

Principios de química



Dmitri Mendeleev · 1903

Audilecciones ilustradas

Lecturized

Principios de química

Audiolecciones ilustradas

Dmitri Mendeleev · 1903

Contado como lecciones ilustradas por Lecturized
lecturized.com

Del original: Д. И. Менделеев, Основы химии, 7-е изд. (С.-Петербург, 1903)

Índice

¿Adónde va la madera?

Lo que nota la balanza

La sal, la plata y el error de los alquimistas

Doce días con mercurio

Los cuerpos simples y las letras de la química

Elementos, no ingredientes

Lista de los elementos y la fuerza que los une

Energía almacenada, recetas fijas y caminos de ida y vuelta

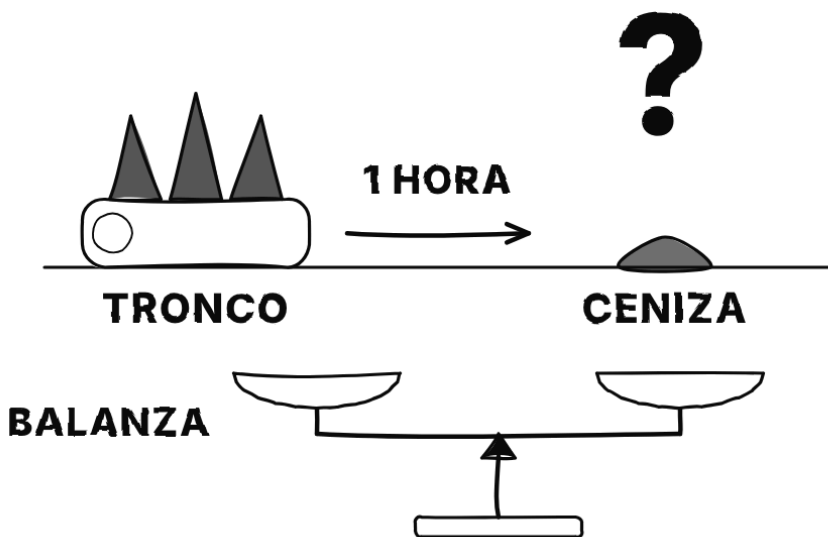
Calor, trabajo y la ventana de temperatura

Descomposiciones a medias y el poder de la corriente

Luz, golpes, tiempo y contacto

¿Adónde va la madera?

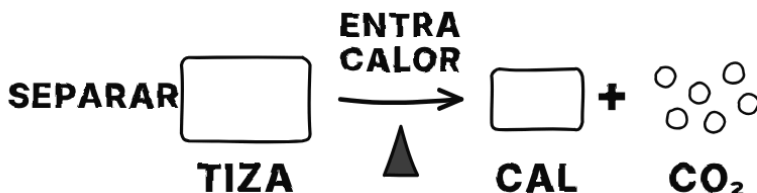
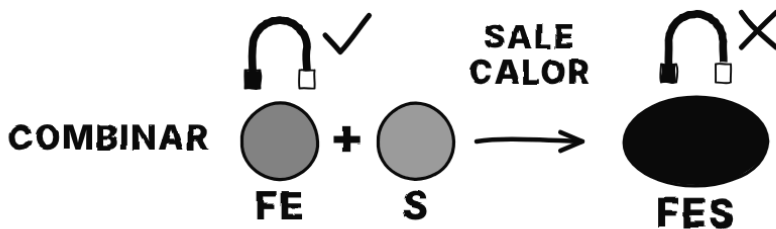
Imagine un tronco en la chimenea una tarde de invierno. Una hora después solo queda un montoncito de ceniza gris que cabría en una mano. ¿Adónde fue el resto de la madera? Durante miles de años la respuesta honesta parecía ser que simplemente desaparecía, que el fuego destruye la materia. El libro que está leyendo empieza mostrando que esa respuesta es falsa, y que la manera de demostrarlo es una balanza.



¿Adónde va la madera?

Mendeléiev empieza con una definición. La química, dice, estudia las sustancias homogéneas de las que están hechos todos los cuerpos del mundo, cómo se convierten unas en otras y lo que ocurre mientras lo hacen. Una sustancia homogénea es la que es igual en todas partes, como el agua pura, el hierro puro o el azúcar puro. Añade que la química se convirtió en una ciencia propia porque hubo que admitir una nueva clase de fuerza. Además de la gravedad, la cohesión, el calor, la luz y la electricidad, hay fuerzas internas en las partes más diminutas de cada sustancia. Estas fuerzas permanecen ocultas en la vida corriente y solo se muestran cuando una sustancia se transforma en otra. Ese cambio se llama reacción química. Una reacción solo ocurre cuando las sustancias se tocan lo más estrechamente posible, y la gobiernan las fuerzas de sus partículas invisibles más pequeñas, que Mendeléiev llama moléculas.

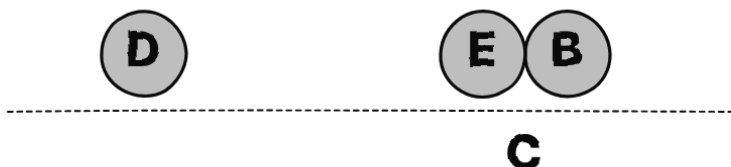
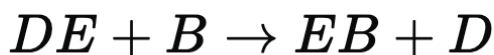
Después clasifica las reacciones en tres clases principales. La primera es la combinación: dos sustancias, o en general varias, dan un número menor de sustancias, en el caso más simple una sola. Su ejemplo es el hierro y el azufre. Mezcle limaduras de hierro con azufre amarillo en polvo y tendrá una simple mezcla: un imán saca el hierro y un líquido aceitoso puede lavar el azufre. Caliente la mezcla y aparece una sustancia nueva, el sulfuro de hierro, en la que ningún microscopio encuentra un grano de hierro ni un grano de azufre. Los dos han entrado por completo el uno en el otro y ya no se pueden distinguir ni separar. La combinación suele desprender calor. La combustión corriente es una reacción de este tipo: el combustible se combina con una parte del aire, la llamada oxígeno, y los gases y vapores de la llama y del humo son lo que forma. La llama de gas de su cocina es una combinación ante sus ojos: el combustible se une al oxígeno y desprende el calor que hierve el agua de la tetera.



Combinación y descomposición

La segunda clase es la descomposición, el caso opuesto. Aquí una sustancia da dos o más. Caliente mucho la madera sin aire y se deshace en un gas que arde, un líquido acuoso, alquitrán y carbón; las fábricas obtenían antes así el alquitrán, el gas de alumbrado y el carbón vegetal. Caliente piedra caliza, tiza o mármol y queda cal mientras escapa un gas, que Mendeléiev llama gas de ácido carbónico y nosotros dióxido de carbono. El compuesto verde de cobre del mineral malaquita hace lo mismo a un calor mucho menor, tan bajo que un tubo fino de vidrio lo resiste; promete describir este caso con detalle enseguida. Y si la combinación suele desprender calor, la descomposición suele absorberlo.

La tercera clase es la que necesita una fórmula, y vale la pena detenerse en ella. Aquí el número de sustancias que entran es igual al de las que salen: dos dan dos. Mendeléiev lo escribe con letras. Tome dos cuerpos, A y B, y suponga que producen otros dos, C y D. Imagine que A está hecho en realidad de dos partes, D y E, de modo que A se puede escribir $A = DE$. Ahora deje que A se separe en D y E, y que E se una a B para formar C, de modo que $C = EB$. Escrita en una línea, la reacción es $DE + B \rightarrow EB + D$. En palabras: la parte E ha pasado de una pareja a otra, y D se ha quedado sola. La intuición es un baile en el que un bailarín cambia de pareja: nadie nuevo entra en la sala y nadie sale, pero al final las parejas son otras. Así que esta tercera clase es una descomposición y una combinación a la vez, y Mendeléiev llama a estas reacciones desplazamientos o, cuando dos sustancias dan dos nuevas, sustitución o doble descomposición.

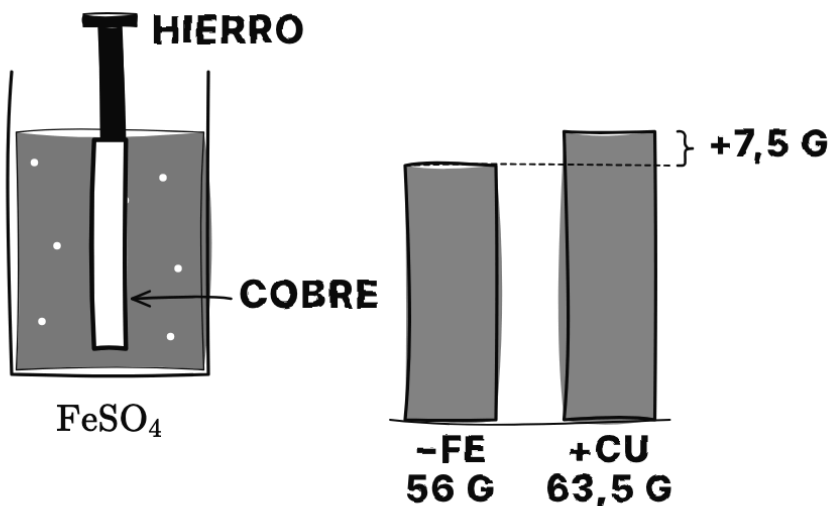
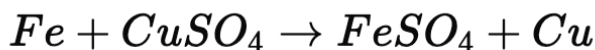


NADIE SE PIERDE

Cambio de pareja

Su ejemplo casi se puede ver. Disuelva vitriolo azul, que es sulfato de cobre, en agua para obtener un líquido azul transparente, y sumerja en él un clavo de hierro. Al cabo de un rato el clavo queda cubierto de cobre rojo, y el líquido contiene vitriolo verde, sulfato de hierro, que se diferencia del azul solo en que el hierro ha ocupado el lugar del cobre. En la notación actual la reacción es $\text{Fe} + \text{CuSO}_4 \rightarrow \text{FeSO}_4 + \text{Cu}$. Compárelo con las letras: B es el hierro, Fe; A es el sulfato de cobre, así que D es el cobre, Cu, y E es la parte sulfato, SO_4 ; y C, el sulfato ahora unido al hierro, es el sulfato de hierro. Un pequeño cálculo muestra que el baile conserva a todos los bailarines. En unidades modernas, 56 gramos de hierro ocupan el lugar de 63,5 gramos de cobre, así que si se disuelven 56 gramos de hierro, 63,5 gramos de cobre salen de la disolución y se depositan en el clavo. El clavo se

vuelve más pesado en la diferencia, 7,5 gramos, mientras la disolución se vuelve más ligera exactamente en la misma cantidad. Mendeléiev señala que así se puede recubrir el hierro de cobre y el cobre de plata, y que estas reacciones se usan constantemente. La galvanoplastia de un taller moderno, donde un objeto de metal opaco sale de un baño con una capa brillante, se basa en el mismo cambio de parejas.

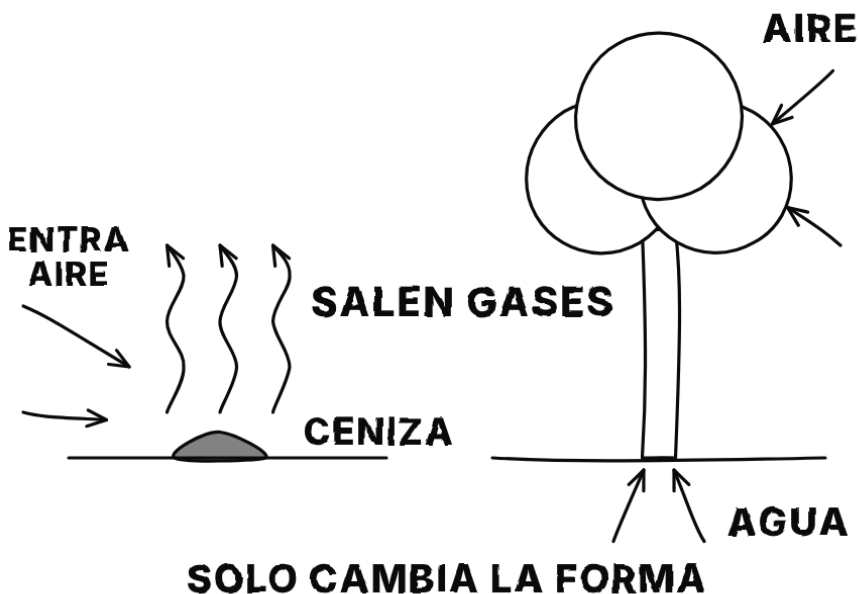


El hierro ocupa el lugar del cobre

¿Por qué, entonces, llegó tan tarde la química, si la gente llevaba miles de años fundiendo metales, horneando pan y fabricando cerveza? Mendeléiev da dos razones. La primera es la complejidad: la mayoría de las reacciones en la naturaleza y en las fábricas son muchas combinaciones, descomposiciones y sustituciones a la vez, así que nadie podía predecirlas ni controlarlas. La segunda son los gases,

sobre todo el aire. Solo en los siglos dieciséis y diecisiete se entendió que el aire tiene peso y que un gas es un estado de la materia elástico que se extiende en todas direcciones. Antes de eso, los gases se escapaban de todas las cuentas porque no se podían ver.

Y esto nos devuelve a la chimenea. La madera arde y deja un poco de ceniza, así que la materia parece desaparecer. Una semilla diminuta se convierte en un árbol enorme, así que la materia parece crearse de la nada. Ambas impresiones nacen del mismo error: olvidar los gases invisibles. Cuando la madera arde, se convierte en gases que se van con el humo. Recoja ese humo y encontrará gases muy distintos del aire, gases en los que una vela se apaga y un animal no puede respirar. Péselos y encontrará algo sorprendente: pesan más que la madera. El peso extra es una parte del aire que la madera al arder ha tomado, igual que el hierro se vuelve más pesado al oxidarse. La pólvora tampoco desaparece; se convierte en gases de pólvora y humo. Y el árbol se construye con gases tomados del aire, junto con agua y sustancias disueltas que suben sus raíces; ponga una planta en un gas sin la parte nutritiva del aire y no crece, sino que muere. El agua que se seca de un paño mojado vuelve como lluvia, rocío y nieve, y el agua que se hunde en la tierra sale de nuevo en manantiales.

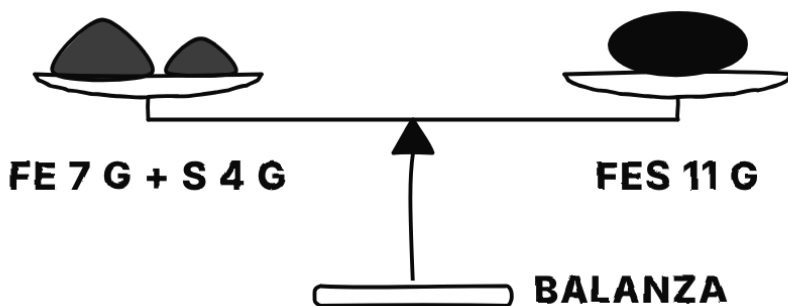


Los gases invisibles

Mendeléiev saca la conclusión en una sola frase que merece citarse. La materia, en todos sus cambios físicos y químicos, «solo cambia de lugar y de forma, pero ni se pierde ni se crea». Algunos filósofos griegos lo habían intuido, y en el siglo diecisiete también Mariotte, pero nadie lo enunció con claridad ni lo utilizó. Quien lo demostró, en la segunda mitad del siglo dieciocho, fue Antoine Lavoisier, académico francés que trabajaba también como arrendador de impuestos, recaudándolos para la corona, y a quien Mendeléiev llama el fundador de la química moderna. Su herramienta fue la balanza, el único instrumento, como dice Mendeléiev, que mide la cantidad de materia directamente y con exactitud. Lavoisier pesaba todo lo que entraba en un experimento, incluso los recipientes, y todo lo que salía.

Cada vez, el peso total después de la reacción era igual al peso total antes de ella.

$$7 + 4 = 11$$



$$A + B + C + \dots = M + N + O + \dots$$

Lo que entra sale

Aquí está esa ley como fórmula, que Mendeléiev está a punto de escribir. Llame A, B, C, etcétera, a los pesos de las sustancias tomadas, y M, N, O, etcétera, a los pesos de las sustancias producidas. Entonces $A + B + C + \dots = M + N + O + \dots$. En palabras: el lado izquierdo es todo lo que usted pone, el lado derecho es todo lo que obtiene, y los dos son iguales. La intuición es la contabilidad: ninguna partida puede aparecer en los libros ni desaparecer de ellos sin un registro, así que los totales tienen que cuadrar. Tome el hierro y el azufre de antes como un cálculo en voz alta. Siete gramos de hierro calentados con cuatro gramos de azufre dan, cuando se combinan por completo, once

gramos de sulfuro de hierro, porque $7 + 4 = 11$. Si después pesara diez gramos, no concluiría que un gramo ha desaparecido; buscaría lo que escapó o lo que no llegó a recoger. Basta una báscula de cocina para sentirlo: pese un frasco cerrado con bicarbonato y vinagre dentro antes y después de que burbujeen, y la lectura no cambia, porque el gas se queda dentro del frasco.

Mendeléiev cuida las palabras. «La materia es eterna» y «la masa se conserva» son frases cortas, y contienen una hipótesis. Lo que se ha visto de verdad es más largo y más modesto: en todos los experimentos y todos los procesos naturales estudiados, nunca se ha encontrado que el peso de los productos sea mayor ni menor que el de las sustancias de partida, dentro de la exactitud de la pesada. Como el peso es proporcional a la masa, la cantidad de materia, esto significa que nadie ha visto nunca a la materia desaparecer ni aparecer de nuevo. Y esta ley da a la química su precisión, porque permite escribir una ecuación para cada reacción y comprobarla en la balanza.

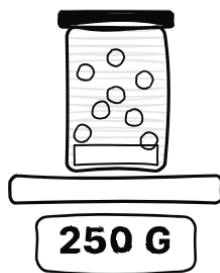
Pruébalo

Tome un frasco de vidrio pequeño con tapa de rosca, ponga dentro una cucharada de bicarbonato y coloque dentro una tacita de vinagre para que los dos no se toquen todavía. Cierre bien la tapa y pese todo el frasco en una báscula de cocina. Ahora incline el frasco para que el vinagre caiga sobre el bicarbonato, y mire cómo burbujea mientras la tapa sigue cerrada. Pese de nuevo el frasco: la lectura es la misma que antes. Después abra la tapa, deje salir el gas, ciérrela y pese una vez más: ahora el frasco pesa un poco menos, porque el gas invisible, que tenía peso, se ha ido.

ANTES



BURBUJEÓ



ABIERTO



La prueba del frasco cerrado

Para recordar

La química estudia las sustancias que son iguales en todas partes y cómo se convierten unas en otras, movidas por fuerzas ocultas en sus partículas más pequeñas. Las reacciones son de tres clases principales: combinación, donde varias sustancias pasan a ser menos; descomposición, donde una pasa a ser varias; y sustitución, donde las partes cambian de pareja, como cuando el hierro ocupa el lugar del cobre. La materia solo parecía desaparecer en el fuego o aparecer en un árbol que crece porque los gases invisibles se dejaban fuera de la cuenta. Lavoisier, con la balanza, mostró que el peso total después de una reacción siempre es igual al peso total antes de ella. Esa igualdad permite a los químicos escribir una ecuación para cada reacción, y es el fundamento de la química como ciencia exacta.

Preguntas

1. En el esquema de letras $DE + B \rightarrow EB + D$, ¿qué hace que sea una sustitución y no una combinación o una descomposición?
 - a. Entran dos sustancias y salen dos, y la parte E pasa de D a B
 - b. Entran dos sustancias y sale una, así que se han unido
 - c. Entra una sustancia y salen dos, así que se ha deshecho
 - d. Las sustancias entran y salen sin cambiar, solo mezcladas
2. El humo de la madera que arde, recogido y pesado, resulta más pesado que la madera. ¿Qué se deduce?

- a. La combustión crea un poco de materia nueva
 - b. La ceniza debía de ser más ligera de lo que parecía
 - c. La madera ha tomado una parte del aire al arder
 - d. El humo es más denso que la madera, así que siempre pesa más
3. Calienta una mezcla pesada de hierro y azufre y encuentra que el producto pesa menos que los dos juntos. ¿Qué le dice que haga la ley de conservación?
- a. Concluir que el calor ha destruido algo de materia
 - b. Aceptar la pérdida como normal en las combinaciones
 - c. Concluir que la balanza no hace falta en química
 - d. Buscar algo que escapó o que no se recogió
4. ¿Por qué la química no pudo ser una ciencia exacta antes de que se entendiera que los gases tienen peso?
- a. Porque las reacciones solo ocurren en los gases
 - b. Porque los gases absorbidos o desprendidos quedaban fuera de todas las cuentas, y los pesos nunca cuadraban
 - c. Porque los gases no se podían calentar en los recipientes de la época

Respuestas

1. **a)** La parte E ha pasado de una pareja a otra y D se ha quedado sola; es una descomposición y una combinación a la vez, dos dan dos.
2. **c)** El peso extra es una parte del aire que la madera al arder ha tomado, igual que el hierro se vuelve más pesado al oxidarse.
3. **d)** Como el peso total después de una reacción siempre es igual al de antes, un gramo que falta significa que algo escapó o quedó fuera de la

cuenta.

4. b) Antes de los siglos dieciséis y diecisiete los gases se escapaban de todas las cuentas porque no se veían, así que la materia parecía desaparecer o aparecer.

Ejemplos resueltos

Hierro y azufre en la balanza Se calientan siete gramos de hierro con cuatro gramos de azufre, y se combinan por completo en sulfuro de hierro. ¿Cuánto pesa el sulfuro de hierro?

Escriba la ley de conservación: los pesos tomados suman lo mismo que los pesos producidos, $A + B = M$.

Las sustancias tomadas son el hierro, $A = 7$ gramos, y el azufre, $B = 4$ gramos.

La combinación es completa, así que el único producto es el sulfuro de hierro, de peso M .

Por tanto $M = 7 + 4 = 11$ gramos.

Respuesta: 11 gramos

Ejercicios

1. Un frasco cerrado con bicarbonato y una tacita de vinagre pesa 250 gramos. Se vierte el vinagre sobre el bicarbonato y burbujea con la tapa cerrada; luego se abre la tapa, sale el gas y el frasco pesa ahora 248 gramos. ¿Cuánto pesaba el frasco con la tapa todavía cerrada después de burbujear, y cuánto gas escapó?

Pista: Con la tapa cerrada nada podía salir, así que aplique $A + B + \dots = M + N + \dots$ a todo lo que hay dentro del frasco.

Respuesta: Con la tapa cerrada seguía pesando 250 gramos, porque no se ganó ni se perdió nada. Después de salir el gas pesaba 248 gramos, así que el gas que escapó pesaba $250 - 248 = 2$ gramos.

2. El hierro sumergido en vitriolo de cobre da cobre y vitriolo de hierro. Con el esquema $DE + B \rightarrow EB + D$, diga qué sustancia hace de cada letra y explique por qué la reacción cuenta como una sustitución.

Pista: B es lo que se sumerge; D es lo que sale sola.

Respuesta: B es el hierro, A, o DE, es el vitriolo de cobre, D es el cobre liberado, E es el resto del vitriolo, y C, o EB, es el vitriolo de hierro. Dos sustancias dan dos nuevas, y el hierro simplemente ha ocupado el lugar del cobre, así que es una sustitución, o doble descomposición.

