^\circ$  alrededor de un eje, la imagen vuelve a ser la misma. Así pues, hay una *simetría* en el hielo que explica por qué los copos de nieve aparecen con seis lados. Otra cosa que podemos ver de la figura 1.4 es por qué el hielo se contrae cuando se funde. La estructura cristalina concreta del hielo mostrada aquí tiene muchos «agujeros» en su interior, como los tiene la verdadera estructura del hielo. Cuando la organización se desmorona, estos agujeros pueden ser ocupados por moléculas. La mayoría de las sustancias simples, con la excepción del agua y algún metal, se *expanden* al fundirse, porque los átomos están empaquetados más estrechamente en el sólido cristalino y al fundirse necesitan más sitio para agitarse; pero una estructura abierta colapsa, como es el caso del agua.



1.4 Hielo

Ahora bien, aunque el hielo tiene una forma cristalina «rígida», su temperatura puede cambiar: el hielo tiene calor. Si queremos, podemos cambiar la cantidad de calor. ¿Qué es el calor en el caso del hielo? Los átomos no están en reposo. Están agitándose y vibrando. Así pues, incluso si hay un orden definido en el cristal —una estructura definida—, todos los átomos están vibrando «en su sitio». A medida que aumentamos la temperatura, vibran con una amplitud cada vez mayor, hasta que se salen de su sitio. Llamamos a esto *fusión*. A medida que disminuimos la temperatura, la vibración disminuye cada vez más hasta que, en el cero absoluto, se reduce a una cantidad mínima de vibración que pueden tener los átomos, aunque *no nula*. Esta cantidad de movimiento mínima que pueden tener los átomos no es suficiente para fundir una sustancia, con una excepción: el helio. El helio simplemente reduce los movimientos atómicos tanto como puede, pero incluso en el cero absoluto hay todavía movimiento suficiente para evitar la congelación. El helio no se congela ni siquiera en el cero absoluto, a menos que la presión sea tan grande como para hacer que los

átomos se aplasten unos contra otros. Si aumentamos la presión, podemos hacer que se solidifique.