Lo que nota la balanza

Deje un estropajo de lana de acero toda la noche en un fregadero húmedo y por la mañana estará naranja de óxido. La mayoría diría que el hierro se ha comido, que se le ha quitado algo. Ahora ponga el mismo estropajo en una báscula precisa antes y después de oxidarse. Pesa más. Algo se ha añadido, no quitado, y solo la báscula podía decírselo. La balanza de un laboratorio de química que lee milésimas de gramo es la heredera moderna de la balanza de la que trata esta parte.

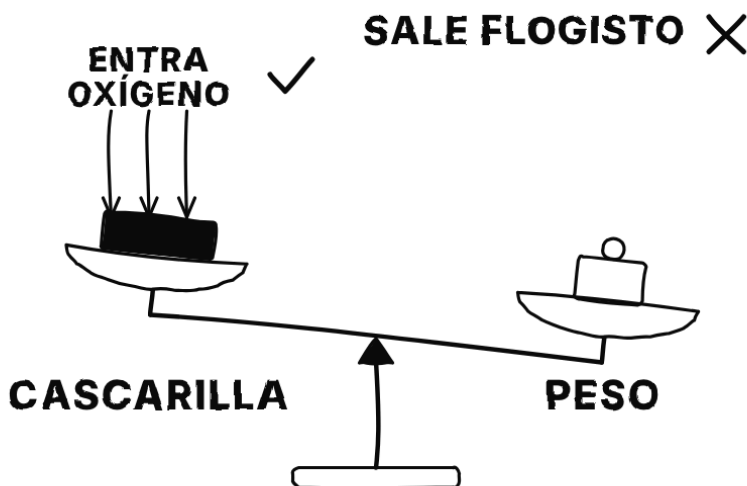
$$A + B + C = M + N + O$$

ANTES	DESPUÉS	
		
20,0 G	20,6 G	$10 = 6,4 + X$
	ÓXIDO NARANJA	$X = 3,6 \text{ G}$

La balanza encuentra un peso oculto

Mendeléiev parte de la ecuación de la parte anterior, la ley de conservación escrita con letras: $A + B + C + \dots = M + N + O + \dots$. A la izquierda están los pesos de las sustancias tomadas, a la derecha los pesos de las sustancias producidas. Señala dos cosas que esta ecuación hace por un químico. Primero, si un peso es desconocido, se puede hallar, porque todo lo demás se conoce y los dos lados deben equilibrarse. Segundo, es una alarma: si olvida una de las sustancias, las sumas no cuadrarán y lo notará enseguida. Este es el primer uso como cálculo en voz alta. Suponga que calienta 10 gramos de una sustancia y quedan 6,4 gramos de un sólido mientras escapa un gas sin que se vea. La ecuación dice $10 = 6,4 + x$, donde x es el peso del gas. Así que $x = 10 - 6,4 = 3,6$ gramos. Ha pesado un gas que nunca vio, simplemente confiando en la balanza. Mendeléiev dice que un principiante debe familiarizarse del todo con esta verdad sencilla, y da ejemplos.

El primero es el hierro. El hierro se oxida en el aire húmedo, y cuando se calienta mucho al aire se cubre de cascarilla, una costra oscura que se descascarilla. El óxido y la cascarilla son sustancias terrosas, muy parecidas a los minerales de hierro que se extraen de la tierra para obtener hierro. Pese el hierro antes y después y verá que su peso ha aumentado. Lavoisier mostró de dónde viene el peso extra: de la parte del aire llamada oxígeno, la que sirve para la combustión. La prueba es sencilla: en el vacío, o en gases sin oxígeno como el hidrógeno o el nitrógeno, el hierro ni se oxida ni forma cascarilla. Así que, por la ley de conservación, el aumento de peso le dice que la cascarilla es más compleja que el hierro y que formarla es una combinación: hierro + oxígeno $\rightarrow$ cascarilla.



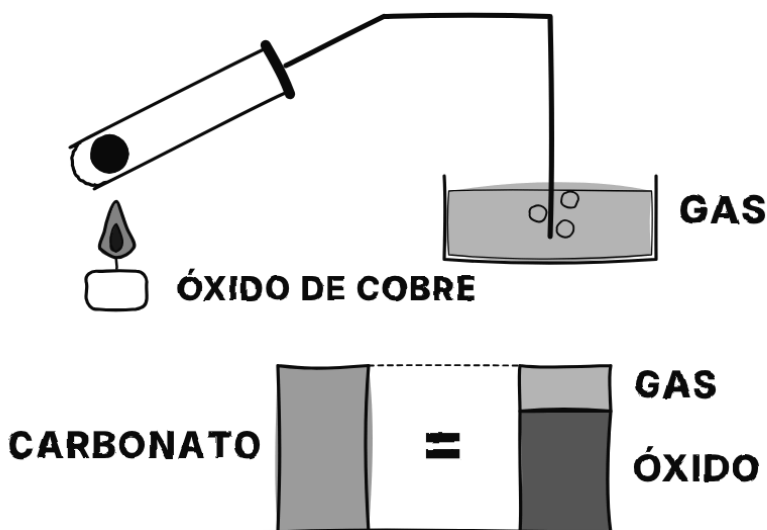
HIERRO + OXÍGENO → CASCARILLA

Hierro más oxígeno, no menos flogisto

Sin la balanza, dice Mendeléiev, era fácil leerlo al revés. Antes de Lavoisier, los químicos creían que la cascarilla era el cuerpo más simple y el hierro el más complejo. El hierro, decían, contenía una sustancia invisible especial llamada flogisto, y al convertirse en cascarilla perdía su flogisto. La historia suena razonable hasta que se pesa: lo que pierde una parte debería volverse más ligero, y sin embargo la cascarilla pesa más. El flogisto era una sustancia imaginaria, y fue la balanza la que mostró que la historia iba al revés.

El segundo ejemplo es el compuesto verde de cobre que Mendeléiev prometió describir. El carbonato de cobre se vende como un polvo verde, y la piedra verde malaquita, usada para adornos y como mineral de cobre, lo contiene. Caliente cualquiera de los dos y se

convierte en un polvo negro llamado óxido de cobre, que es también la cascarilla que se forma en el cobre calentado al aire. Esta vez el polvo negro pesa menos de lo que pesaba el verde. La ley de conservación le dice enseguida qué significa: algo se ha ido, así que es una descomposición. Para atrapar lo que se fue, cierre el recipiente calentado con un tapón bien ajustado y pase por él un tubo doblado, con el otro extremo bajo el agua. Mientras el polvo verde se oscurece, salen burbujas del tubo a través del agua. Recoja ese gas, y una astilla encendida metida en él se apaga como si la metiera en agua. Es gas de ácido carbónico, el mismo gas que desprende la caliza al calentarse, y hoy lo llamamos dióxido de carbono. Mendeléiev subraya que este gas es transparente e incoloro, igual que el aire, así que sin la balanza nadie habría sospechado que estaba ahí. Y cuando también se pesa, el óxido de cobre negro más el gas suman exactamente el polvo verde del principio.



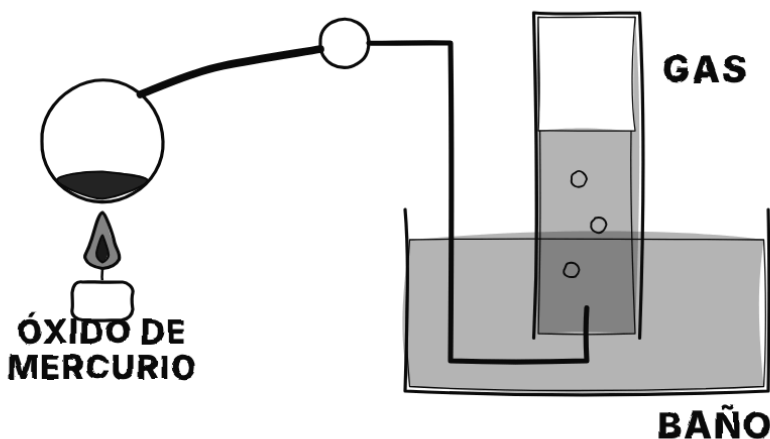
El gas que el ojo no ve

Pruébelo

Ponga una cucharada de bicarbonato en un frasco resistente al calor y péselo en una báscula de cocina. Caliente el frasco suavemente en el horno media hora, déjelo enfriar y péselo otra vez. El frasco pesa menos, aunque no ha salido de él nada visible. Como el polvo verde de cobre, el bicarbonato ha desprendido gas y vapor de agua, y la balanza ha notado lo que sus ojos no vieron.

El tercer ejemplo, dice Mendeléiev, importa más que ningún otro para la historia de la química. Es el óxido rojo de mercurio, un polvo rojo que se forma como cascarilla del mercurio cuando el mercurio se

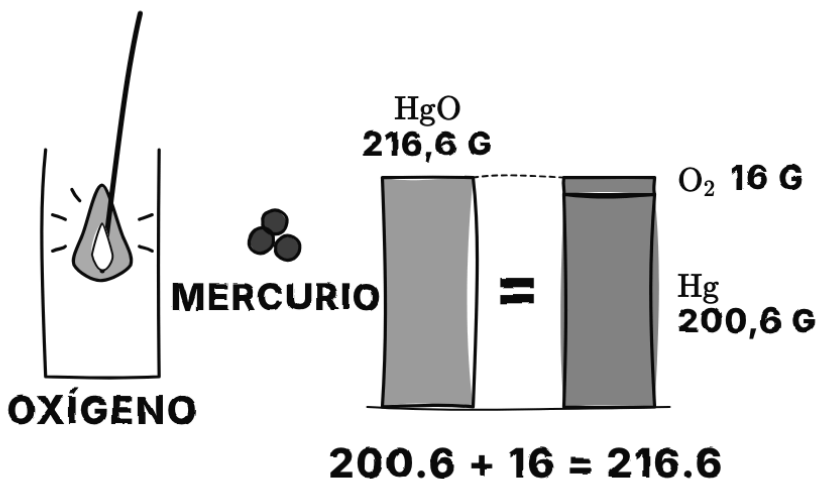
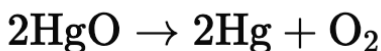
calienta al aire. Imagine el aparato que dibuja. Una retorta de vidrio, una bola con un cuello largo, sostiene el polvo rojo sobre una llama. Su cuello entra a través de un tapón ajustado en una bolita de vidrio, y del otro lado de la bolita baja un tubo que se sumerge en una cubeta de agua, llamada baño. Cualquier gas que se forme tiene una sola salida: por el tubo y hacia arriba a través del agua en forma de burbujas.



Atrapar un gas bajo el agua

Ahora la parte ingeniosa, la manera de atrapar un gas. Llene hasta el borde una probeta alta de vidrio con agua, tape la boca, déle la vuelta y meta la boca bajo el agua del baño antes de destaparla. El agua se queda arriba en la probeta, sostenida por la presión del aire sobre el baño. Coloque la probeta sobre el extremo del tubo, y cada burbuja

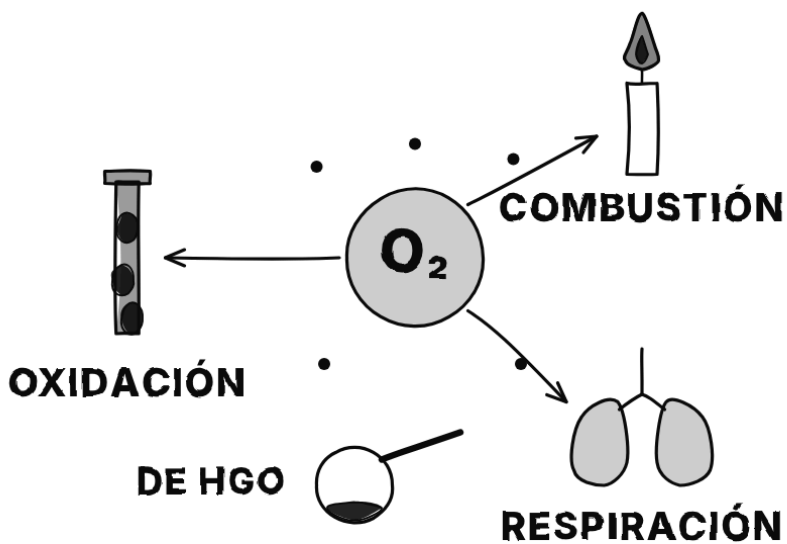
que sale sube a ella y empuja un poco de agua hacia abajo. Al calentar la retorta, primero sale aire corriente, que se dilata con el calor, y luego un gas nuevo. Cierre la probeta bajo el agua, sáquela, póngala boca arriba y baje en ella una astilla incandescente, una que solo esté brillando sin llama. En el aire una astilla así se apaga sin ruido; en este gas estalla en una llama brillante. Es el oxígeno, y la astilla que se aviva sigue siendo la forma en que los químicos lo reconocen. Al mismo tiempo aparecen gotas brillantes de mercurio metálico en las partes frías de la retorta y en la bolita, como un espejo de plata. Así que un polvo rojo dio dos cuerpos nuevos, mercurio y oxígeno: una descomposición.



$$216,6 = 200,6 + 16$$

Pongámoslo en la balanza con cifras modernas, como cálculo en voz alta. En la notación actual la reacción es $2\text{HgO} \rightarrow 2\text{Hg} + \text{O}_2$. En palabras: el óxido rojo de mercurio se rompe en mercurio y gas oxígeno. Medido en gramos, unos 216,6 gramos de óxido rojo de mercurio dan unos 200,6 gramos de mercurio y 16 gramos de oxígeno. Compruebe las cuentas: $200,6 + 16 = 216,6$. Nada apareció y nada desapareció; el oxígeno simplemente se fue adonde el ojo no podía seguirlo.

¿Por qué fue tan importante este experimento? Antes de Lavoisier ya se sabían recoger y estudiar gases, pero él fue el primero en mostrar qué papel tenían en reacciones que se habían entendido mal o que solo se habían observado. El gas del óxido rojo de mercurio es el mismo oxígeno que hay en el aire. Es el gas que respiran los animales, el gas que alimenta la combustión y el gas que convierte los metales en óxidos y cascarillas, que los químicos de la época llamaban cales, sustancias terrosas como los minerales de los que salen los metales. Así, con un polvo rojo, una llama y una balanza, todo el cuadro de la oxidación, la combustión y la respiración se aclaró: cada una es una combinación con el oxígeno del aire.



Un gas detrás de tres cambios

Para recordar

La ley de conservación permite a un químico hallar un peso desconocido y le avisa enseguida si ha dejado una sustancia fuera de la cuenta. El hierro pesa más cuando se oxida o forma cascarilla, así que la cascarilla es hierro combinado con oxígeno, no hierro que ha perdido flogisto. El carbonato de cobre verde pesa menos al calentarse porque desprende gas de ácido carbónico invisible, y los dos productos juntos pesan lo mismo que el polvo. El óxido rojo de mercurio, al calentarse, da mercurio y oxígeno, un gas en el que una astilla incandescente estalla en llama. Ese oxígeno es la parte del aire que está detrás de la combustión, la respiración y la oxidación, y fue la balanza la que lo reveló.

Preguntas

1. Un químico suma los pesos antes y después de una reacción y las dos sumas no coinciden. ¿Qué le dice la ley de conservación?
 - a. Que esta reacción crea o destruye un poco de materia
 - b. Que una de las sustancias tomadas o producidas ha quedado fuera de la cuenta
 - c. Que la balanza debe de estar rota y el resultado puede ignorarse
 - d. Que la reacción fue una combinación y no una descomposición

2. ¿Por qué importa el experimento en el vacío, o en hidrógeno o nitrógeno, para entender el óxido y la cascarilla?
 - a. Porque allí el hierro se oxida más rápido, lo que muestra que el aire frena la oxidación
 - b. Porque muestra que el peso extra viene de la humedad del hierro
 - c. Porque sin el oxígeno del aire no se forma óxido ni cascarilla, así que el peso extra debe venir del oxígeno
3. El carbonato de cobre verde se convierte en óxido de cobre negro y pesa menos. ¿Qué clase de reacción es y cómo lo sabe?
 - a. Una descomposición, porque la pérdida de peso muestra que algo se ha ido
 - b. Una combinación, porque ha cambiado el color
 - c. Una sustitución, porque el cobre ha cambiado de pareja
 - d. Una combinación con oxígeno, como la cascarilla del hierro
4. Se baja una astilla incandescente en el gas recogido al calentar óxido rojo de mercurio. ¿Qué ocurre y qué le dice?
 - a. Se apaga, lo que muestra que el gas es gas de ácido carbónico
 - b. Brilla igual que en el aire, lo que muestra que el gas es solo aire dilatado
 - c. Se vuelve plateada, lo que muestra que hay vapor de mercurio
 - d. Estalla en una llama brillante, lo que muestra que el gas es oxígeno

Respuestas

1. **b)** La ecuación es una alarma: si olvida una de las sustancias, las sumas no cuadran y lo nota enseguida.
2. **c)** En el vacío o en gases sin oxígeno el hierro ni se oxida ni forma cascarilla, así que el aumento de peso viene del oxígeno del aire.
3. **a)** La ley de conservación le dice enseguida que si el producto pesa menos, algo se ha ido, así que es una descomposición; el gas que escapa puede atraparse en forma de burbujas.
4. **d)** En el aire una astilla así se apaga sin ruido; en este gas estalla en una llama brillante, y así se reconoce el oxígeno.

Ejemplos resueltos

Pesar un gas que nunca vio Un poco de carbonato de cobre verde que pesa 12,4 gramos se calienta hasta que todo se convierte en óxido de cobre negro, que pesa 8,0 gramos. El gas escapa sin que se vea. ¿Cuánto gas se desprendió?

Escriba la ley de conservación: el peso tomado es igual a la suma de los pesos producidos, $A = M + N$.

La sustancia tomada es el carbonato de cobre, $A = 12,4$ gramos.

Los productos son el óxido de cobre, $M = 8,0$ gramos, y el gas, N , que es desconocido.

Así que $12,4 = 8,0 + N$, y $N = 12,4 - 8,0 = 4,4$ gramos.

Respuesta: 4,4 gramos de gas

Ejercicios

1. Un clavo de hierro de 20 gramos se calienta mucho al aire hasta que queda en parte cubierto de cascarilla. Ahora pesa 21,5 gramos. ¿Cuánto aire se combinó con él, y qué parte del aire era?

Pista: El hierro y la parte del aire tomada deben pesar juntos lo mismo que el clavo con cascarilla.

Respuesta: 1,5 gramos, ya que $20 + x = 21,5$ da $x = 1,5$. Era oxígeno, la parte del aire que sirve para la combustión, porque sin oxígeno no se forma cascarilla.

2. Un partidario de la teoría del flogisto dice que cuando el hierro se convierte en cascarilla cede flogisto. Usando la balanza, explique por qué esta historia va al revés.

Pista: Si algo sale del hierro, ¿qué debería mostrar la balanza?

Respuesta: Si el hierro perdiera algo, la cascarilla pesaría menos que el hierro. La balanza muestra que pesa más, y sin oxígeno no se forma cascarilla. Así que algo se ha añadido: la cascarilla es hierro combinado con oxígeno, un cuerpo más complejo que el hierro, no más simple.

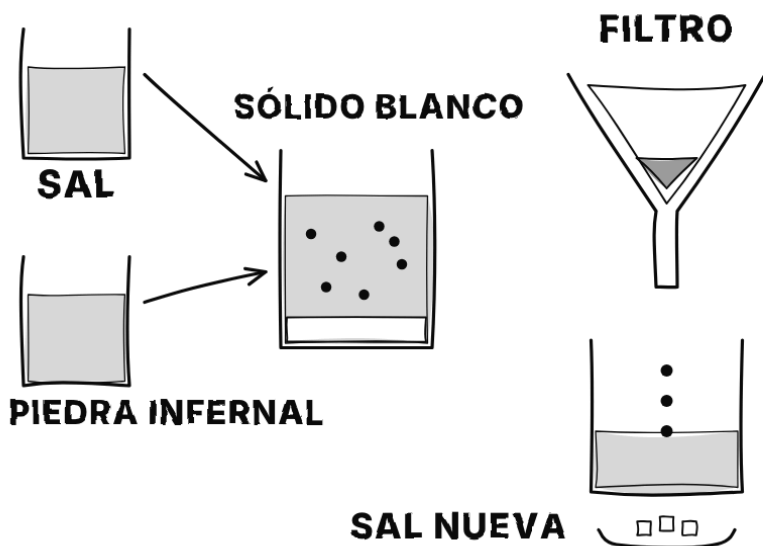
3. Se calienta óxido rojo de mercurio en una retorta cerrada cuyo tubo lleva al baño de agua, y se pesan tanto las gotas de mercurio como el gas recogido. ¿Cuánto deben sumar los dos pesos y por qué?

Pista: Cuente todo lo que entró en la retorta y todo lo que salió de ella.

Respuesta: Deben sumar el peso del óxido rojo de mercurio tomado. Un cuerpo se descompuso en dos, mercurio y oxígeno, y como nada se crea ni se pierde, los dos juntos deben pesar lo mismo que el polvo.

La sal, la plata y el error de los alquimistas

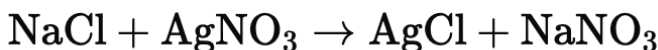
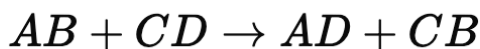
Tome dos vasos de agua que parecen exactamente iguales, perfectamente transparentes. En uno hay sal de mesa disuelta; en el otro, una sal de plata llamada piedra infernal, que los médicos usaban antes para quemar y limpiar heridas. Vierta un vaso en el otro. Al instante el líquido se vuelve blanco como la leche y pronto un polvo blanco se deposita en el fondo. Dos líquidos transparentes han hecho algo sólido, y la pregunta es qué ha pasado con el peso.



Dos líquidos transparentes, un sólido blanco

Mendeléiev lo usa como otro ejemplo más de la ley de conservación. Primero separa el polvo del líquido filtrando. Doble en cuatro un círculo de papel sin encolar, ábralo en forma de cono y colóquelo en un embudo de vidrio. Vierta el líquido lechoso: una disolución transparente pasa y el polvo blanco se queda en el papel. Es lo mismo que hace un filtro de café en su cocina, donde el líquido pasa y el poso se queda. Seque el polvo y verá que es una sustancia nueva, muy distinta de las dos del principio, porque no se disuelve en agua en absoluto. Ahora evapore el líquido transparente que pasó y aparece otra sustancia nueva, distinta de la sal de mesa y de la piedra infernal, aunque sí se disuelve en agua como ellas.

Así que entraron dos sustancias y salieron dos. Es la tercera clase de reacción de la primera parte, una sustitución o doble descomposición, en la que las partes cambian de pareja. Con letras, dos compuestos intercambian sus partes, $AB + CD \rightarrow AD + CB$: se cambian las dos parejas y salen dos sustancias nuevas. En la notación actual, con la sal de mesa como NaCl y la piedra infernal como AgNO_3 , la reacción dice $\text{NaCl} + \text{AgNO}_3 \rightarrow \text{AgCl} + \text{NaNO}_3$. En palabras: la plata deja a su pareja y se une al cloro de la sal, formando cloruro de plata, el polvo blanco; el sodio de la sal ocupa el lugar que dejó la plata, formando nitrato de sodio, que sigue disuelto. La intuición vuelve a ser el baile: los bailarines cambian de pareja, y una de las parejas nuevas no puede quedarse en el agua, así que se hunde. Y el agua solo sirvió para hacer líquidas y móviles las sustancias, para que sus partículas pudieran encontrarse tan de cerca como necesita una reacción.

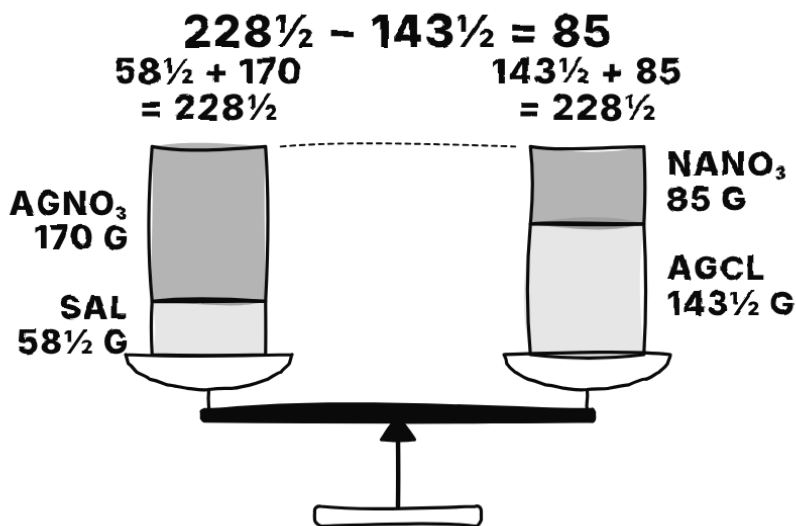


AgCl **SE HUNDE**

NaNO_3 **DISUELTA**

Cambian las dos parejas

Ahora la balanza. Mendeléiev da las cifras: unos $58\frac{1}{2}$ gramos de sal seca y 170 gramos de piedra infernal seca dan $143\frac{1}{2}$ gramos de cloruro de plata y 85 gramos de nitrato de sodio. Comprobémoslas en voz alta. A la izquierda, $58\frac{1}{2} + 170 = 228\frac{1}{2}$ gramos. A la derecha, $143\frac{1}{2} + 85 = 228\frac{1}{2}$ gramos. Las dos sumas coinciden, exactamente como exige la ley de conservación. Y fíjese en lo que eso le permite hacer. Si hubiera pesado el polvo del filtro pero derramado el líquido transparente, aún podría decir cuánto nitrato de sodio había en él: $228\frac{1}{2} - 143\frac{1}{2} = 85$ gramos. Un laboratorio de análisis de aguas sigue trabajando así: añade una sal de plata a una muestra, filtra el cloruro de plata blanco, lo seca y lo pesa para saber cuánta sal tenía el agua.

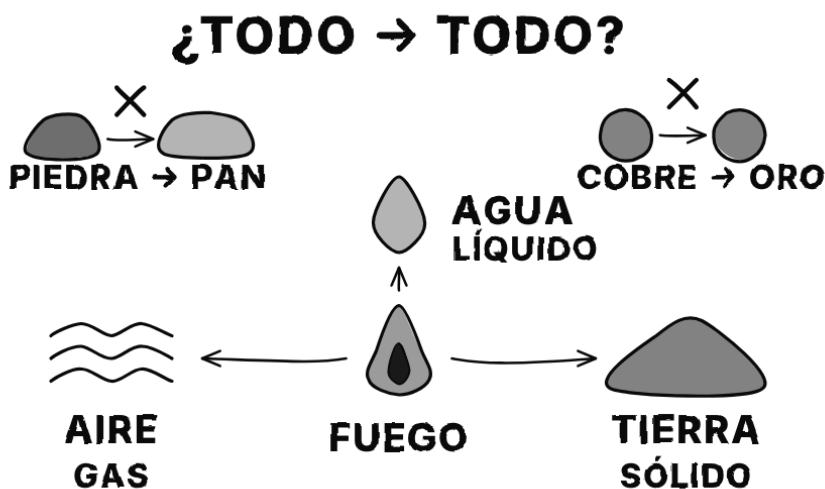


228½ en los dos lados

Pruébalo

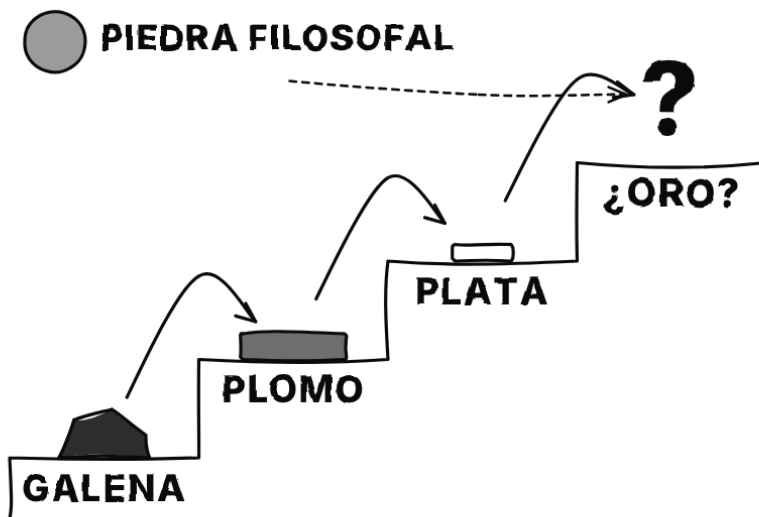
Disuelva una cucharadita de sal de Epsom en un vaso de agua tibia y una cucharadita de soda de lavar en otro, y remueva hasta que los dos queden transparentes. Vierta uno en el otro y observe: la mezcla se enturbia y un polvo blanco se deposita poco a poco. Pase la mezcla por un filtro de café; el líquido sale transparente y queda una pasta blanca en el papel. Igual que en el experimento de Mendeléiev, dos disoluciones transparentes han cambiado de pareja y han hecho una sustancia que no puede quedarse disuelta.

Aquí Mendeléiev pasa a una pregunta más profunda. La ley de conservación responde a la pregunta de la cantidad: la materia nunca se pierde ni se gana. Pero hay una segunda pregunta, que él llama la pregunta de la calidad, y es más difícil. ¿Hay un límite para aquello en lo que puede convertirse una sustancia? ¿Podría usted, con suficiente ingenio, convertir una libra de cualquier cosa en una libra de cualquier otra? Mirar alrededor no lo resuelve. Las plantas hacen sustancias infinitamente variadas a partir del aire y del suelo, y el hierro puede convertirse en tinta o en la pintura azul intenso llamada azul de Prusia, así que parece que los cambios no tienen fin. Pero la experiencia diaria dice que no se puede hacer comida de una piedra, ni oro de cobre. Solo el estudio puede decidirlo.



Primero la cantidad, luego la calidad

Durante mucho tiempo la respuesta más común fueron los cuatro elementos: aire, agua, tierra y fuego. La idea llegó de Asia a los griegos y la expuso con más detalle Empédocles, unos 460 años antes de Cristo. No fue fruto de experimentos cuidadosos; parece haber nacido de clasificar las cosas en gases como el aire, líquidos como el agua y sólidos como la tierra, y de ver que el fuego, es decir el calor, las cambia. Luego los sabios árabes empezaron a atacar la cuestión con experimentos y, a través de España, trajeron a Europa la pasión por estas investigaciones. Se consideraba una ciencia secreta y misteriosa, y se llamaba alquimia.

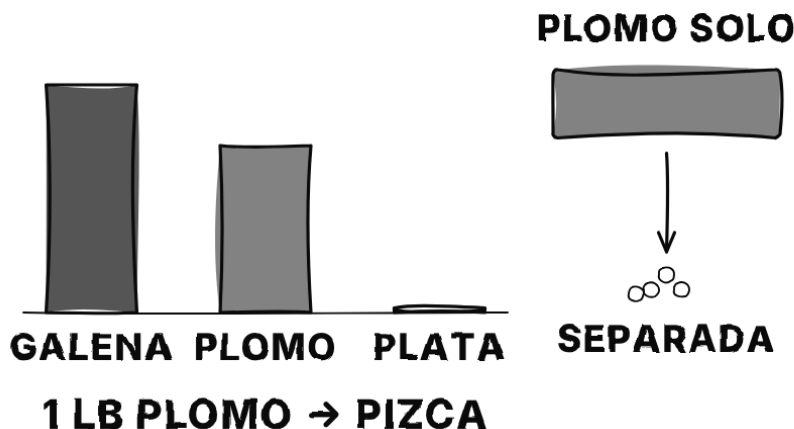


La escalera de los alquimistas

Los alquimistas creían que las transformaciones de la materia no tenían límite. Buscaban la piedra filosofal, que debía convertir

cualquier cosa en oro y diamantes e incluso rejuvenecer un cuerpo viejo. Mendeléiev es justo con ellos. Su gran mérito, dice, es que hicieron muchísimos experimentos y descubrieron muchas transformaciones nuevas, y su creencia no nació solo de la fantasía. Sus propios experimentos parecían apuntar en esa dirección. Tomaban galena, una piedra brillante de aspecto metálico, y obtenían plomo de ella: una piedra inútil se había convertido en un metal blando y útil. Luego tomaban ese plomo y obtenían plata de él, un metal aún más precioso. ¿Qué podía ser más natural que pensar que un paso más convertiría la plata en oro?

Su error fue que casi nunca pesaban. Los juicios de calidad, como más noble o más precioso, son subjetivos; las cantidades no. Si hubieran pesado, habrían visto que el plomo pesa mucho menos que la galena de la que salió, y que la plata es una cantidad diminuta comparada con el plomo usado. Si hubieran estudiado el proceso de cerca, habrían visto que el plomo no se convierte en plata en absoluto. El plomo natural simplemente contiene un poco de plata, y una vez extraída esa plata, ningún tratamiento posterior del plomo dará más. La plata estaba en el plomo desde el principio; no se hizo a partir de él. Mendeléiev añade que incluso en su época la mayor parte de la plata del mundo se extraía así del plomo natural.



La plata estaba dentro

Así que la balanza responde a los alquimistas tan claramente como respondió a los químicos del flogisto. Si el plomo se convirtiera de verdad en plata, una libra de plomo daría más o menos una libra de plata, como exige la ley de conservación; en cambio da una pizca diminuta, y luego nada más. Ese número pequeño es todo el argumento: lo que salió estaba escondido dentro desde el principio.

El veredicto de Mendeléiev sobre la alquimia es breve. El camino que tomaron los alquimistas nunca podía llevar a un éxito completo, porque no se hacían preguntas sencillas y claras que, una vez respondidas, les permitieran avanzar. Pedían todo a la vez, una piedra que diera oro y juventud, y así no encontraron ni una sola ley exacta. Y sin embargo dejaron a la química una rica herencia: un gran caudal

de hechos experimentales que químicos posteriores, haciendo preguntas más acotadas con una balanza en la mano, pudieron por fin ordenar.

Para recordar

Mezclar disoluciones de sal de mesa y piedra infernal da cloruro de plata insoluble, que se puede filtrar, y nitrato de sodio, que queda en disolución: una sustitución en la que dos dan dos. Las cifras de Mendeléiev, $58\frac{1}{2}$ y 170 gramos de entrada, $143\frac{1}{2}$ y 85 gramos de salida, suman ambas $228\frac{1}{2}$ gramos, tal como exige la ley de conservación. Además de la pregunta de la cantidad está la de la calidad: si una sustancia puede convertirse en cualquier otra. Los alquimistas creían que sí, porque obtenían plomo de la galena y plata del plomo, pero rara vez pesaban. Pesar muestra que la plata ya estaba en el plomo, y la lección es que el progreso viene de preguntas sencillas y claras y de la balanza.

Preguntas

1. Después de filtrar, el polvo blanco no se disuelve en agua. ¿Por qué eso muestra que es una sustancia nueva?
 - a. Porque la sal de mesa y la piedra infernal se disuelven en agua, así que una sustancia que no lo hace no puede ser ninguna de ellas
 - b. Porque todo polvo que se deposita es una sustancia nueva
 - c. Porque filtrar siempre cambia una sustancia

- d. Porque pesa más que el líquido
2. En el experimento de la sal y la piedra infernal, ¿qué papel tiene el agua?
- a. Reacciona con la sal para formar el polvo blanco
 - b. Forma parte del peso a ambos lados de la ecuación
 - c. Solo hace líquidas y móviles las sustancias, para que sus partículas puedan encontrarse
3. Los alquimistas obtenían plata del plomo. ¿Qué les habría mostrado pesar?
- a. Que el plomo gana peso al convertirse en plata
 - b. Que la plata es una cantidad diminuta comparada con el plomo usado, y no sale más una vez extraída
 - c. Que el plomo y la plata pesan exactamente lo mismo
 - d. Que la plata pesa más que la galena de la que salió
4. Según Mendeléiev, ¿por qué el camino de los alquimistas nunca podía llevar a un éxito completo?
- a. Porque no tenían hornos bastante calientes
 - b. Porque los cuatro elementos hacían imposibles sus experimentos
 - c. Porque mantenían en secreto su ciencia
 - d. Porque no se hacían preguntas sencillas y claras que, una vez respondidas, les permitieran avanzar

Respuestas

1. a) Las dos sustancias de partida se disuelven en agua; el polvo no, así que es muy distinto de las dos del principio.

2. c) El agua solo sirvió para hacer líquidas y móviles las sustancias, para que sus partículas pudieran encontrarse tan de cerca como necesita una reacción.

3. b) La plata es diminuta comparada con el plomo, y una vez extraída ningún tratamiento da más: la plata estaba en el plomo desde el principio.

4. d) Pedían todo a la vez en lugar de hacerse preguntas sencillas y claras, y así no encontraron ni una sola ley exacta.

Ejemplos resueltos

La sal y la piedra infernal en la balanza Unos $58\frac{1}{2}$ gramos de sal de mesa seca reaccionan con 170 gramos de piedra infernal seca y dan $143\frac{1}{2}$ gramos de cloruro de plata y 85 gramos de nitrato de sodio. Compruebe que se cumple la ley de conservación.

Escriba la ley: los pesos tomados son iguales a los pesos producidos, $A + B = M + N$.

Pesos tomados: $58\frac{1}{2} + 170 = 228\frac{1}{2}$ gramos.

Pesos producidos: $143\frac{1}{2} + 85 = 228\frac{1}{2}$ gramos.

El agua se deja fuera en los dos lados, porque solo hizo líquidas las sustancias; las dos sumas son iguales.

Respuesta: Los dos lados dan $228\frac{1}{2}$ gramos.

Ejercicios

1. En el mismo experimento pesó los $58\frac{1}{2}$ gramos de sal y los 170 gramos de piedra infernal, y encontró 85 gramos de nitrato de sodio tras evaporar a sequedad el líquido transparente, pero el papel con el polvo se rompió y se perdió. ¿Cuánto cloruro de plata se había formado?

Pista: Use $A + B = M + N$ con el cloruro de plata como incógnita.

Respuesta: $143\frac{1}{2}$ gramos. Las sustancias tomadas pesan $58\frac{1}{2} + 170 = 228\frac{1}{2}$ gramos, así que el cloruro de plata es $228\frac{1}{2} - 85 = 143\frac{1}{2}$ gramos.

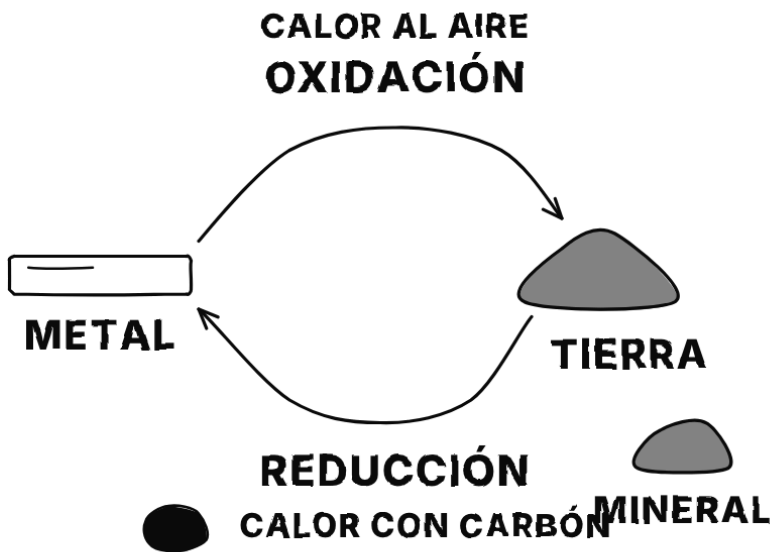
2. Explique con sus palabras la diferencia entre la pregunta de la cantidad y la pregunta de la calidad en química, y a cuál responde la ley de conservación.

Pista: Una pregunta cuánta materia hay; la otra, en qué puede convertirse.

Respuesta: La pregunta de la cantidad pregunta si la cantidad de materia cambia en una reacción; la ley de conservación la responde: la materia nunca se pierde ni se gana. La pregunta de la calidad pregunta si una sustancia puede convertirse en cualquier otra; es más difícil y la ley de conservación sola no la resuelve.

Doce días con mercurio

Imagine un recipiente de vidrio con mercurio brillante mantenido justo por debajo de la ebullición, día y noche, durante doce días. Poco a poco aparecen escamas rojas en su superficie y se extienden. Al final, el aire encerrado con el mercurio ha disminuido. Este experimento, hecho por Lavoisier en 1774, zanjó una disputa que había durado medio siglo, y es el corazón de esta parte.



Oxidación y reducción

La disputa trataba de dos transformaciones que los alquimistas habían usado una y otra vez. Caliente al aire un metal como el hierro,

el plomo o el estaño y se convierte en un polvo terroso: esto es la oxidación, lo mismo que oxidarse con herrumbre. Caliente ese polvo terroso con carbón y recupera el metal: esto es la reducción. Muchos minerales del suelo son precisamente metales oxidados así, y el estaño, el hierro y el cobre se obtienen de ellos calentándolos con carbón, como del óxido o la cascarilla. Toda acería sigue funcionando con esta segunda reacción, reduciendo mineral de hierro con carbono en un alto horno. Así que se conocían dos transformaciones, una en cada sentido, y explicarlas llevó, como dice Mendeléiev, a las leyes más importantes de la química.

La primera explicación vino de Becher y sobre todo de Stahl, médico del rey de Prusia, en un libro de 1723. En el cuadro de Stahl, todo cuerpo contiene flogisto, una sustancia ígnea sin peso, que él llamó «la materia o el principio del fuego, no el fuego mismo». Un cuerpo que arde u oxida con facilidad es rico en flogisto, y el carbón es muy rico en él. Cuando un metal se oxida, desprende su flogisto; cuando el carbón reduce el polvo terroso, le devuelve parte de su flogisto. Así que para Stahl el metal era el cuerpo complejo, tierra más flogisto, y el óxido terroso el más simple. La idea era muy sencilla, señala Mendeléiev, y en parte por eso ganó muchísimos seguidores.

STAHL

METAL
→
TIERRA
+ FLOGISTO



MÁS AIRE

?

LAVOISIER

METAL
+ PARTE DEL AIRE
→
TIERRA

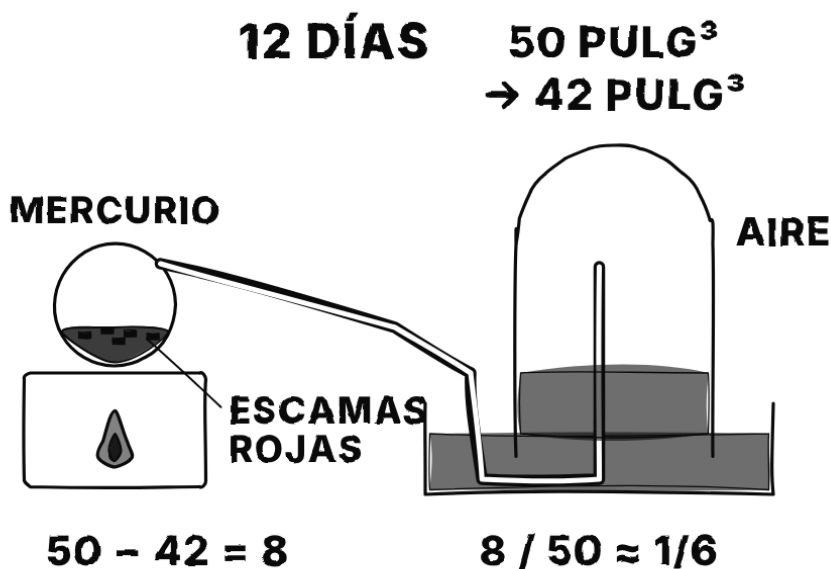


MENOS AIRE

Dos cuadros opuestos

Lavoisier respondió con la balanza. Toda oxidación, toda calcinación y toda combustión, mostró, viene con un aumento de peso a costa del aire. E hizo la suposición natural de que el cuerpo más pesado es el más complejo. Escribamos los dos cuadros uno junto al otro. Stahl: metal → tierra + flogisto. Lavoisier: metal + parte del aire → tierra. En palabras: para Stahl algo sale del metal; para Lavoisier algo se le une. Los dos cuadros predicen cosas opuestas sobre el aire que rodea el metal. Si el flogisto sale al aire, el aire debería aumentar o al menos no disminuir; si el metal toma parte del aire, el aire tiene que disminuir. Así que el experimento tenía que responder a una pregunta clara: ¿aumenta o disminuye el aire?

Imagine el aparato. Una retorta de vidrio, que Mendeléiev marca con la letra A, contiene 4 onzas de mercurio puro. Su largo cuello se curva y se sumerge en una cubeta de mercurio, marcada KS, y su extremo abierto O sube dentro de una campana de vidrio, FQ, que está en esa cubeta. Así queda encerrada una cantidad fija de aire: el aire de la parte alta de la retorta y bajo la campana, separado del resto del mundo por el mercurio. Antes de empezar, Lavoisier pesó todo el mercurio y midió el volumen de ese aire encerrado. No fue fácil. Tenía que conocer la capacidad de la retorta, el volumen de mercurio vertido, el volumen de la campana hasta la marca donde estaba el aire, y la temperatura y la presión en el momento de medir, porque un gas se dilata con el calor y se encoge con la presión. Luego calentó la retorta durante doce días, cerca del punto de ebullición del mercurio. Al mercurio le salieron escamas rojas: se estaba convirtiendo en óxido rojo de mercurio, el mismo polvo que da oxígeno cuando se calienta más fuerte, como vimos.

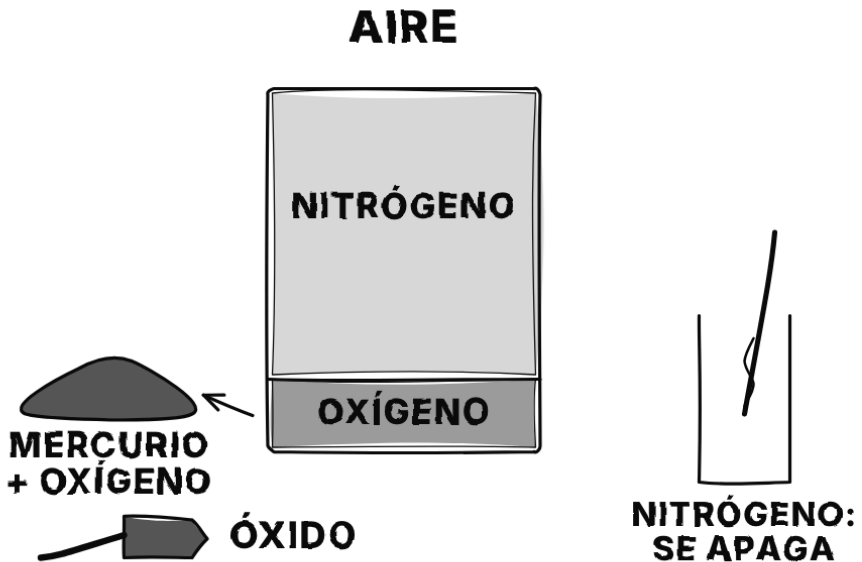


Cincuenta bajan a cuarenta y dos

Cuando el aparato se enfrió, el aire había disminuido. De 50 pulgadas cúbicas de aire, solo quedaban 42. Leamos esas cifras en voz alta. El aire perdió $50 - 42 = 8$ pulgadas cúbicas. Como parte del aire tomado, eso es $8/50 = 16/100$, más o menos una parte de cada seis. Las mediciones modernas sitúan el oxígeno del aire en cerca de una quinta parte; el mercurio de Lavoisier no lo tomó todo, pero lo que importaba era la dirección. El aire no aumentó, como exigiría el flogisto; disminuyó, y la teoría del químico alemán quedó refutada.

La balanza dijo el resto. El aire perdió exactamente tanto peso como ganó el mercurio. Así que ninguna parte del aire se destruyó: una parte simplemente se combinó con el mercurio. Esa parte puede volver a expulsarse del óxido rojo de mercurio con más calor, y es el

gas en el que una astilla incandescente estalla en llama: el oxígeno. La parte que quedó bajo la campana era muy distinta. No oxidaba los metales y no mantenía ni la combustión ni la respiración. Lavoisier escribió que una astilla encendida «se apaga en él como si la metieran en agua». A este gas lo llamamos nitrógeno.

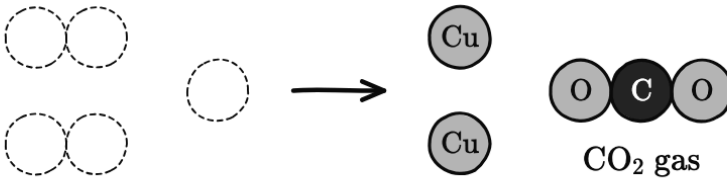
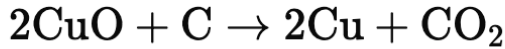


El aire es oxígeno y nitrógeno

Así que el aire no es un cuerpo simple, como se había creído durante dos mil años, sino una mezcla de dos gases, oxígeno y nitrógeno. Mezcle de nuevo el oxígeno con el nitrógeno y vuelve a obtener aire corriente. La combustión y la oxidación de los metales toman el oxígeno del aire. Y los polvos terrosos que da la oxidación son compuestos de un metal y oxígeno. Cuando ve las escamas pardas de

una vieja herramienta de jardín, está viendo hierro que ha tomado oxígeno del aire, exactamente como el mercurio de Lavoisier.

Un experimento más completó el cuadro, y también le dio la vuelta a la reducción. Cuando un óxido se calienta con carbón, el oxígeno del óxido pasa al carbón. Lo que sale es exactamente el mismo gas que da el carbón cuando arde en el aire. En la notación actual, para el óxido de cobre negro, la reacción es $2\text{CuO} + \text{C} \rightarrow 2\text{Cu} + \text{CO}_2$. En palabras: dos porciones de óxido de cobre ceden su oxígeno a una porción de carbono; el cobre queda desnudo y el carbono se va como gas de ácido carbónico. En el cuadro de Stahl el carbón daba algo a la tierra; en el de Lavoisier le quita algo, y la balanza da la razón a Lavoisier. Y así el gas de ácido carbónico es también un compuesto, de carbono y oxígeno, igual que los óxidos son compuestos de metales y oxígeno.



COBRE DESNUDO

✗ DA FLOGISTO

✓ TOMA OXÍGENO

El carbón toma el oxígeno

Pruébalo

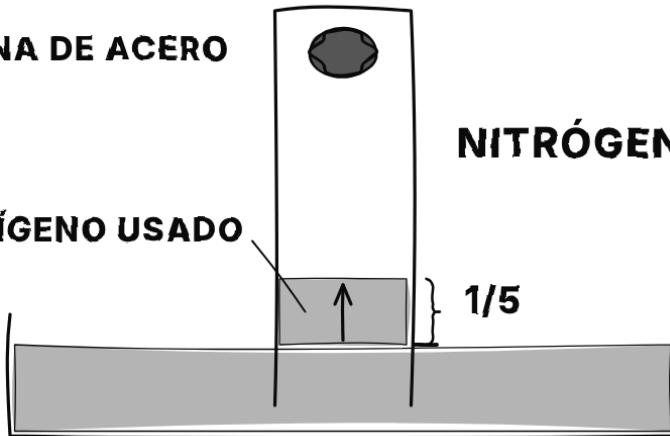
Moje el interior de un frasco de vidrio estrecho, meta un estropajo de lana de acero hasta el fondo para que se quede fijo y ponga el frasco boca abajo en un plato con agua. Marque con un rotulador el nivel del agua dentro del frasco. Déjelo dos o tres días. La lana de acero se oxida y el agua sube dentro del frasco, porque el hierro ha tomado el oxígeno del aire encerrado, igual que el mercurio de Lavoisier. El agua sube más o menos una quinta parte del espacio de aire, y lo que queda encima es sobre todo nitrógeno.

3 DÍAS

LANA DE ACERO

NITRÓGENO

OXÍGENO USADO



Lana de acero en un frasco boca abajo

Para recordar

La oxidación convierte un metal en un polvo terroso; la reducción con carbón convierte el polvo de nuevo en metal. Stahl explicaba ambas cosas con el flogisto que sale del metal y vuelve desde el carbón, así que para él el metal era el cuerpo complejo. El experimento de doce días de Lavoisier mostró que el mercurio calentado toma parte del aire encerrado: 50 pulgadas cúbicas bajaron a 42, y el aire perdió exactamente el peso que ganó el mercurio. El aire es una mezcla de oxígeno, que mantiene la combustión y se combina con los metales, y nitrógeno, que no mantiene ni la combustión ni la respiración. Los óxidos son compuestos de metales con oxígeno, y en la reducción el carbón toma ese oxígeno y se va como gas de ácido carbónico, a su vez un compuesto de carbono y oxígeno.

Preguntas

1. Stahl y Lavoisier hicieron predicciones opuestas sobre el aire encerrado con mercurio caliente. ¿Qué predijo cada uno?
 - a. Stahl: el aire no debería disminuir, porque el flogisto pasa a él; Lavoisier: el aire tiene que disminuir, porque el mercurio toma parte de él
 - b. Stahl: el aire tiene que disminuir; Lavoisier: el aire debería aumentar
 - c. Los dos predijeron que el aire seguiría igual

- d. Stahl: el mercurio debería pesar más; Lavoisier: el mercurio debería pesar menos
2. ¿Por qué Lavoisier necesitaba conocer la temperatura y la presión al medir el aire encerrado?
- a. Porque el mercurio solo hierve a una presión
 - b. Porque un gas se dilata con el calor y se encoge con la presión, así que de otro modo no se podían comparar los volúmenes
 - c. Porque la campana podía romperse si se calentaba demasiado
3. El aire perdió exactamente tanto peso como ganó el mercurio. ¿Qué se deduce?
- a. Que el calor destruyó parte del aire
 - b. Que el flogisto tiene peso negativo
 - c. Que una parte del aire se combinó con el mercurio y nada se destruyó
 - d. Que el mercurio se convirtió en parte en aire
4. Cuando el óxido de cobre negro se calienta con carbón, vuelve el metal. ¿Qué le pasa al oxígeno en el cuadro de Lavoisier?
- a. Se queda en el cobre como flogisto
 - b. Se destruye con el calor
 - c. Pasa al aire como nitrógeno
 - d. Pasa al carbón, que se va como gas de ácido carbónico

Respuestas

1. **a)** Si el flogisto sale al aire, el aire debería aumentar o al menos no disminuir; si el metal toma parte del aire, el aire tiene que disminuir.
2. **b)** Tenía que conocer la temperatura y la presión en el momento de medir, porque un gas se dilata con el calor y se encoge con la presión.
3. **c)** Ninguna parte del aire se destruyó: una parte simplemente se combinó con el mercurio.
4. **d)** El oxígeno del óxido pasa al carbón, y lo que sale es el mismo gas que da el carbón cuando arde en el aire.

Ejemplos resueltos

Cuánto aire tomó el mercurio Lavoisier encerró 50 pulgadas cúbicas de aire con el mercurio; tras doce días de calor solo quedaban 42 pulgadas cúbicas. ¿Cuánto aire se combinó con el mercurio y qué parte del aire era?

El aire que se combinó es el que falta: $50 - 42 = 8$ pulgadas cúbicas.

Su parte del aire tomado es $8/50$.

Multiplique arriba y abajo por 2: $8/50 = 16/100$, o sea 16 partes de cada cien.

Es más o menos una parte de cada seis; el aire disminuyó, como predice el cuadro de Lavoisier y no el de Stahl.

Respuesta: 8 pulgadas cúbicas, 16 partes de cada cien del aire

Ejercicios

1. Suponga que se hiciera el mismo experimento con 100 pulgadas cúbicas de aire, y que el mercurio tomara la misma parte que en el de Lavoisier. ¿Cuánto aire quedaría?

Pista: Primero halle la parte tomada, 8 de cada 50, y aplíquela a 100.

Respuesta: 84 pulgadas cúbicas. La parte tomada es $8/50 = 16/100$, así que 16 pulgadas cúbicas se combinan con el mercurio y quedan $100 - 16 = 84$.

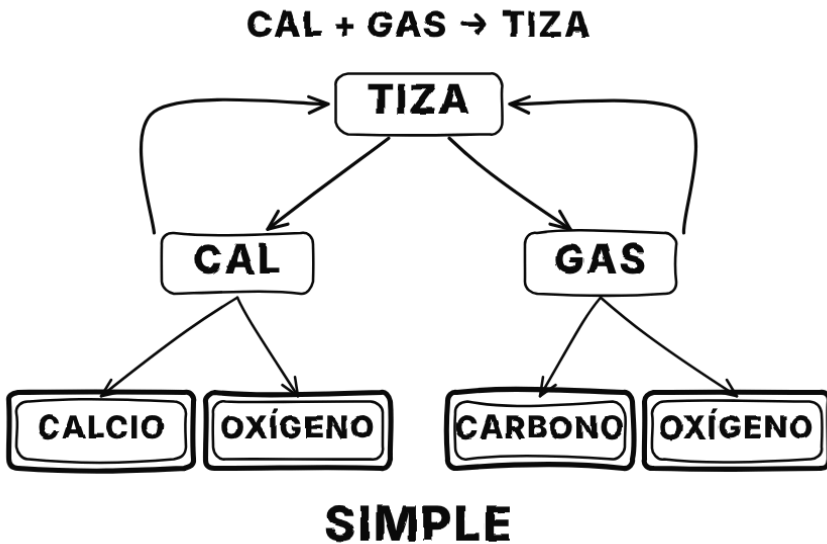
2. Un seguidor de Stahl dice que el carbón reduce un óxido dándole flogisto. Usando lo que le pasa al oxígeno y al gas desprendido, explique la respuesta de Lavoisier.

Pista: Pregúntese qué sale del óxido y adónde va.

Respuesta: En la reducción el carbón no le da nada al óxido; le quita el oxígeno. El oxígeno pasa al carbón, que se va como gas de ácido carbónico, el mismo gas que da el carbón al arder en el aire, así que ese gas es un compuesto de carbono y oxígeno y el óxido era un compuesto del metal y oxígeno.

Los cuerpos simples y las letras de la química

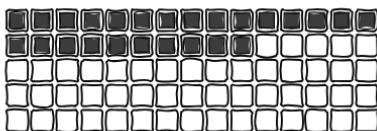
Ponga un trozo de tiza en un fuego vivo y desprende un gas y deja cal blanca. Ahora deje esa cal en el mismo gas, con un poco de agua, a temperatura ambiente, y poco a poco vuelve a convertirse en algo parecido a la tiza. Así que la tiza se puede desarmar y volver a armar: es un compuesto. El mortero blanco de cal entre ladrillos viejos se endurece exactamente así, tomando ese gas del aire durante meses. Pero ¿son sus dos partes, la cal y el gas, el final del camino?



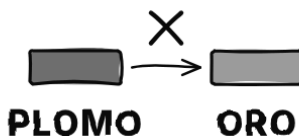
Hasta los cuerpos simples

No, dice Mendeléiev. El gas, el gas de ácido carbónico, es carbono combinado con oxígeno, como vimos en la parte anterior. Y la cal es el óxido de un metal llamado calcio. Siga separando sustancias en sus partes así y al fin llegará a unas que ningún medio posible puede dividir en dos o más, y que no se pueden formar a partir de nada más. Esas sustancias solo pueden combinarse con otras o actuar sobre ellas. Se llaman cuerpos simples, o sustancias simples, y toda sustancia homogénea es simple o compuesta. Esta división viene de Lavoisier.

Los cuerpos simples son pocos comparados con los compuestos que forman. En tiempos de Mendeléiev se conocían con seguridad unos setenta y cinco, y de ellos no más de veinticinco aparecen en los compuestos de la vida diaria. Y los cuerpos simples no se convierten unos en otros. Nunca se había visto un solo caso, pese a esfuerzos enormes, así que un metal no se puede convertir en otro, y nadie había encontrado el menor indicio de que el oxígeno, el hierro o el azufre fueran en realidad compuestos. Esta es la respuesta a los alquimistas, ahora en su forma exacta.

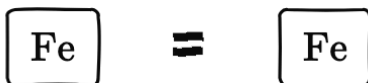


**75 SIMPLES
25 COMUNES**



$$A + B + \dots = M + N + \dots$$

PARA CADA CUERPO SIMPLE



Pocos, fijos y conservados

Júntelo con la ley de conservación y se deduce algo más fuerte. Un cuerpo simple no puede descomponerse, y la materia nunca se pierde ni se crea; por tanto, la cantidad de cada cuerpo simple sigue siendo la misma en todo cambio químico. La vieja ecuación, $A + B + \dots = M + N + \dots$, vale ahora no solo para el peso total sino para cada cuerpo simple por separado. En palabras: todo el hierro que entra en una reacción sale como hierro, combinado con algo nuevo, y todo el oxígeno que entra sale como oxígeno. La química, dice Mendeléiev, se reduce a estudiar con qué está unido cada cuerpo simple, y cómo, antes y después de un cambio.

Para escribir esas ecuaciones, los químicos acordaron usar letras. Cada cuerpo simple recibe una o dos primeras letras de su nombre

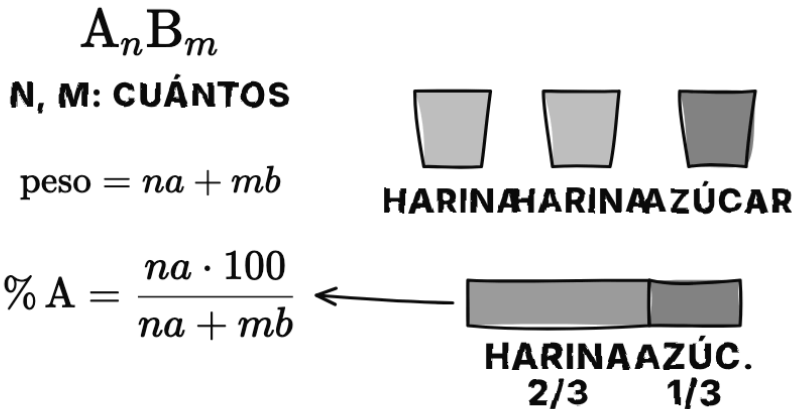
latino. El oxígeno, Oxygenium, es O; el nitrógeno, Nitrogenium, es N; el mercurio, Hydrargyrum, es Hg; el hierro, Ferrum, es Fe. Un compuesto se escribe poniendo juntas las letras de sus cuerpos simples, así que el óxido rojo de mercurio es HgO: mercurio y oxígeno. Pero las letras dicen más que nombres. Cada letra representa también un peso fijo, que Mendeléiev llama la proporción, o el peso del átomo. Así que una fórmula dice no solo de qué está hecho un compuesto sino cuánto de cada cosa, y en toda ecuación hecha con fórmulas el peso de cada cuerpo simple debe ser el mismo en los dos lados.

O	OXYGENIUM		
N	NITROGENIUM		
Hg	HYDRARGYRUM		HgO
Fe	FERRUM		ÓXIDO ROJO
PESOS ATÓMICOS			

Letras para los cuerpos simples

Ahora la fórmula de la que trata de verdad esta parte. Un compuesto de dos cuerpos simples, A y B, se escribe A_nB_m , donde n y m dicen

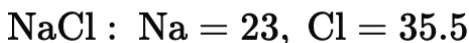
cuántas proporciones de cada uno entran en él. Llame a al peso atómico de A, y b al de B. Entonces una unidad del compuesto contiene na de A y mb de B, y pesa na + mb en total. Así que en cada cien partes del compuesto, la parte de A es $na \cdot 100 / (na + mb)$, y la de B es $mb \cdot 100 / (na + mb)$. En palabras: la parte de A dividida por el todo, por cien, es el porcentaje de A. La intuición es una receta. Si un bizcocho lleva 2 tazas de harina y 1 de azúcar, la harina son dos tazas de cada tres, sea cual sea el tamaño del bizcocho. Una fórmula es la receta de una sustancia, y los pesos atómicos convierten sus cuentas en pesos.



Una fórmula es una receta

El ejemplo del propio Mendeléiev es la sal común, NaCl, con sodio Na = 23 y cloro Cl = 35,5, y uno de cada, así que n y m valen 1. La unidad

entera pesa $23 + 35,5 = 58,5$. El sodio es $23 \cdot 100/58,5$, que es cerca del 39,3 por ciento. El cloro es $35,5 \cdot 100/58,5$, cerca del 60,7 por ciento. Y los dos suman cien, como deben.



$$23 + 35.5 = 58.5$$



Na 39.3 %

Cl 60.7 %



1000 G



393 G

607 G

$$393 + 607 = 1000$$

La sal: 39,3 y 60,7 por ciento

Aquí es donde la fórmula rinde, dice Mendeléiev: deme el peso real de un compuesto y la fórmula me dice el peso real de cada cuerpo simple que contiene. Tome un kilo de sal, 1000 gramos. El sodio es el 39,3 por ciento, así que unos 393 gramos; el cloro, los otros 607 gramos. El paquete de sal de su cocina, si pesa un kilo, contiene unos 393 gramos de un metal blando que ardería en el agua y unos 607 gramos de un gas verde venenoso, unidos en algo que usted echa a la comida. Esta última idea es el argumento de Mendeléiev sobre los cuerpos simples

hecho visible: el sodio y el cloro están en la sal, pero ni el metal ni el gas están ahí como tales.

Pruébalo

Tome una cucharadita de sal y pésela en una báscula de cocina; suponga que pesa 6 gramos. Con la parte del 39,3 por ciento, calcule cuánto es sodio: unos 2,4 gramos. Ahora lea la etiqueta nutricional de un paquete de comida salada, donde el sodio suele aparecer aparte de la sal. Multiplique la cifra de sodio por $100/39,3$, más o menos 2,5, y obtendrá la sal que le corresponde: la etiqueta está usando la fórmula de Mendeléiev.

Para recordar

Separar sustancias en sus partes termina en los cuerpos simples, que no se pueden descomponer ni formar a partir de nada más; todo lo demás es un compuesto. Los cuerpos simples no se convierten unos en otros, así que la cantidad de cada uno sigue igual en todo cambio químico. Cada cuerpo simple se escribe con letras de su nombre latino, y cada letra representa también un peso fijo, el peso de su átomo. Para un compuesto A_nB_m , el porcentaje de A es $n \cdot 100 / (n \cdot a + m \cdot b)$, como leer la parte de harina en una receta. La sal común, NaCl, con Na = 23 y Cl = 35,5, tiene un 39,3 por ciento de sodio y un 60,7 por ciento de cloro.

Preguntas

1. La tiza se puede separar en cal y gas de ácido carbónico y volver a formar a partir de ellos. ¿Por qué la cal y el gas no son aún cuerpos simples?
 - a. Porque ellos mismos se pueden descomponer: el gas en carbono y oxígeno, la cal en calcio y oxígeno
 - b. Porque solo se encuentran en la tiza
 - c. Porque toda sustancia hecha en el fuego es un compuesto
 - d. Porque no pueden combinarse con nada
2. ¿Por qué la cantidad de cada cuerpo simple sigue igual en todo cambio químico?
 - a. Porque los cuerpos simples son demasiado estables para reaccionar
 - b. Porque un cuerpo simple no se puede descomponer ni convertir en otro, y la materia nunca se pierde ni se crea
 - c. Porque la balanza pesa cada cuerpo simple por separado
 - d. Porque las fórmulas siempre se escriben con letras
3. Un compuesto tiene la fórmula A_nB_m . Si duplica n y m , ¿qué le pasa al porcentaje de A?
 - a. Se duplica
 - b. Se reduce a la mitad
 - c. Sigue igual, porque se duplican tanto la parte de A como el todo
 - d. Pasa a ser el cien por ciento

4. ¿Qué puede calcular con una fórmula si conoce el peso real de un compuesto?
- a. Su temperatura de descomposición
 - b. Su color y su sabor
 - c. El número de cuerpos simples conocidos
 - d. El peso real de cada cuerpo simple que contiene

Respuestas

1. **a)** El gas de ácido carbónico es carbono combinado con oxígeno, y la cal es el óxido del metal calcio, así que los dos son compuestos.
2. **b)** Un cuerpo simple no puede descomponerse, y la materia nunca se pierde ni se crea; por tanto, la cantidad de cada cuerpo simple sigue igual.
3. **c)** La parte de A es la parte de A dividida por el todo, por cien; duplicarlo todo deja la parte igual, como en una receta.
4. **d)** Dé el peso real de un compuesto y la fórmula le dice el peso real de cada cuerpo simple que contiene.

Ejemplos resueltos

Porcentajes en la sal común La sal común es NaCl, con Na = 23 y Cl = 35,5. Halle el porcentaje de sodio y de cloro, y el peso del sodio en 200 gramos de sal.

Aquí $n = m = 1$, así que una unidad de sal pesa $na + mb = 23 + 35,5 = 58,5$.

Sodio: $na \cdot 100 / (na + mb) = 23 \times 100 / 58,5$, cerca del 39,3 por ciento.

Cloro: $35,5 \times 100 / 58,5$, cerca del 60,7 por ciento; los dos suman 100.

En 200 gramos de sal, el sodio es el 39,3 por ciento de 200, unos 78,6 gramos.

Respuesta: 39,3 por ciento de sodio, 60,7 por ciento de cloro; unos 78,6 gramos de sodio en 200 gramos de sal

Ejercicios

1. ¿Cuántos gramos de cloro hay en 50 gramos de sal común, NaCl, con Na = 23 y Cl = 35,5?

Pista: Halle primero la parte del cloro, $35,5/58,5$.

Respuesta: Unos 30,3 gramos. El cloro es $35,5/58,5$, cerca del 60,7 por ciento de la sal, y el 60,7 por ciento de 50 gramos son unos 30,3 gramos.

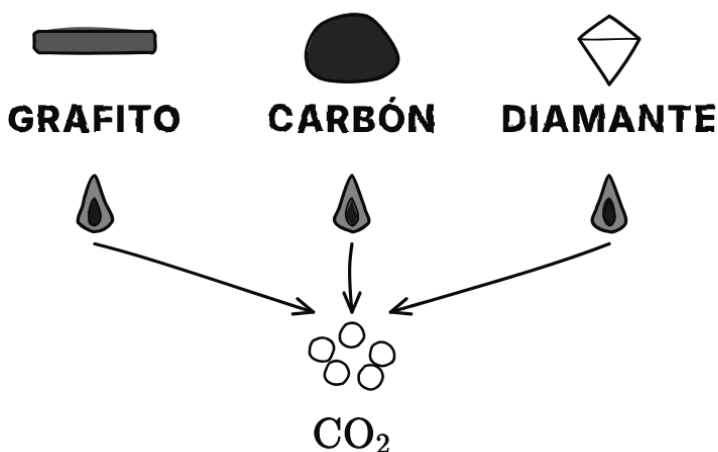
2. Un compuesto AB₂ contiene una proporción de A de peso a = 12 y dos proporciones de B de peso b = 16. ¿Qué porcentaje de él es A?

Pista: Aquí n = 1 y m = 2; póngalos en $na \cdot 100 / (na + mb)$.

Respuesta: Cerca del 27,3 por ciento. El todo es $na + mb = 12 + 32 = 44$, así que A es $12 \times 100 / 44$, cerca del 27,3 por ciento, y B es el 72,7 por ciento restante.

Elementos, no ingredientes

La mina de un lápiz, un trozo de carbón para la barbacoa y un anillo con diamante se parecen tan poco como pueden parecerse tres cosas. Una es gris y resbaladiza, otro negro y quebradizo, otro transparente y más duro que cualquier otra cosa. Y sin embargo, queme cualquiera de ellos en oxígeno y cada uno da el mismo gas, gas de ácido carbónico, y nada más. El carbón de una parrilla de jardín y el diamante del escaparate de un joyero son, para un químico, el mismo elemento con dos ropas distintas. ¿Cómo pueden tres cuerpos simples distintos ser una misma cosa? Responder a eso es la tarea principal de esta parte.



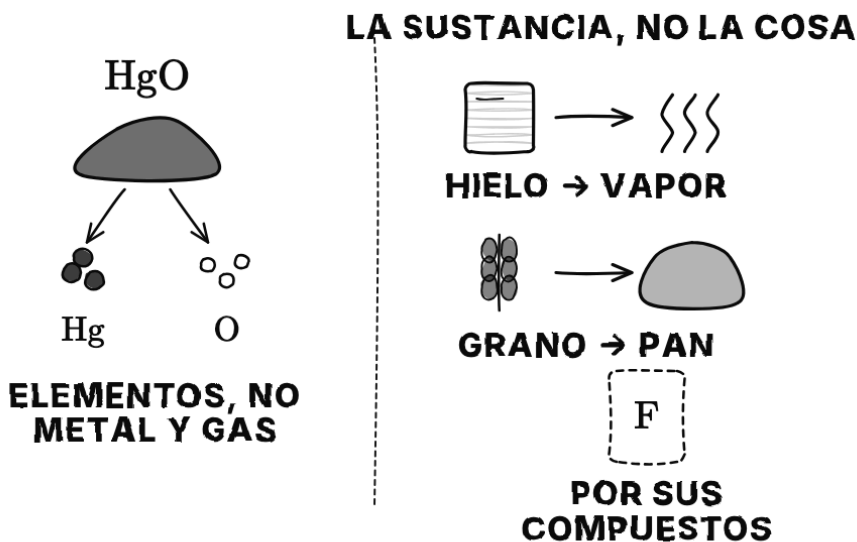
ENTRAN Y SALEN LOS MISMOS CUERPOS SIMPLES

Tres cuerpos, un gas

Primero, Mendeléiev saca la consecuencia de la parte anterior. Como los cuerpos simples nunca se convierten unos en otros, una sustancia solo puede convertirse en sustancias que contengan los mismos cuerpos simples. De la sal puede obtener compuestos de sodio y de cloro, pero nunca una onza de hierro; ese es el límite del cambio químico que los alquimistas nunca encontraron. Y aun dentro de este límite el número de compuestos posibles no tiene fin. Solo se había estudiado una pequeña parte, y cualquiera que se pusiera a trabajar podía hacer fácilmente una sustancia que nadie había hecho antes; muchas de esas sustancias, añade, la ciencia las predice antes de que nadie las haga. Así que el objetivo de la química no es enumerar compuestos uno por uno. Es captar la regularidad escondida en su multitud: las leyes que rigen cómo se forman y qué propiedades

tienen. En la práctica eso son cuatro tareas: hallar las propiedades de un compuesto a partir de la clase y la cantidad de sus cuerpos simples; estudiar los cuerpos simples mismos; hallar qué compuestos puede formar cada cuerpo simple, y con qué propiedades; y entender el lazo que mantiene unidos los cuerpos simples dentro de los compuestos.

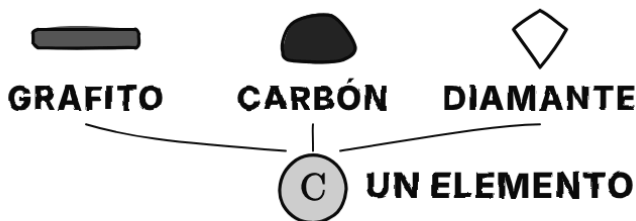
Ahora un punto sutil, y Mendeléiev lo trata con cuidado. Cuando decimos que el óxido rojo de mercurio contiene oxígeno, no queremos decir que dentro del polvo rojo haya una burbuja de gas oxígeno. Queremos decir algo sobre lo que el polvo puede hacer: que de él se pueden sacar mercurio y oxígeno, y que puede cedérselos a otros cuerpos. Su resumen merece guardarse: la composición de un compuesto es la expresión de las transformaciones de que es capaz.



Elementos, no ingredientes

Por eso separa dos ideas que el lenguaje corriente mezcla. Un cuerpo simple es una sustancia separada que se puede tener en la mano: mercurio líquido brillante, u oxígeno gaseoso en un frasco. Un elemento es la parte material que comparten el cuerpo simple y todos sus compuestos. El óxido rojo de mercurio no contiene dos cuerpos simples, un metal y un gas, sino dos elementos, mercurio y oxígeno. Mendeléiev da dos comparaciones. El vapor contiene la sustancia del hielo, pero no el hielo mismo; el pan contiene la sustancia del grano, pero no el grano.

Tres hechos muestran que la diferencia es real. El primero es el flúor. Durante mucho tiempo nadie había obtenido flúor por sí solo, y aun así los químicos tenían que contarlos como elementos, porque sus compuestos se conocían y se comportaban de forma distinta a todos los compuestos parecidos. Un elemento puede conocerse por sus compuestos antes de que nadie vea su cuerpo simple. El segundo es que los compuestos pueden combinarse a su vez en compuestos aún más complejos, y luego recuperarse de ellos por los mismos medios con que se liberan los cuerpos simples de los suyos, así que salir de un compuesto no hace por sí solo que algo sea simple. El tercero son el lápiz, el carbón y el diamante. Son tres cuerpos simples distintos, que Mendeléiev llama modificaciones, pero su elemento es uno, el carbono. Y el gas de ácido carbónico también contiene carbono, aunque no tiene ni carbón, ni grafito, ni diamante.



$\text{CO}_2 : \text{C} = 12, \text{O} = 16$

$$12 + 2 \times 16 = 44$$



C 27.3 %

O 72.7 %

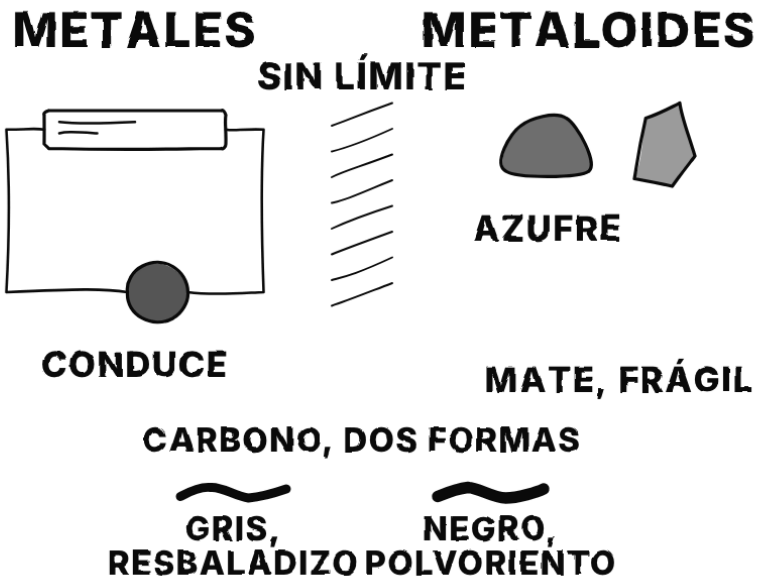
12 G DE CARBONO → 44 G DE GAS

El carbono es el 27,3 por ciento

Aquí la fórmula de la parte anterior nos deja verlo como un cálculo. En la notación actual el gas de ácido carbónico es CO_2 , con carbono C = 12 y oxígeno O = 16. Una unidad pesa $12 + 2 \times 16 = 44$. Así que el carbono es $12 \cdot 100/44$, cerca del 27,3 por ciento del gas. En palabras: queme 12 gramos de grafito, de carbón o de diamante, y obtendrá 44 gramos del mismo gas, y 12 gramos de él son carbono. Los cuerpos simples difieren; el elemento, y su peso en el compuesto, no.

Mendeléiev señala luego una agrupación más laxa. Muchos cuerpos simples, aunque no todos, tienen brillo metálico, son opacos, se pueden forjar y conducen bien el calor y la electricidad; son los metales, y sus mezclas entre sí son aleaciones. Los demás se llaman metaloides. En los casos claros es fácil distinguir las dos clases, pero

en muchos casos la línea se difumina, así que esta división no puede ser una base exacta para clasificar los cuerpos simples.



Metales y metaloides

Pruébalo

Sujete con unas pinzas un trocito de mina de lápiz en la llama de un quemador de gas o de una vela. Se pone incandescente, pero arde muy despacio y casi no deja nada. Frote un poco de la misma mina sobre un papel y deja un trazo gris y resbaladizo, muy distinto del carbón, que deja uno negro y polvoriento. Los dos se ven y se comportan de forma distinta, y sin embargo los dos son carbono: con suficiente calor y oxígeno, ambos desaparecen en el mismo gas invisible.

Por último, Mendeléiev explica por qué da una lista de los cuerpos simples justo al principio de su libro. La idea de elementos y cuerpos simples es el fundamento de la química, y la lista muestra lo que se sabía en ese momento. Se reconocían unos ochenta cuerpos simples, pero unos seis eran tan raros y se habían obtenido en cantidades tan diminutas que se sabía poco de ellos. Los cuerpos corrientes de la naturaleza están hechos de solo unos pocos cuerpos simples, y esos son los mejor conocidos, sencillamente porque mucha gente ha podido experimentar con ellos. ¿Cuáles son? Esa lista es donde empieza la próxima parte.

Para recordar

Una sustancia solo puede convertirse en sustancias que contengan los mismos cuerpos simples, pero los compuestos posibles no tienen fin, así que la química busca las leyes que hay detrás. La composición de un compuesto expresa en qué puede convertirse, no piezas ya hechas que estén dentro. Un cuerpo simple es una sustancia separada; un elemento es la parte material que comparten ese cuerpo simple y todos sus compuestos. El carbón, el grafito y el diamante son tres cuerpos simples pero un solo elemento, el carbono, que es cerca del 27,3 por ciento del gas de ácido carbónico. Metales y metaloides son una división útil pero difusa, y de unos ochenta cuerpos simples los más conocidos son los corrientes.

Preguntas

1. ¿Por qué ningún trabajo químico puede convertir la sal común en hierro?
 - a. Porque una sustancia solo puede convertirse en sustancias que contengan los mismos cuerpos simples
 - b. Porque la sal se disuelve en agua y el hierro no
 - c. Porque el hierro pesa más que la sal
 - d. Porque la sal es un cuerpo simple
2. ¿Qué queremos decir de verdad cuando decimos que el óxido rojo de mercurio contiene oxígeno?

- a. Que hay gas oxígeno atrapado dentro del polvo
 - b. Que de él se pueden obtener mercurio y oxígeno y que puede cederlos a otros cuerpos
 - c. Que huele a oxígeno al calentarlo
 - d. Que pesa lo mismo que el oxígeno
3. ¿Cómo podía contarse el flúor como elemento antes de que nadie lo obtuviera por sí solo?
- a. Porque lo predecía la teoría de los cuatro elementos
 - b. Porque se encuentra libre en el aire
 - c. Porque sus compuestos se conocían y se diferenciaban de todos los compuestos parecidos
4. ¿Por qué la división en metales y metaloides no puede servir como clasificación exacta de los cuerpos simples?
- a. Porque los metales no se pueden obtener puros
 - b. Porque los metaloides conducen la electricidad mejor que los metales
 - c. Porque todos los cuerpos simples son en realidad metales
 - d. Porque en muchos casos la línea entre las dos clases se difumina

Respuestas

1. **a)** Como los cuerpos simples nunca se convierten unos en otros, una sustancia solo puede convertirse en sustancias que contengan los mismos cuerpos simples.
2. **b)** Queremos decir algo sobre lo que el polvo puede hacer; la composición de un compuesto es la expresión de las transformaciones de que es capaz.

3. c) Un elemento puede conocerse por sus compuestos antes de que nadie vea su cuerpo simple.

4. d) En los casos claros es fácil distinguir las dos clases, pero en muchos casos la línea se difumina.

Ejercicios

1. Explique con sus palabras la diferencia entre un cuerpo simple y un elemento, usando como ejemplo el óxido rojo de mercurio.

Pista: Pregúntese qué podría meter en un frasco y qué tienen en común el óxido y sus productos.

Respuesta: Un cuerpo simple es una sustancia separada, como el mercurio líquido o el gas oxígeno en un frasco. Un elemento es la parte material que comparten ese cuerpo simple y todos sus compuestos. El óxido rojo de mercurio no contiene el metal y el gas, sino los elementos mercurio y oxígeno, igual que el vapor contiene la sustancia del hielo pero no el hielo mismo.

2. El carbón, el grafito y el diamante son cuerpos simples distintos. Explique por qué los químicos dicen aun así que tienen un solo elemento, y qué tiene que ver con ello el gas de ácido carbónico.

Pista: Piense en lo que tienen en común los tres entre sí y con el gas.

Respuesta: Son modificaciones distintas, pero comparten un elemento, el carbono, que no está sujeto a cambio. El mismo carbono está en el gas de ácido carbónico, y sin embargo el gas no contiene carbón, grafito ni diamante: lo que hay es el elemento, no ninguno de sus cuerpos simples.

3. Si los cuerpos simples nunca se convierten unos en otros, ¿por qué se dice que el número de compuestos posibles sigue sin tener fin, y cuál es entonces el objetivo de la química?

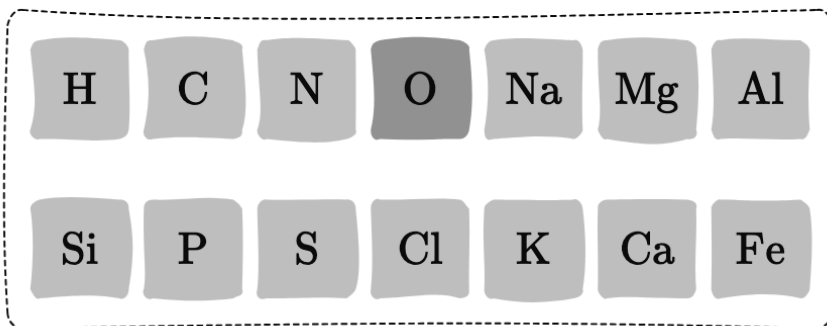
Pista: Piense de cuántas maneras puede combinarse un número pequeño de cuerpos simples.

Respuesta: Incluso un conjunto limitado de cuerpos simples puede combinarse de infinitas maneras y en infinitas proporciones, así que siempre se pueden hacer compuestos nuevos, y muchos se predicen antes de hacerse. Por eso el objetivo de la química no es enumerarlos sino hallar las regularidades, las leyes que rigen cómo se forman los compuestos y qué propiedades tienen.

Lista de los elementos y la fuerza que los une

Mire una cocina e intente nombrar los cuerpos simples que se esconden en ella. El agua del hervidor es hidrógeno y oxígeno. La sal es sodio y cloro. El acero de los cuchillos es sobre todo hierro, el azúcar es carbono, hidrógeno y oxígeno, y el vidrio de las ventanas es sobre todo silicio y oxígeno. Una sola cocina, en otras palabras, ya contiene la mayoría de los cuerpos simples que importan en la vida diaria. Mendeléiev dice lo mismo con una lista, y esta parte la recorre y luego pasa a la fuerza que mantiene unidos los elementos.

LOS CATORCE MÁS EXTENDIDOS



Los catorce más comunes

Clasifica los cuerpos simples en grupos. Primero vienen los catorce más extendidos en la naturaleza, cada uno escrito con su símbolo y con el lugar donde se encuentra. El hidrógeno, H, está en el agua y en los seres vivos. El carbono, C, está en los seres vivos, el carbón y la caliza. El nitrógeno, N, está en el aire y en los seres vivos. El oxígeno, O, está en el aire, en el agua y en la tierra, y su masa es la mayor de todas. Después el sodio, Na, en la sal común y en muchas piedras; el magnesio, Mg, en el agua de mar y en las piedras; el aluminio, Al, en las piedras y la arcilla; y el silicio, Si, en la arena, la arcilla y las piedras. El fósforo, P, está en los huesos, la ceniza de las plantas y el suelo; el azufre, S, en la piritita, el yeso y el agua de mar; el cloro, Cl, en la sal y el agua de mar. Y por último el potasio, K, en las piedras, la ceniza de las plantas y el salitre; el calcio, Ca, en la caliza, el yeso y los seres vivos; y el hierro, Fe, en el suelo, los minerales de hierro y los seres vivos.

Fíjese en los símbolos que no coinciden con los nombres en español. El sodio es Na del latín natrium, el potasio es K de kalium, y el hierro es Fe de ferrum: la regla de las partes anteriores, una o dos primeras letras del nombre latino. Fíjese también en lo pocos que son estos catorce. Casi todo lo que puede tocar, desde las rocas hasta su propio cuerpo, está hecho de esta lista corta.

Luego viene un grupo más largo: cuerpos simples que no son comunes en la naturaleza, pero que se usan en la vida diaria o en la industria. Aquí Mendeléiev da fórmulas, y vale la pena leerlas despacio, porque cada fórmula es una receta corta. El litio, Li, aparece en medicina como Li_2CO_3 : dos litios, un carbono y tres oxígenos. El flúor, F, aparece en el espato flúor, CaF_2 : un calcio por cada dos flúores. El bario, Ba, aparece en el espato pesado, BaSO_4 , un mineral blanco muy denso. El arsénico, As, aparece como arsénico blanco, el veneno

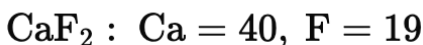
As₂O₃. El boro da el bórax y el ácido bórico; el cromo y el manganeso dan colores intensos y oxidantes fuertes, entre ellos el «camaleón», el permanganato morado que cambia de color al reaccionar. El cobalto colorea el vidrio de azul, el níquel se deposita sobre otros metales, el cinc se usa en chapas, pilas y latón, y el cobre es el conocido metal rojo. El bromo es un líquido pardo que se evapora con facilidad; el estroncio da el rojo de las bengalas; el cadmio da una pintura amarilla, CdS; el antimonio entra en la aleación de los tipos de imprenta; el yodo se usa en medicina y fotografía. La plata, el estaño, el platino, el oro, el mercurio y el plomo no necesitan presentación, y el bismuto se usa en medicina y en aleaciones que se funden con poco calor.

CADA FÓRMULA ES UNA RECETA



Las fórmulas como recetas

Leamos una de estas fórmulas con cifras, como enseñaron las partes anteriores. Tome el espato flúor, CaF_2 , con calcio $\text{Ca} = 40$ y flúor $\text{F} = 19$. Una unidad contiene un calcio y dos flúores, así que pesa $40 + 2 \times 19 = 78$. El calcio es $40 \cdot 100/78$, cerca del 51,3 por ciento; el flúor es el 48,7 por ciento restante. En palabras: un cristal de espato flúor de 100 gramos contiene unos 51 gramos de calcio y 49 de flúor, aunque nunca vería ninguno de los dos como tal. Un tubo de pasta de dientes con flúor remite al mismo elemento; el flúor está en ella como compuesto, nunca como el gas amarillento libre.



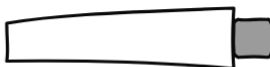
$$40 + 2 \times 19 = 78$$



Ca 51.3 %

F 48.7 %

$$100 \text{ G} \rightarrow 51 \text{ G} + 49 \text{ G}$$



FLÚOR: UN COMPUESTO

Espato flúor: 51,3 por ciento de calcio

Luego vienen dos grupos de elementos más raros. Catorce son bien conocidos y aparecen con bastante frecuencia en la naturaleza en pequeñas cantidades, pero tienen pocos usos: entre ellos el titanio, el

wolframio, el uranio y el torio. Dieciocho más son aún más raros y no tenían uso práctico en tiempos de Mendeléiev, aunque sus compuestos se habían estudiado con cierto cuidado: entre ellos el galio, el germanio y el escandio.



Los grupos más raros

Luego un grupo especial: los gases descubiertos por Ramsay, presentes en pequeñas cantidades en el aire, y distintos de todos los demás elementos en un rasgo llamativo. Nadie había conseguido aún formar un solo compuesto de ellos con ningún otro elemento. Son el helio, el neón, el argón, el criptón y el xenón. El neón de un viejo letrero de tienda y el argón dentro de muchas bombillas pertenecen a este grupo, elegidos precisamente porque casi no reaccionan con nada. Después, Mendeléiev menciona algunos motivos para contar

como elementos los metales actinio, polonio y radio, este descubierto por madame Curie, que aparecen en cantidades diminutas en compuestos de uranio y torio y se llaman radiactivos. Con eso su cuenta llega a setenta y siete, más unos pocos, como el gadolinio y el terbio, tan raros que sus propiedades apenas se conocían y de algunos ni siquiera era seguro que fueran elementos distintos.

Dos observaciones cierran el repaso. La primera asombra aún hoy. Estudiando la luz de estrellas lejanas y del sol, los químicos habían probado sin lugar a dudas que el hidrógeno, el sodio, el magnesio, el hierro y otros elementos comunes de la tierra también están allí. Así que los cuerpos simples que conocemos en la tierra no son un accidente local; la misma materia está repartida por el universo. La segunda es una confesión: por qué unos elementos son tan abundantes y otros tan raros, nadie lo sabía aún.

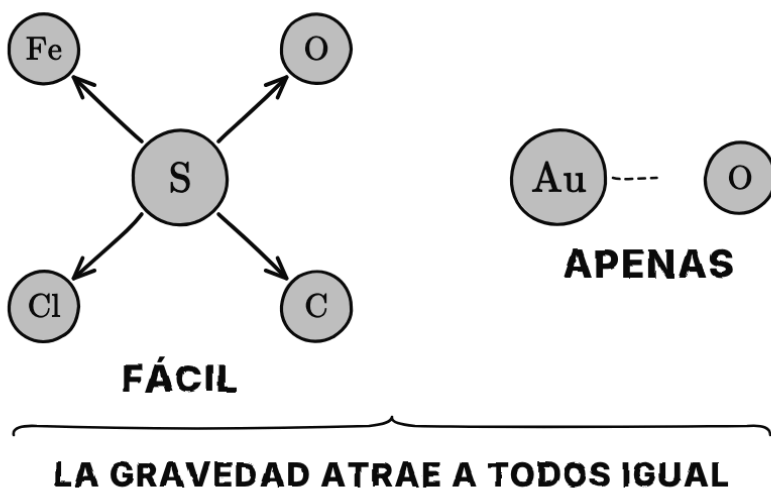
Pruébelo

Ponga una pizca de sal de mesa en la llama azul de un quemador de gas y verá que la llama destella en amarillo vivo. Ese amarillo es la luz del sodio. Descomponga la luz del sol con un prisma y, exactamente en ese tono de amarillo, hay una línea oscura, la marca del sodio en el sol. Esa coincidencia de luz es la manera en que los químicos probaron que hay sodio en el sol sin ir nunca allí.

Ahora Mendeléiev pasa de la lista a lo que hace que cada elemento sea lo que es. Cada elemento tiene su propia disposición a combinarse con otros, a formar compuestos más o menos estables y a pasar a otros aún más complejos; esa disposición es su carácter básico. El azufre se

combina con facilidad con los metales, con el oxígeno, con el cloro y con el carbono. La plata y el oro se combinan a disgusto, y muchos de sus compuestos son frágiles y se deshacen al calentarlos. La causa que impulsa a las sustancias a cambiar es la misma que luego mantiene unidos los elementos y da estabilidad a un compuesto. Los químicos la llaman afinidad, o afinidad química.

AFINIDAD

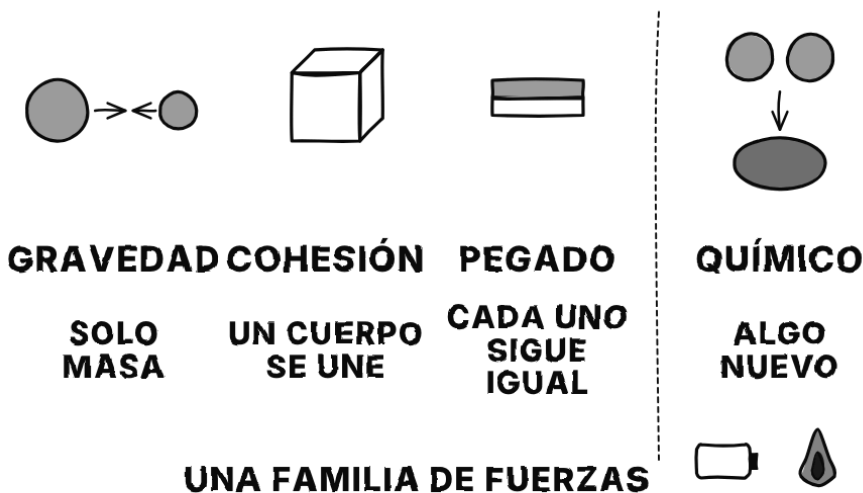


Unos se unen con facilidad, otros apenas

¿Cómo es la afinidad? Atrae, y solo atrae, así que a finales del siglo dieciocho y principios del diecinueve Bergman y Berthollet supusieron que podía ser simplemente la gravedad, actuando a distancias diminutas en lugar de grandes. Mendeléiev responde que no. La gravedad depende solo de las masas y las distancias, nunca de qué sustancia se trata; la afinidad depende muchísimo de qué

sustancias son. Un gramo de azufre y un gramo de oro atraen igual a un tercer cuerpo por gravedad, y sin embargo no podrían ser más distintos en sus ganas de combinarse.

La afinidad tampoco es lo mismo que la cohesión, la fuerza que mantiene unida una sustancia, da a un sólido su dureza, su forma cristalina y su elasticidad, y a un líquido sus gotas y su subida por tubos finos. La cohesión actúa entre partículas iguales, la afinidad entre partículas distintas, aunque las dos actúan solo al contacto y tienen mucho en común. Y la afinidad tampoco es la adherencia de cosas distintas: dos placas pulidas que quedan pegadas, el agua que moja el vidrio, un gas que se condensa en una superficie. En la adherencia no se forma nada nuevo; en un cambio químico una sustancia entra en la otra y aparece una nueva. Aun así, admite Mendeléiev, estas fuerzas de adherencia son una especie de puente entre lo mecánico y lo químico, porque también actúan solo en pleno contacto.



Ni gravedad, ni cohesión, ni adherencia

Durante buena parte del siglo diecinueve, los químicos identificaron las fuerzas químicas con las eléctricas. Hay un vínculo estrecho: las reacciones producen electricidad, y una corriente eléctrica puede descomponer compuestos. Pero el calor tiene exactamente el mismo tipo de vínculo: las reacciones producen calor, y el calor puede descomponer compuestos. Esos vínculos solo muestran que las fuerzas de la naturaleza son una familia, capaces de convertirse unas en otras, no que la fuerza química sea electricidad; y la teoría eléctrica fracasó cuando se puso a prueba.

¿Qué queda, entonces? El calor es el mejor entendido de todos los movimientos ocultos de la materia, porque se ha reducido a las ideas sencillas de la mecánica, energía, equilibrio y movimiento, que desde

Newton se pueden tratar con matemáticas exactas. Es natural, pues, intentar unir la química con el calor, sin afirmar que los cambios químicos no son más que calor. Mendeléiev hace una comparación con la astronomía. Nadie sabe qué es en realidad la gravedad, y aun así, aplicando la mecánica, los astrónomos predicen los planetas con gran detalle; del mismo modo, sin saber qué es en realidad la afinidad, los químicos pueden esperar grandes avances gracias a la teoría mecánica del calor. Este campo aún no está terminado, y se llama química teórica o física, aunque el nombre que prefiere Mendeléiev es mecánica química. Y como supone que ya conoce las sustancias, cómo cambian y lo que acompaña a sus cambios, solo puede venir después de las ideas básicas y de las sustancias mismas, que es lo que su libro se propone enseñar.

Para recordar

Catorce cuerpos simples, entre ellos el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el oxígeno, el silicio, el calcio y el hierro, forman casi toda la materia común de la naturaleza, con el oxígeno como el más abundante. Una fórmula como CaF_2 es una receta que, con los pesos atómicos, da la parte de cada elemento, aquí cerca del 51 por ciento de calcio. Siguen grupos más raros, entre ellos los gases de Ramsay, que no forman ningún compuesto, y los metales radiactivos; y la luz de las estrellas muestra que los mismos elementos existen en todo el universo. Cada elemento tiene su propia disposición a combinarse, y la fuerza que hay detrás, la afinidad química, depende de qué sustancias son, a diferencia de la gravedad, la cohesión o la electricidad. La naturaleza de la afinidad es desconocida, así que la mecánica química espera avanzar gracias a la teoría mecánica del calor, una vez conocidas las sustancias mismas.

Preguntas

1. ¿Por qué el potasio se escribe K y el hierro Fe?
 - a. Porque los símbolos vienen de las primeras letras de los nombres latinos, kalium y ferrum
 - b. Porque los nombres en español ya los usaban otros elementos
 - c. Porque esos símbolos se eligieron al azar
 - d. Porque son abreviaturas de nombres alemanes

2. ¿Qué distingue a los gases descubiertos por Ramsay de todos los demás elementos?
 - a. Son los elementos más pesados conocidos
 - b. Nadie había formado aún un solo compuesto de ellos con ningún otro elemento
 - c. Solo se encuentran en el sol
 - d. Son radiactivos
3. ¿Por qué la afinidad química no puede ser simplemente la gravedad actuando a distancias pequeñas?
 - a. Porque la gravedad empuja además de atraer
 - b. Porque la afinidad solo actúa en los líquidos
 - c. Porque la gravedad depende solo de la masa y la distancia, mientras que la afinidad depende mucho de qué sustancias son
4. ¿Por qué dice Mendeléiev que el vínculo de la química con la electricidad no prueba que las fuerzas químicas sean eléctricas?
 - a. Porque la electricidad no afecta a los compuestos
 - b. Porque las reacciones nunca producen electricidad
 - c. Porque la electricidad aún no se entendía en absoluto
 - d. Porque el calor tiene exactamente el mismo tipo de vínculo, lo que solo muestra que las fuerzas de la naturaleza se convierten unas en otras

Respuestas

1. a) Cada cuerpo simple recibe una o dos primeras letras de su nombre latino: el potasio es K de kalium y el hierro Fe de ferrum.

- 2. b)** Nadie había conseguido aún formar un solo compuesto de helio, neón, argón, criptón o xenón con ningún otro elemento.
- 3. c)** La gravedad depende solo de las masas y las distancias, nunca de qué sustancia se trata; la afinidad depende muchísimo de qué sustancias son.
- 4. d)** Las reacciones también producen calor y el calor puede descomponer compuestos; esos vínculos solo muestran que las fuerzas de la naturaleza son una familia, capaces de convertirse unas en otras.

Ejercicios

1. El azufre se combina con facilidad con los metales, el oxígeno, el cloro y el carbono; la plata y el oro se combinan a disgusto y sus compuestos se deshacen al calentarlos. Explique qué le dice esto sobre el carácter de un elemento, y qué nombre se da a la causa.

Pista: Piense en lo que hace la causa antes y después de que se forme un compuesto.

Respuesta: Cada elemento tiene su propia disposición a combinarse y a formar compuestos más o menos estables, y ese es su carácter básico. La causa que impulsa a las sustancias a cambiar es la misma que mantiene unidos los elementos en el compuesto y le da estabilidad; se llama afinidad química.

2. Explique en qué se diferencia la afinidad de la cohesión y de la adherencia de dos placas pulidas.

Pista: Pregúntese entre qué partículas actúa cada fuerza y si se forma algo nuevo.

Respuesta: La cohesión actúa entre partículas de una misma sustancia y la mantiene unida; la afinidad actúa entre sustancias distintas. La adherencia también actúa entre cuerpos distintos, pero no se forma nada nuevo; en un cambio químico una sustancia entra en la otra y aparece una sustancia nueva. Todas actúan solo al contacto.

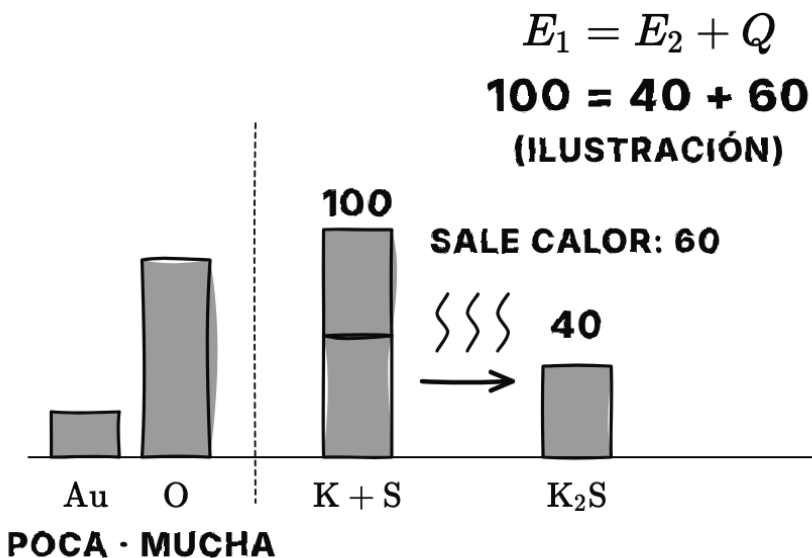
3. Mendeléiev compara la mecánica química con la astronomía. Explique la comparación y por qué la mecánica química tiene que venir después de conocer las sustancias mismas.

Pista: ¿Qué se desconoce de la gravedad, y qué lograron aun así los astrónomos?

Respuesta: Nadie sabe qué es en realidad la gravedad, y sin embargo la mecánica permite a los astrónomos predecir el cielo con detalle; del mismo modo, sin saber qué es la afinidad, los químicos esperan avanzar gracias a la teoría mecánica del calor. Pero la mecánica química supone que ya se conocen las sustancias, sus transformaciones y lo que las acompaña, así que solo puede venir después del estudio de las ideas básicas y de las sustancias.

Energía almacenada, recetas fijas y caminos de ida y vuelta

Acerque un trozo de potasio a una llama y arde con fuerza; haga lo mismo con azufre y arde con llama azul. Ahora caliente los dos juntos hasta que se combinen e intente encender lo que obtiene. No arderá al aire como ardía cada uno de ellos. Algo ha salido de ellos, y Mendeléiev dice qué: energía, liberada como calor en el momento en que se combinaron.



La energía sale como calor

Su razonamiento es así. Los cambios químicos vienen de fuerzas dentro de las sustancias; los fenómenos químicos son siempre movimientos de partes materiales diminutas; y la física ha mostrado que la energía se conserva, solo cambia de forma. Así que toda sustancia, y en particular todo elemento, debe guardar una reserva de energía química, un movimiento invisible que la empuja a reaccionar. Cuando una reacción desprende calor, parte de esa energía química se ha convertido en calor. Cuando una reacción absorbe calor, el calor queda en parte escondido como energía química. Una pila es una reserva de este tipo: energía química guardada en la fábrica y liberada como electricidad cuando se cierra el circuito.

Escribamos la contabilidad como una fórmula, en el espíritu de la ley de conservación. Llame E_1 a la energía química de las sustancias de partida, E_2 a la de los productos y Q al calor desprendido. Entonces $E_1 = E_2 + Q$. En palabras: la energía de antes es igual a la energía de después más lo que salió como calor. La intuición es una cuenta bancaria: si gasta de ella, el saldo baja exactamente lo que gastó. Como cálculo, suponga que el potasio y el azufre tenían 100 unidades de energía química y que al combinarse desprendieron 60 unidades de calor; el compuesto se queda con $100 - 60 = 40$ unidades, demasiado pocas para arder como ardían los elementos. Esas cifras son solo para ilustrar; el libro no da ninguna, pero la lógica es la del libro.

Tras varias combinaciones, cada una desprendiendo calor, a una sustancia puede quedarle tan poca energía que apenas reacciona. Pero ni aun entonces está acabada: un compuesto así de perezoso puede combinarse con un elemento o un compuesto enérgico y formar algo más complejo que vuelve a ser activo. Algunos cuerpos simples guardan poca energía, como el oro, el platino y el nitrógeno; otros

guardan muchísima, como el potasio, el cloro y el oxígeno. Y los cuerpos distintos, al combinarse, suelen dar compuestos con menos energía, igual que el potasio y el azufre. En resumen, dice Mendeléiev, igual que una sustancia absorbe o desprende calor al fundirse o hervir, toda combinación y descomposición cambia su reserva de energía química y desprende o absorbe calor.

Para estudiar cómo transcurren las reacciones, el campo que él llama mecánica química, Mendeléiev nombra cinco cosas que importan más. Primero, la estequiometría: el estudio de cuánto reacciona de cada sustancia, en peso y en volumen. Segundo, las distintas clases de interacción química; tercero, cómo cambian las propiedades cuando cambia la composición; cuarto, lo que acompaña a una reacción, como el calor; y quinto, las condiciones en que ocurren las reacciones. De ellas, la estequiometría era la más completa. Sus leyes, halladas por Dalton, por Avogadro y Gerhardt y por otros, son tan profundas que Mendeléiev llama a toda su época la época de su aplicación, y dice que todo en su libro está ordenado según ellas.

ESTEQUIOMETRÍA

DALTON · AVOGADRO · GERHARDT

DEFINIDO



Hg 200

$$16 \cdot 100 / 216 \approx 7.4 \%$$

108 G → 8 G DE OXÍGENO

INDEFINIDO



CUALQUIER PARTE

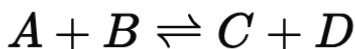
Recetas fijas y variables

La estequiometría trajo una nueva división de los compuestos en definidos e indefinidos. A principios del siglo diecinueve, Berthollet no hacía esa distinción. Luego Proust mostró que muchísimos compuestos contienen sus partes en una proporción exacta en peso que nunca cambia, sean cuales sean las condiciones. El ejemplo de Mendeléiev es el óxido rojo de mercurio: 16 partes de oxígeno por cada 200 partes de mercurio, escrito HgO. Usemos esa proporción en voz alta. La unidad entera pesa $200 + 16 = 216$ partes, así que el oxígeno es $16 \cdot 100 / 216$, cerca del 7,4 por ciento. En palabras: cualquier muestra de óxido rojo de mercurio, venga de donde venga, tiene cerca de un 7,4 por ciento de oxígeno en peso; 108 gramos, por ejemplo, contienen $108 \times 16 / 216 = 8$ gramos de oxígeno y 100 de mercurio.

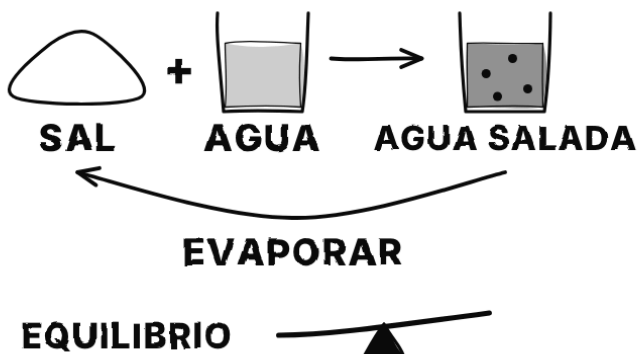
Una aleación de cobre y plata es distinta. Puede añadir cualquier cantidad de cualquiera de los dos metales y seguir obteniendo un todo uniforme, cuyas propiedades son una mezcla de las de las partes. Una disolución de azúcar en agua es igual: puede hacerla más floja o más fuerte a su gusto. Estos son compuestos indefinidos. El latón de un pomo de puerta y el té dulce de una taza son compuestos indefinidos en este sentido; la receta puede variar. Mendeléiev subraya que las aleaciones y las disoluciones importan igual en la naturaleza, en los laboratorios y en las fábricas, pero como las leyes de la estequiometría se elaboraron con compuestos definidos, se sabía mucho menos de los indefinidos, y los químicos solo se habían ocupado de ellos hacía poco.

A continuación separa las reacciones reversibles de las irreversibles. Una reacción es reversible si, a la misma temperatura, sus productos pueden volver a convertirse en las sustancias de partida. La sal se disuelve en agua a temperatura ambiente, y a esa misma temperatura la disolución devuelve la sal cuando el agua se evapora. El sulfuro de carbono se forma a partir de azufre y carbón a una temperatura en la que también puede separarse de nuevo en ellos. El hierro al rojo quita el oxígeno al agua y deja libre el hidrógeno, formando óxido de hierro; y sin embargo, a esa misma temperatura, el hidrógeno convierte el óxido de hierro de nuevo en hierro y agua.

REVERSIBLE



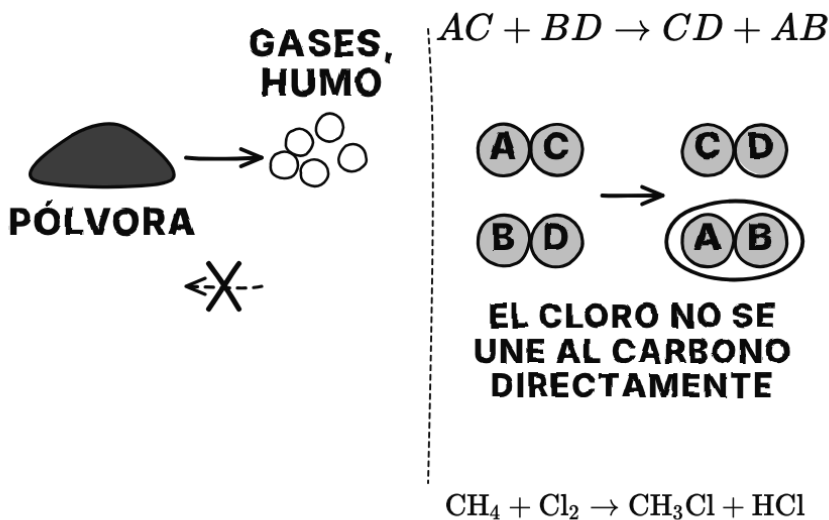
MÁS B ↑



Caminos de ida y vuelta

Escríballo con letras: $A + B \rightleftharpoons C + D$, donde la doble flecha significa que el camino va en los dos sentidos. Empiece con A y B, o empiece con las cantidades correspondientes de C y D, y en los dos casos acabará con las cuatro una junto a otra. Ese estado se llama equilibrio químico. La intuición son dos habitaciones unidas por una puerta abierta, con gente que pasa en los dos sentidos: al cabo de un rato el número de personas en cada habitación deja de cambiar, aunque la gente siga cruzando. Añada más de una sustancia y el equilibrio se desplaza a una posición nueva; así las reacciones reversibles permiten a los químicos estudiar cómo afecta la cantidad de una sustancia al curso de una reacción.

Las reacciones irreversibles son comunes entre sustancias y mezclas muy complejas. Muchas sustancias de plantas y animales se deshacen al calentarlas, pero sus pedazos nunca las reconstruyen a ninguna temperatura. La pólvora, una mezcla de salitre, azufre y carbón, arde en gases y humo, y estos nunca vuelven a ser pólvora. Para volver a hacer esas cosas hace falta un camino indirecto.



Un solo sentido, y un rodeo

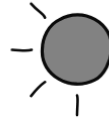
Ese camino indirecto es el último y más sutil punto de Mendeléiev: que dos elementos no se combinen directamente no significa que no puedan formar un compuesto. Suponga que A nunca se une a B directamente. Ponga A con C, y B con D, y elija C y D de modo que tengan una fuerte afinidad entre sí. Entonces $AC + BD \rightarrow CD + AB$. En palabras: C y D se lanzan uno hacia otro, y A y B, liberados de

golpe en el mismo sitio, se unen entre sí. La idea es que las sustancias están especialmente dispuestas a combinarse en el momento en que quedan libres, «en estado naciente», *in statu nascendi* como dice el latín.

Su ejemplo es el cloro y el carbono. El cloro no reacciona directamente con el carbón, el grafito ni el diamante, y sin embargo existen muchos compuestos de cloro y carbono, algunos muy estables. Se obtienen haciendo actuar el cloro sobre hidrocarburos, compuestos de carbono e hidrógeno. En la notación actual el caso más simple es $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$. En palabras: el cloro arranca hidrógeno, y el carbono, liberado en ese instante, toma cloro en su lugar, así que el cloro acaba unido al hidrógeno y al carbono.

Pruébalo

Disuelva una cucharada de sal en un platito de agua y deje el platito unos días en un alféizar soleado. A medida que el agua se evapora, aparecen cristales de sal en los bordes y luego por todo el fondo. Añada agua otra vez y se disuelven; déjelo secar y vuelven. A la misma temperatura ambiente el cambio va en los dos sentidos, que es exactamente lo que Mendeléiev entiende por reacción reversible.



SECO $\rightleftharpoons$ MOJADO

UNOS DÍAS



CRISTALES

MISMA TEMPERATURA, EN LOS DOS SENTIDOS

Sal que se va y vuelve

Para recordar

Toda sustancia guarda una reserva de energía química; el calor desprendido en una reacción es energía que ha salido de esa reserva, y el calor absorbido se guarda en parte. La estequiometría, el estudio de cuánto reacciona, era la parte más completa de la química, y divide los compuestos en definidos e indefinidos. Un compuesto definido tiene una proporción fija, como el óxido rojo de mercurio con 16 partes de oxígeno por 200 de mercurio, cerca de un 7,4 por ciento de oxígeno; las aleaciones y las disoluciones pueden variar. En una reacción reversible los productos pueden devolver las sustancias de partida a la misma temperatura, y las cuatro acaban en equilibrio; en una irreversible no pueden. Elementos que nunca se combinan directamente pueden unirse aun así por un camino indirecto, encontrándose en el momento en que quedan libres, como el carbono y el cloro.

Preguntas

1. El potasio y el azufre arden con facilidad, pero su compuesto no arde así al aire. ¿Cuál es la explicación?
 - a. Parte de su energía química salió como calor al combinarse, así que el compuesto tiene menos
 - b. El compuesto no contiene potasio ni azufre
 - c. La combinación duplica la energía y hace el compuesto demasiado estable

- d. El compuesto no se puede calentar
2. ¿Qué mostró Proust que Berthollet no había distinguido?
- a. Que todos los compuestos pueden tener cualquier proporción
 - b. Que muchos compuestos contienen sus partes en una proporción exacta en peso que nunca cambia
 - c. Que las aleaciones son cuerpos simples
 - d. Que el calor no afecta a los compuestos
3. En una reacción reversible $A + B \rightleftharpoons C + D$, ¿qué se encuentra al final si se empieza solo con C y D?
- a. Solo C y D, sin cambiar
 - b. Solo A y B, convertidos por completo
 - c. Las cuatro, una junto a otra, en equilibrio químico
 - d. Una sustancia nueva formada en estado naciente
4. El cloro nunca reacciona directamente con el carbón, y sin embargo existen compuestos de cloro y carbono. ¿Cómo encaja eso con la idea de Mendeléiev?
- a. El cloro reacciona con el carbono solo a la luz
 - b. Los compuestos se hacen calentando cloro con diamante
 - c. Los compuestos son en realidad mezclas, no compuestos
 - d. El cloro, al actuar sobre hidrocarburos, libera carbono en el momento en que puede tomar cloro, en estado naciente

Respuestas

1. a) Algo ha salido de ellos: energía, liberada como calor en el momento en que se combinaron.

- 2. b)** Proust mostró que muchísimos compuestos contienen sus partes en una proporción exacta en peso que nunca cambia, sean cuales sean las condiciones.
- 3. c)** Empiece con A y B, o con las cantidades correspondientes de C y D, y en los dos casos acaba con las cuatro una junto a otra: equilibrio químico.
- 4. d)** El cloro arranca hidrógeno, y el carbono, liberado en ese instante, toma cloro en su lugar.

Ejemplos resueltos

El oxígeno del óxido rojo de mercurio El óxido rojo de mercurio contiene 16 partes de oxígeno por 200 de mercurio, una proporción fija. ¿Qué porcentaje es oxígeno, y cuántos gramos de oxígeno hay en 108 gramos de él?

La proporción es definida, así que cada $200 + 16 = 216$ partes de óxido contienen 16 de oxígeno.

El porcentaje de oxígeno es $16 \times 100 / 216$, cerca del 7,4 por ciento.

En 108 gramos hay $108 \times 16 / 216$ gramos de oxígeno.

$108/216$ es la mitad, así que son $16/2 = 8$ gramos, y los 100 gramos restantes son mercurio.

Respuesta: Cerca del 7,4 por ciento; 8 gramos de oxígeno en 108 gramos

Ejercicios

1. ¿Cuánto óxido rojo de mercurio se puede hacer con 50 gramos de mercurio, si el óxido siempre contiene 16 partes de oxígeno por 200 de mercurio?

Pista: Halle cuánto oxígeno va con 50 gramos de mercurio y luego sume.

Respuesta: 54 gramos. 50 es la cuarta parte de 200, así que lleva la cuarta parte de 16, o sea 4 gramos de oxígeno, y $50 + 4 = 54$ gramos de

óxido.

2. Una mezcla de cobre y plata se puede hacer en cualquier proporción, y el óxido rojo de mercurio no. Explique cuál es un compuesto definido y cuál uno indefinido, y por qué la estequiometría sabía más del primer tipo.

Pista: Pregúntese si la proporción en peso puede cambiar.

Respuesta: El óxido rojo de mercurio es definido: su proporción en peso es fija. La aleación de cobre y plata es indefinida: se puede añadir cualquier cantidad de cualquiera de los dos metales y el todo sigue uniforme. Las leyes de la estequiometría se elaboraron sobre todo con compuestos definidos, así que el conocimiento de los indefinidos, aleaciones y disoluciones, era menos completo.

3. Explique por qué la combustión de la pólvora se llama irreversible, y por qué la disolución de la sal en agua se llama reversible.

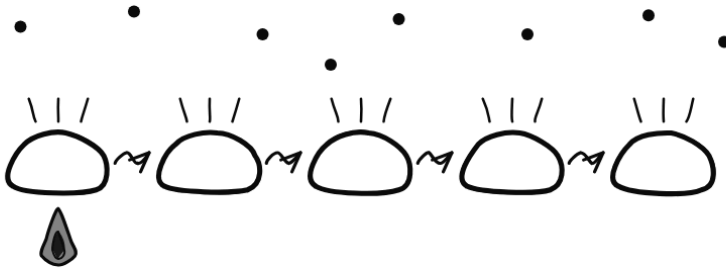
Pista: ¿Pueden los productos devolver las sustancias de partida a la misma temperatura?

Respuesta: Los gases y el humo de la pólvora nunca vuelven a ser salitre, azufre y carbón a ninguna temperatura, así que esa reacción es irreversible. La disolución de sal devuelve la sal cuando el agua se evapora a la misma temperatura, así que disolver es reversible.

Calor, trabajo y la ventana de temperatura

Sostenga un trozo de carbón en el aire de una habitación fresca. Está rodeado de oxígeno, el mismo gas en el que arde, y sin embargo no pasa nada; puede quedarse así años. Ahora toque una esquina con una llama hasta que se ponga al rojo. El punto incandescente prende, desprende calor, pone al rojo el punto de al lado, y pronto todo el trozo arde por sí solo. Un encendedor de barbacoa funciona exactamente así: solo hace falta poner al rojo una esquina del carbón, y el resto sigue. ¿Por qué el oxígeno y el carbón, perfectamente dispuestos a combinarse, esperan al calor para hacerlo?

OXÍGENO DEL AIRE



AL ROJO EL CALOR SE EXTIENDE

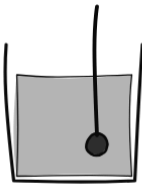
El carbón espera al calor

Mendeléiev empieza con un principio más amplio. Una reacción química no solo produce movimiento, calor, luz, tensión eléctrica y corriente; cada uno de ellos, a su vez, puede cambiar el curso de una reacción. La influencia va en los dos sentidos, y explica por qué: todos los fenómenos de la naturaleza son clases distintas de movimiento, visible e invisible, y los invisibles son los movimientos de las moléculas. La física había mostrado que el sonido y luego la luz son vibraciones, y que el calor está ligado al trabajo mecánico.

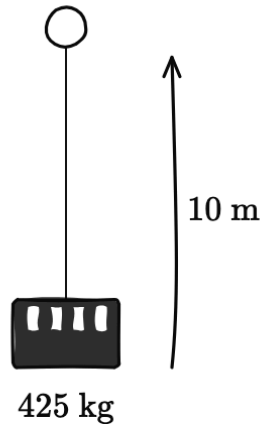
Ese último vínculo tiene un número exacto, y es la fórmula de esta parte. Mendeléiev la escribe en las unidades de su época: $425 \text{ kgm} = 1 \text{ Cal}$. En palabras: 425 kilográmetros de trabajo mecánico valen una unidad de calor de kilogramo. Un kilográmetro es el trabajo de

levantar un kilogramo un metro, y la unidad de calor de kilogramo, la caloría grande, es el calor que calienta un kilogramo de agua un grado. La intuición es que el calor y el trabajo son dos monedas del mismo dinero, y 425 es el tipo de cambio. Ahora un cálculo en voz alta. Calentar un litro de agua, que pesa un kilogramo, de 20 a 30 grados requiere 10 calorías grandes. En trabajo eso es $10 \times 425 = 4250$ kilográmetros, suficiente para subir un piano de 425 kilos diez metros. Así que una pequeña cantidad de calor es una cantidad sorprendentemente grande de trabajo, y por eso quemar combustible puede mover máquinas.

$$425 \text{ kgm} = 1 \text{ Cal}$$



$$1 \text{ kg} : 20^\circ \rightarrow 30^\circ \\ = 10 \text{ Cal}$$



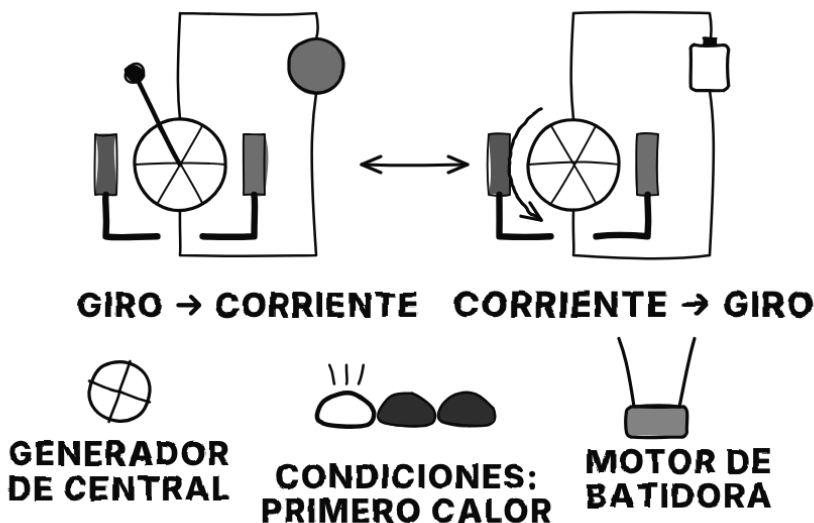
$$10 \times 425 = 4250 \text{ kgm}$$

Calor y trabajo se intercambian

La electricidad también comercia con el movimiento. Haga girar una dinamo de Gramme, señala Mendeléiev, y obtiene una corriente; haga

pasar una corriente por la misma máquina, y gira. La conversión va en los dos sentidos, igual que la del calor y el trabajo. El motor eléctrico de una batidora de cocina y el generador de una central eléctrica son la misma máquina funcionando en sentidos opuestos. Así que la mecánica química, concluye, debe tomar sus líneas principales de los vínculos entre la química y la física. Pero el tema era todavía demasiado complejo y demasiado nuevo para una teoría sólida, o siquiera una hipótesis satisfactoria, así que lo aparta como rama propia, la química física.

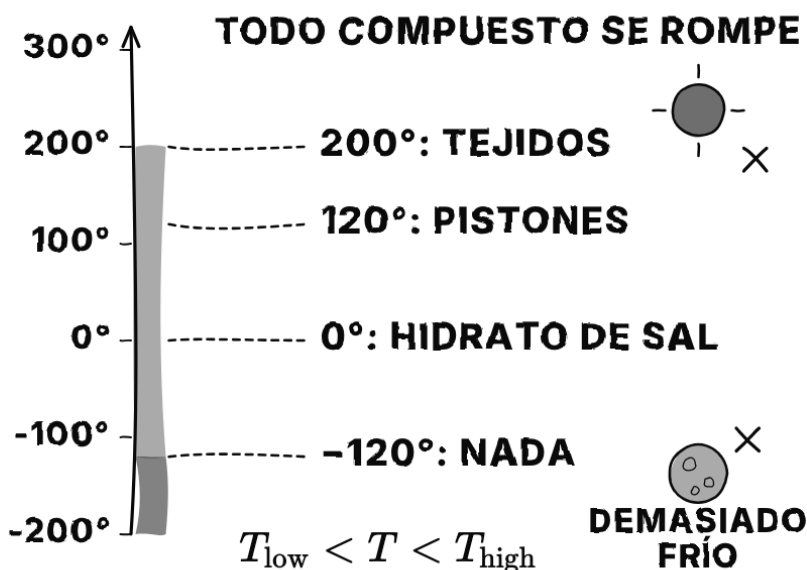
LA QUÍMICA SIGUE A LA FÍSICA



Movimiento y corriente en los dos sentidos

Lo que sí expone son las condiciones. Una reacción va en un sentido o en otro no solo por las masas, la composición y las afinidades de las sustancias, sino también por las condiciones en que se encuentran. A

menudo una reacción necesita condiciones muy distintas de las que las cosas encuentran en la naturaleza. Así es el carbón: no solo necesita oxígeno, sino también calor al rojo. La parte incandescente se combina con el oxígeno, el calor que desprende pone al rojo la parte siguiente, y solo entonces arde esa parte. Toda reacción, dice Mendeléiev, solo ocurre en ciertas condiciones físicas y mecánicas, y la primera de ellas es el grado de calor.



La ventana de temperatura

Las combinaciones solo ocurren dentro de límites definidos de temperatura. La combustión es un ejemplo: empieza y continúa solo al rojo. Uno más extraño es que el cloro y la sal común forman cada uno un compuesto con el agua solo por debajo de 0°; por encima, el

compuesto no se forma, y si ya estaba hecho se deshace del todo o en parte.

¿Por qué el calor ayudaría a una reacción? Mendeléiev da dos razones. Primero, el calor puede fundir o vaporizar una de las sustancias, y un líquido o un gas permite a las partículas un contacto más completo, que toda reacción necesita. Segundo, el calor debilita la cohesión, el lazo entre partículas iguales, así que las partes de las sustancias de partida se separan con más facilidad y quedan más libres para formar compuestos nuevos. Y cuando una reacción necesita absorber calor, como las descomposiciones, la necesidad de calentar es evidente.

De hecho, dice Mendeléiev, todos los compuestos se descomponen si se calientan lo bastante. Ya hemos visto ejemplos: el óxido rojo de mercurio que se separa en mercurio y oxígeno, y la madera que se deshace con el calor. Algunos compuestos necesitan muy poco. El fulminato de mercurio del pistón de un arma se descompone a poco más de 120° . Muchas sustancias de los tejidos animales y vegetales se descomponen hacia los 200° .

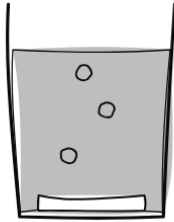
La ventana también tiene un borde inferior. Con un frío intenso, las reacciones se detienen: las plantas paran su química en invierno. En 1892 Raoul Pictet usó la ebullición de gases licuados para llegar a unos -200° . Por debajo de -120° , encontró, ni siquiera reaccionan el ácido sulfúrico y la sosa cáustica, ni el ácido sulfúrico y el sodio metálico, aunque a temperatura ambiente reaccionan violentamente. Incluso el tornasol, el colorante que se vuelve rojo en ácido, solo cambia de color por encima de -80° .

Pongamos la ventana como fórmula. Para cada reacción hay un límite inferior T_{inf} y un límite superior T_{sup} , y la reacción solo ocurre cuando $T_{\text{inf}} < T < T_{\text{sup}}$. En palabras: demasiado frío y las

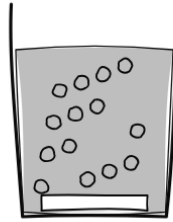
partículas están demasiado aletargadas para reaccionar; demasiado calor y el compuesto se deshace tan rápido como se forma. Para el ácido y la sosa de Pictet, el límite inferior está en algún punto por encima de -120° ; para el compuesto de sal y agua, el límite superior está hacia 0° . Y Mendeléiev saca la conclusión llamativa: en el sol, donde hace mucho calor, o en la luna, donde hace mucho frío, muchas de las reacciones que vemos a diario en la tierra seguramente no pueden ocurrir en absoluto.

Pruébalo

Ponga dos cucharaditas de bicarbonato en dos vasos. Eche agua fría de la nevera en uno y un chorrito de zumo de limón encima; haga lo mismo en el otro vaso con agua caliente del hervidor. Mire el burbujeo: en el vaso caliente es rápido y vivo, en el frío lento y perezoso. La reacción es la misma, pero su ritmo depende de la temperatura, un pequeño vistazo a la ventana de temperatura.



FRÍO



CALIENTE

MISMA REACCIÓN, OTRO RITMO

Vaso frío, vaso caliente

Para recordar

Las reacciones producen movimiento, calor, luz y electricidad, y cada uno de ellos puede a su vez cambiar las reacciones, porque todos son formas de movimiento. El calor y el trabajo se intercambian a un tipo fijo: 425 kilográmetros de trabajo equivalen a una caloría grande de calor. Toda reacción necesita sus condiciones, y la primera es la temperatura, como el carbón solo arde una vez al rojo. El calor ayuda a las reacciones fundiendo o vaporizando sustancias y debilitando la cohesión, y un calor lo bastante fuerte descompone todo compuesto. Cada reacción solo ocurre dentro de una ventana de temperatura: Pictet encontró que por debajo de menos ciento veinte grados se detienen incluso las reacciones violentas.

Preguntas

1. Una vez que una esquina de un trozo de carbón está al rojo, ¿por qué todo el trozo sigue ardiendo por sí solo?
 - a. Porque el calor de la parte que arde pone al rojo la parte siguiente, y solo arde el carbón al rojo
 - b. Porque la llama reparte oxígeno por el carbón
 - c. Porque el carbón, una vez encendido, arde a cualquier temperatura
 - d. Porque el aire se calienta e inicia la reacción en todas partes a la vez

2. ¿Por qué el calor, la luz o la electricidad pueden cambiar una reacción, además de ser producidos por ella?
 - a. Porque las reacciones son una clase de electricidad
 - b. Porque todos los fenómenos de la naturaleza son clases distintas de movimiento, visible e invisible
 - c. Porque el calor y la luz son sustancias que entran en los compuestos
3. ¿Cuál de estas es una razón que da Mendeléiev de por qué calentar ayuda a una reacción?
 - a. El calor añade cuerpos simples nuevos a la mezcla
 - b. El calor hace más pesadas las sustancias
 - c. El calor debilita la cohesión, así que las partes de las sustancias de partida se separan con más facilidad
 - d. El calor refuerza el lazo entre partículas iguales
4. ¿Qué mostraron los experimentos de Pictet con gases licuados?
 - a. Que el frío acelera todas las reacciones
 - b. Que el ácido sulfúrico y la sosa cáustica reaccionan mejor congelados
 - c. Que el tornasol nunca cambia de color en ácido
 - d. Que por debajo de unos menos ciento veinte grados ni siquiera ocurren las reacciones violentas

Respuestas

1. a) La parte incandescente se combina con el oxígeno, y el calor que desprende pone al rojo la parte siguiente; solo entonces arde esa parte.
2. b) La influencia va en los dos sentidos porque todos los fenómenos de la naturaleza son clases distintas de movimiento, y los invisibles son los

movimientos de las moléculas.

3. c) El calor debilita la cohesión, el lazo entre partículas iguales, así que las partes de las sustancias de partida se separan con más facilidad.

4. d) Por debajo de menos ciento veinte grados ni siquiera reaccionan el ácido sulfúrico y la sosa cáustica, así que toda reacción tiene un límite inferior de temperatura.

Ejemplos resueltos

El calor como trabajo Usando el equivalente mecánico del calor, 425 kilográmetros de trabajo por cada unidad de calor de kilogramo, ¿cuánto trabajo corresponde a 6 unidades de calor?

El equivalente es un tipo de cambio: una unidad de calor vale 425 kilográmetros de trabajo.

Así que 6 unidades valen 6 veces más.

$$6 \times 425 = 2550.$$

Respuesta: 2550 kilográmetros

Ejercicios

1. Una máquina hace 3400 kilográmetros de trabajo, y todo él se convierte en calor. ¿Cuántas unidades de calor de kilogramo son?

Pista: Divida el trabajo por el tipo, 425 kilográmetros por unidad de calor.

Respuesta: 8 unidades de calor, ya que $3400 / 425 = 8$.

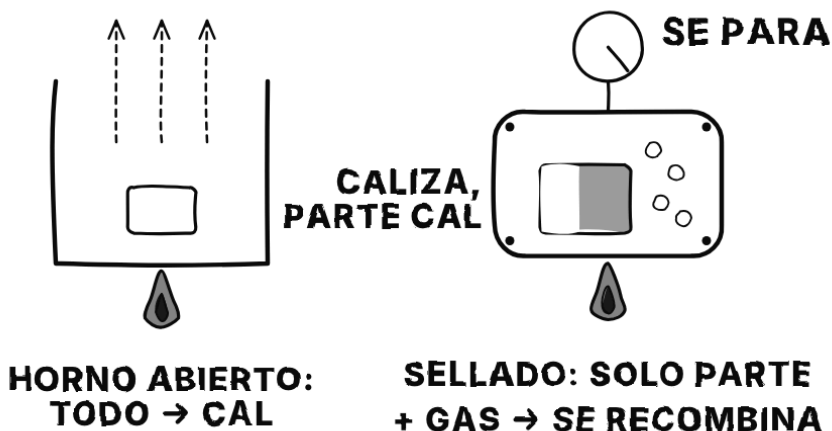
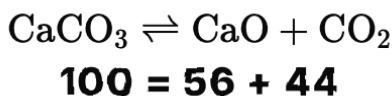
2. Mendeléiev dice que muchas reacciones que se ven en la tierra seguramente no pueden ocurrir en el sol ni en la luna. Explique por qué, usando lo que esta parte dice sobre la temperatura.

Pista: Toda reacción tiene un límite inferior y otro superior de temperatura.

Respuesta: Cada reacción solo ocurre dentro de ciertos límites de temperatura. En el sol hace tanto calor que los compuestos se descomponen, pues todo compuesto se descompone con un calor lo bastante fuerte; en la luna hace tanto frío que, como encontró Pictet, se detienen incluso las reacciones violentas. Así que muchas reacciones terrestres quedan allí fuera de su ventana.

Descomposiciones a medias y el poder de la corriente

Un horno de cal es un horno alto lleno de trozos de caliza, con un fuego encendido en la base. Caliéntelo un día y cada trozo se ha convertido en cal viva, mientras el gas de ácido carbónico se ha ido por la chimenea. Ahora imagine hacer lo mismo en un tubo de hierro cerrado. Mendeléiev describe exactamente esto: ponga caliza en el cañón de un arma, remache el extremo y caliéntelo al rojo. Esta vez solo se descompone parte de la piedra, y el resto sigue siendo caliza, por mucho que espere. ¿Qué es distinto?



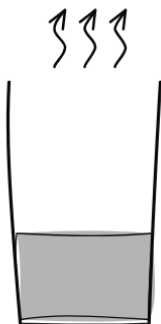
Horno abierto, cañón sellado

La respuesta es un fenómeno que Mendeléiev llama disociación. Tome un compuesto que pueda volver a formarse a partir de sus propios productos, uno reversible, y caliéntelo. A cierta temperatura empieza a descomponerse, pero en un espacio cerrado no llega hasta el final. Solo se rompe una parte; el resto queda intacto. Suba la temperatura y la parte crece; a cada temperatura, para un volumen dado, hay una proporción fija de sustancia descompuesta e intacta, hasta que por fin se alcanza una temperatura en la que el compuesto se deshace por completo. Esta descomposición incompleta y dependiente de la temperatura es la disociación, y tiene una temperatura de comienzo y otra de final.

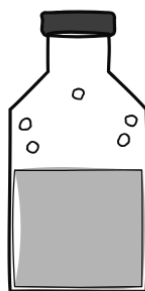
Para la caliza la reacción, en la notación actual, es $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{CaO} + \text{CO}_2$. En palabras: la caliza se separa en cal y gas de ácido carbónico, y la cal y el gas pueden volver a unirse en caliza. En peso, 100 gramos de caliza dan 56 gramos de cal y 44 gramos de gas, ya que $56 + 44 = 100$. En el horno abierto el gas escapa tan rápido como se forma, así que el camino de vuelta nunca se toma y los 100 gramos pasan a cal. En el cañón sellado el gas no puede salir. Su presión sube hasta alcanzar la mayor presión propia de esa temperatura, llamada presión de disociación, y entonces la descomposición se detiene. Meta más gas y la cal y el gas empiezan a combinarse de nuevo; saque un poco y la descomposición vuelve a empezar.

La comparación de Mendeléiev lo hace fácil de imaginar: la disociación es igual que la evaporación. Deje agua en un frasco cerrado y se evapora hasta que el vapor de encima alcanza la mayor presión para esa temperatura; entonces la evaporación se detiene. Meta más vapor y una parte se condensa de nuevo en líquido; saque un poco y se evapora más agua. Una botella cerrada de agua en un alféizar templado se empaña por dentro pero nunca se seca,

exactamente por esta razón, mientras que un vaso abierto a su lado se vacía poco a poco. El horno es el vaso abierto, y el cañón es la botella cerrada. Estas ideas, dice Mendeléiev, las introdujo en la ciencia Henri Sainte-Claire Deville, y volverá a ellas a menudo.



**ABIERTO: SE VACÍA
COMO EL HORNO**



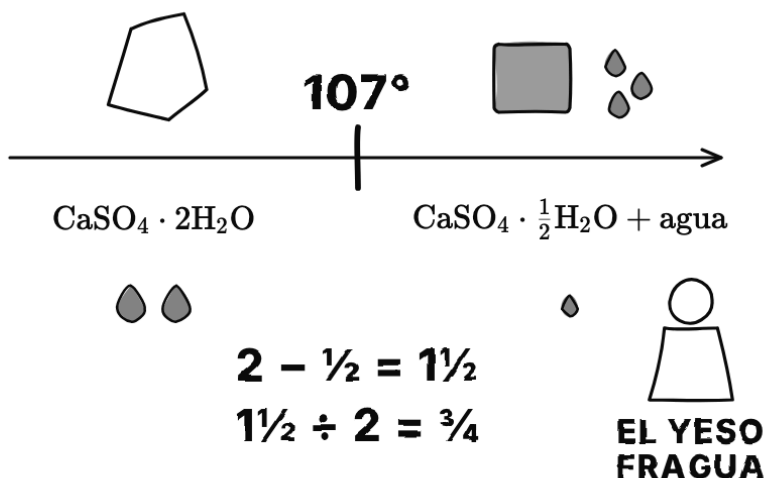
**CERRADO: SE PARA
COMO EL CAÑÓN**

SAINTE-CLAIRE DEVILLE

Como el agua en una botella cerrada

De ahí se siguen dos puntos más. Primero, las partes separadas se combinan con más facilidad cerca de la temperatura a la que empieza la disociación; así que la temperatura a la que un compuesto empieza a deshacerse está cerca de la temperatura a la que sus partes empiezan a reaccionar. Segundo, algunos cambios ocurren a una temperatura precisa, como la fusión o la ebullición. Por encima de ella el compuesto se rompe; por debajo, se vuelve a formar; y el cambio se

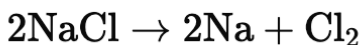
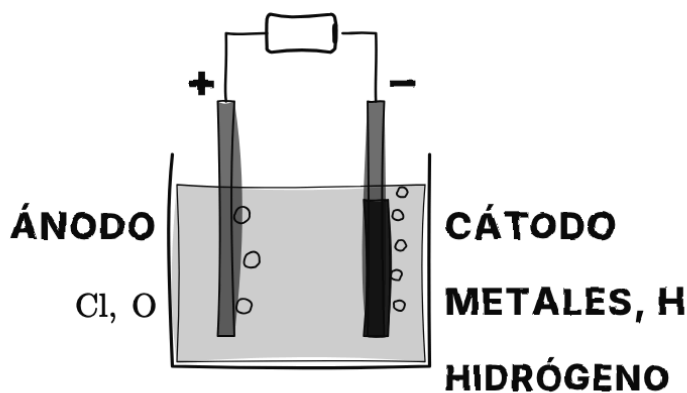
ve en un termómetro o por un cambio brusco de volumen medido con un dilatómetro.



El yeso a 107 grados

Su ejemplo es el yeso, el mineral con dos aguas, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En un espacio cerrado, a 107° , se rompe por completo en una pasta húmeda: una sal con solo media agua, $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, y agua líquida. Contemos el agua. Antes había 2 aguas por unidad; después, la sal conserva $\frac{1}{2}$. Así que el agua liberada es $2 - \frac{1}{2} = 1\frac{1}{2}$, y como parte de la original, $1\frac{1}{2} / 2 = \frac{3}{4}$, exactamente las tres cuartas partes que cuenta Mendeléiev. Enfríelo por debajo de 107° y la sal de dos aguas se forma de nuevo. El yeso de París es esta sal de media agua; mézclela con agua y fragua dura al tomar el agua de vuelta, por eso los vaciados de yeso se pueden hacer a temperatura ambiente.

Ahora el segundo agente de esta parte: la electricidad. Su efecto, dice Mendeléiev, se parece mucho al del calor. La mayoría de los compuestos que conducen una corriente galvánica se descomponen con ella, y cerca de las condiciones de descomposición también ocurre la combinación, igual que al calentar. La electricidad, como el calor, es una clase de movimiento molecular. Pero tiene una gran ventaja: puede separar compuestos a temperatura ordinaria, y puede romper incluso los más estables.



La corriente rompe la sal

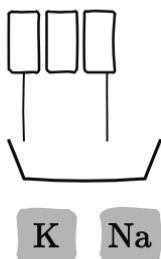
Y muestra algo que el calor nunca pudo: las partes aparecen en polos distintos. La corriente entra y sale de la sustancia por dos electrodos. En el polo positivo, el ánodo, aparecen las sustancias llamadas electronegativas: sobre todo no metales, como el cloro y el oxígeno, y

los ácidos y cosas parecidas. En el polo negativo, el cátodo, aparecen las electropositivas: los metales, el hidrógeno y productos parecidos, que se llaman iones. Así, para la sal común rota por una corriente, en la notación actual, $2\text{NaCl} \rightarrow 2\text{Na} + \text{Cl}_2$: el sodio va al cátodo, el cloro al ánodo.

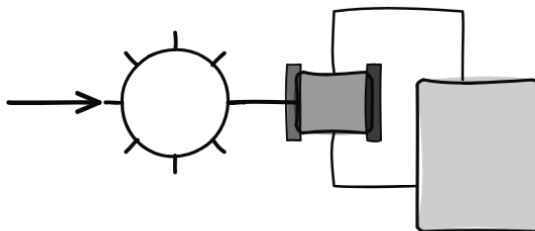
Pruébalo

Llene un vaso con agua tibia y disuelva en ella una cucharadita de sal. Conecte dos minas de lápiz, o dos cables pelados, a los bornes de una pila de 9 voltios y sumerja sus extremos libres en el agua, un poco separados. Mire el cable unido al borne negativo: sube de él un chorro de burbujas finas, hidrógeno, como dice Mendeléiev, que aparece en el polo negativo. Hágalo solo un minuto, en una habitación ventilada, y no huela el agua junto al otro cable: puede desprender un poco de cloro.

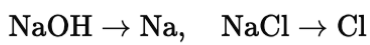
Este método hizo historia. Muchos cuerpos simples se obtuvieron por primera vez con la corriente. Los más famosos son el potasio y el sodio: Lavoisier y sus contemporáneos no pudieron romper sus compuestos con oxígeno, pero el inglés Davy hizo pasar una corriente por ellos y encontró los metales apareciendo en el polo negativo. Durante mucho tiempo esto siguió siendo una hazaña de laboratorio. Luego las dinamos abarataron la corriente, movidas por la combustión de combustible o por el agua y otros motores, y el método de Davy se volvió un método de fábrica. El sodio se obtenía de la sosa cáustica fundida, NaOH , escrita NaHO en tiempos de Mendeléiev, y el cloro de disoluciones de sal común.



DAVY



FÁBRICA



De la mesa de Davy a la fábrica

Para recordar

La disociación es la descomposición incompleta de un compuesto reversible, con una parte fija rota a cada temperatura en un espacio cerrado. Si los productos escapan, como en un horno de cal abierto, la descomposición llega al final; si se retienen, como en un cañón sellado, se detiene en la presión de disociación, igual que la evaporación se detiene en un frasco cerrado. Algunos cambios ocurren a una temperatura precisa, como el yeso a ciento siete grados, que pierde tres cuartas partes de su agua y la recupera al enfriarse. Una corriente eléctrica descompone compuestos incluso a temperatura ambiente, con los no metales en el polo positivo y los metales y el hidrógeno en el negativo. Davy obtuvo así el potasio y el sodio, y la corriente barata de las dinamos lo convirtió en un método de fábrica para metales y cloro.

Preguntas

1. ¿Por qué la caliza se descompone por completo en un horno abierto y solo en parte en el cañón sellado de un arma?
 - a. En el horno el gas escapa; en el cañón se queda, y la descomposición se detiene cuando su presión llega a la presión de disociación
 - b. El cañón no se puede calentar tanto como el horno
 - c. El hierro reacciona con la caliza y la protege
 - d. El horno añade oxígeno, que falta en el cañón

2. En el cañón sellado se mete más gas de ácido carbónico a la misma temperatura. ¿Qué ocurre?
 - a. Se descompone más caliza
 - b. La cal y el gas empiezan a combinarse de nuevo en caliza
 - c. No cambia nada
 - d. La cal se funde
3. ¿Qué ventaja tiene una corriente eléctrica sobre el calor para descomponer compuestos?
 - a. Añade elementos nuevos al compuesto
 - b. Solo funciona con compuestos débiles
 - c. Funciona a temperatura ordinaria y puede romper incluso los compuestos más estables
4. Cuando una corriente descompone la sal común, ¿dónde aparece el sodio, y por qué encaja con la regla?
 - a. En el ánodo, porque los metales son electronegativos
 - b. En los dos polos, porque la sal tiene dos elementos
 - c. En ninguna parte, porque el sodio sigue disuelto
 - d. En el cátodo, porque los metales son electropositivos

Respuestas

1. **a)** En el cañón sellado el gas no puede salir; su presión sube hasta la mayor para esa temperatura, y entonces la descomposición se detiene.
2. **b)** Meta más gas y la cal y el gas empiezan a combinarse de nuevo; saque un poco y la descomposición vuelve a empezar.
3. **c)** La electricidad puede separar compuestos a temperatura ordinaria, y puede romper incluso los más estables.

4. **d)** Los metales y el hidrógeno aparecen en el polo negativo, el cátodo; el cloro va al ánodo.

Ejemplos resueltos

El agua que pierde el yeso El yeso, la sal de sulfato de calcio con dos aguas, se rompe a 107° en un espacio cerrado en la sal con media agua y agua líquida. ¿Qué parte de su agua queda libre?

Antes del cambio cada unidad contiene 2 aguas.

Después, la sal nueva conserva $\frac{1}{2}$ agua.

Así que el agua liberada es $2 - \frac{1}{2} = 1\frac{1}{2}$ aguas.

Como parte del agua original, $1\frac{1}{2} / 2 = \frac{3}{4}$.

Respuesta: Tres cuartas partes del agua

Ejercicios

1. Explique con sus palabras por qué se compara la disociación con la evaporación, usando el horno abierto y el cañón sellado.

Pista: ¿Qué pasa cuando el vapor, o el gas, puede escapar, y cuando no puede?

Respuesta: En los dos casos, si el vapor o el gas no se retira, su presión sube hasta el mayor valor fijado por la temperatura y el proceso se detiene; añadir más lo hace retroceder, quitar un poco lo deja seguir. El horno abierto es como un vaso de agua abierto, donde todo se va; el cañón sellado es como un frasco cerrado, donde el cambio se detiene a medias.

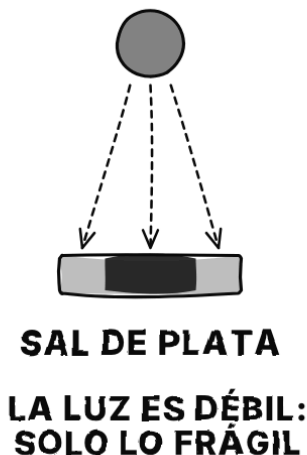
2. Lavoisier no pudo romper los compuestos del potasio y el sodio con el oxígeno. Explique cómo lo hizo Davy, y por qué el método pasó después a las fábricas.

Pista: Piense a qué polo van los metales y qué abarató la corriente.

Respuesta: Davy hizo pasar una corriente galvánica por esos compuestos, y los metales aparecieron en el polo negativo. Más tarde, las dinamos movidas por combustible o por la fuerza del agua abarataron la corriente, y su método se convirtió en una manera rentable de obtener sodio de la sosa cáustica fundida y cloro de disoluciones de sal.

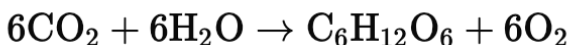
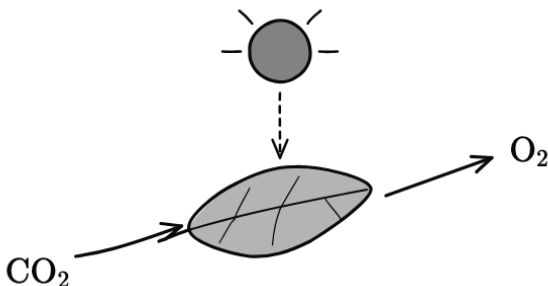
Luz, golpes, tiempo y contacto

Deje un terrón de azúcar en la mesa y no le pasa nada durante años. Muela el mismo azúcar hasta un polvo fino, soplelo en nube a través de una llama, y destella. Los molinos de harina y las fábricas de azúcar tienen mucho cuidado con el polvo precisamente por esto: una nube de polvo fino puede arder en un instante. La misma sustancia, el mismo aire, la misma llama; la única diferencia es cuánto azúcar toca el aire. Esta última parte trata de esas condiciones, las que además del calor y la electricidad dirigen una reacción: la luz, los golpes y la presión, el tiempo y el contacto.



Terrón y polvo; luz sobre la plata

Primero la luz. Algunos compuestos inestables se deshacen cuando la luz cae sobre ellos, y en eso se basa la fotografía, con sales de plata que se oscurecen donde da la luz. Pero la luz es un agente débil, dice Mendeléiev, porque el trabajo mecánico de sus vibraciones es muy pequeño, así que en condiciones corrientes solo puede romper compuestos frágiles. Y sin embargo en las plantas la luz hace algo que, en su época, era un enigma sin resolver. El gas de ácido carbónico es tan estable que el calor y la corriente apenas lo tocan, y sin embargo en las hojas verdes, a la luz, se descompone y se desprende oxígeno. En la notación actual el cambio global es $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$. En palabras: el dióxido de carbono y el agua, impulsados por la luz, se convierten en azúcar y oxígeno. Cuente los oxígenos para ver que las cuentas cuadran: a la izquierda $6 \times 2 + 6 \times 1 = 18$; a la derecha $6 + 6 \times 2 = 18$. La luz también puede iniciar combinaciones: el cloro y el hidrógeno se combinan no solo al calentarlos sino cuando la luz los ilumina.

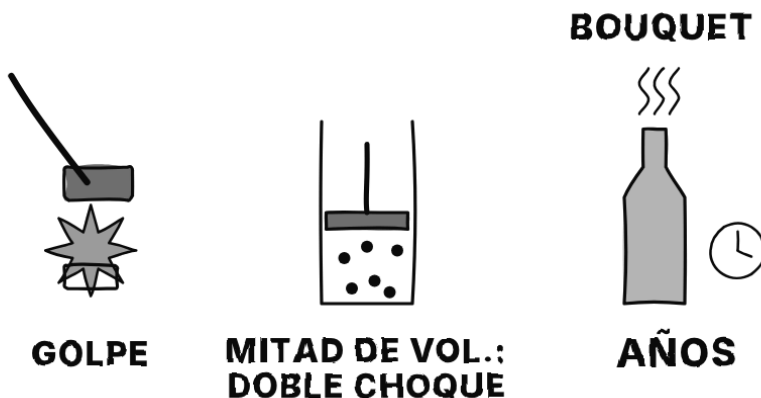


$$\text{O} : 6 \times 2 + 6 = 18 = 6 + 6 \times 2$$



La luz en una hoja verde

Luego, las influencias mecánicas, que también pueden impulsar tanto la combinación como la descomposición. Algunas sustancias se descomponen con un simple roce o un golpe. El yoduro de nitrógeno, un compuesto de nitrógeno, yodo e hidrógeno, es una; el fulminato de mercurio del pistón de un arma, que estalla cuando lo golpea el martillo, es otra. El roce puede hacer arder el azufre usando el oxígeno que guarda la sal de Berthollet. La cabeza de una cerilla de seguridad funciona con la misma idea: el roce contra la caja inicia una reacción entre un combustible tipo azufre y una sal rica en oxígeno.



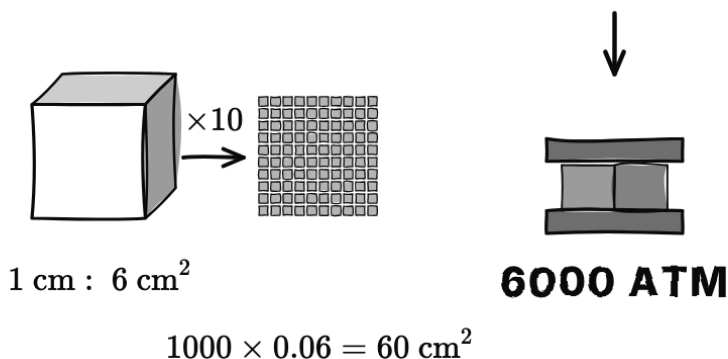
Golpes, presión y tiempo

También importa la presión, junto con la temperatura, y sobre todo para los gases, cuyo volumen cambia mucho con la presión. Apriete un gas a la mitad de su volumen y sus partículas se encuentran con las de otra sustancia más o menos el doble de veces. Por eso el hidrógeno comprimido actúa con más energía sobre el yodo y sobre disoluciones de muchas sales, a una temperatura adecuada.

Luego, el tiempo. Toda reacción necesita tiempo de dos maneras. Primero, hay que juntar las sustancias, y ese movimiento tiene una velocidad limitada: un trozo de carbón arde por su superficie, y solo tan rápido como queda al descubierto superficie nueva y llega aire nuevo. Segundo, incluso tras el contacto completo, la reorganización interna que es la reacción misma va a su propia velocidad definida. El

ejemplo familiar de Mendeléiev es el envejecimiento del vino. El vino joven contiene ácidos y alcohol por separado; al guardarlo, reaccionan lentamente por doble descomposición para dar agua y éteres compuestos fragantes, que hoy llamamos ésteres, y que forman el «bouquet». La reacción es reversible, $\text{ácido} + \text{alcohol} \rightleftharpoons \text{éster} + \text{agua}$, y a la temperatura de la bodega su velocidad está claramente limitada, según el calor y otras condiciones. La mayoría de las reacciones vistosas que encuentra un principiante van tan rápido que el tiempo puede ignorarse, pero las lentas como esta son muchas.

Por último, y quizá lo más sorprendente, está el estado de contacto. Aumentar el número de puntos de contacto es, en igualdad de lo demás, hacer que una reacción vaya con más fuerza. El ácido sulfúrico tranquilo bajo el gas oleificante, que llamamos etileno, no lo absorbe, pero agite los dos juntos mucho rato y sí lo hace, porque los puntos de contacto se multiplican enormemente. Los sólidos deben molerse lo más fino posible y mezclarse bien para reaccionar del todo y de prisa.



Diez veces la superficie

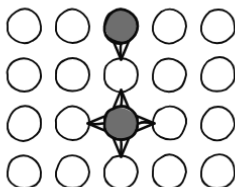
Pongamos un número a lo que hace moler. Un terrón de azúcar de un centímetro de lado tiene una superficie de $6 \times 1 \times 1 = 6$ centímetros cuadrados. Córdelo en cubitos de un milímetro de lado: hay $10 \times 10 \times 10 = 1000$, cada uno con una superficie de $6 \times 0,1 \times 0,1 = 0,06$ centímetros cuadrados. Juntos son $1000 \times 0,06 = 60$ centímetros cuadrados, diez veces la superficie del terrón entero. En palabras: cada vez que hace los trozos diez veces más pequeños, la superficie que puede tocar el aire u otra sustancia se multiplica por diez, y por eso la nube de polvo de azúcar puede destellar.

El químico belga Spring llevó el contacto al extremo. Polvos de sólidos que no reaccionan a temperatura ambiente, mostró, reaccionan bajo una gran presión: a 6000 atmósferas el azufre se combina con

muchos metales, y los polvos de muchos metales forman aleaciones, todo a temperatura ordinaria. La explicación de Mendeléiev es el aumento de los puntos y planos de contacto, y muestra que los sólidos, como los líquidos y los gases, tienen movimiento interno y partículas móviles.

Luego añade una idea profunda. Una partícula en lo hondo de una sustancia es atraída por sus vecinas desde todos los lados; una partícula en la superficie es atraída solo desde un lado. Así que la materia en una superficie está en un estado distinto, y donde toca otro cuerpo ese estado puede cambiar como si se hubiera subido la temperatura. Esto explica toda una clase de reacciones que solo ocurren en presencia de ciertos cuerpos, que Mendeléiev llama reacciones de contacto, o catálisis. Los cuerpos porosos y en polvo lo hacen mejor, sobre todo el platino esponjoso y el carbón. El gas sulfuroso no se combina directamente con el oxígeno, pero sobre platino esponjoso sí, desprendiendo calor: en la notación actual, $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$, con el platino sin cambiar al final. El catalizador bajo un coche moderno usa el mismo truco, con una película fina de metales del grupo del platino que ayuda a reaccionar a los gases de escape cuando pasan.

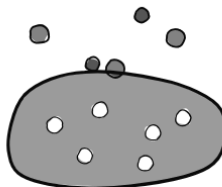
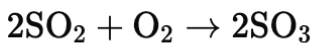
SUPERFICIE



DENTRO



**LOS GRANOS SE
DISUELVEN ANTES**



PLATINO ESPONJOSO

**CATALIZADOR
DEL COCHE**

Superficies y catálisis

Pruébalo

Eche un terrón de azúcar entero en un vaso de agua fría y una cucharadita de azúcar granulado en otro, y no remueva. Anote cuánto tarda cada uno en desaparecer. El azúcar granulado se disuelve mucho más rápido, aunque es la misma sustancia en la misma agua. Sus muchos granos pequeños ofrecen mucha más superficie, los puntos de contacto que, según Mendeléiev, aceleran toda reacción.

Mendeléiev termina su introducción con una breve reflexión. Todas estas ideas generales solo cobran su verdadero sentido cuando se

conocen las sustancias y reacciones particulares, que es adonde va ahora el libro. Aun así, era necesario empezar con los principios más amplios, la conservación de la materia y de la energía, porque solo con ellos el estudio de lo particular puede ser abarcable y fecundo. Así este curso termina donde empieza su química: con la balanza en una mano y la ley de conservación en la otra.

Para recordar

La luz rompe compuestos frágiles, como en la fotografía, y en las plantas parte incluso el estable gas de ácido carbónico, desprendiendo oxígeno; también puede iniciar combinaciones, como la del cloro con el hidrógeno. Los golpes, el roce y la presión pueden iniciar reacciones, desde los pistones hasta el hidrógeno comprimido que actúa sobre el yodo. Las reacciones llevan tiempo, tanto para que las sustancias se encuentren como para la reorganización misma, como en el lento envejecimiento del vino. Más contacto significa una reacción más rápida: moler un terrón en milésimas partes da diez veces la superficie, y Spring hizo reaccionar polvos bajo una gran presión. Superficies como el platino esponjoso pueden hacer reaccionar sustancias que de otro modo no lo harían, y todo ello descansa en la conservación de la materia y la energía.

Preguntas

1. ¿Por qué la luz, en condiciones corrientes, solo puede descomponer compuestos frágiles?

- a. Porque el trabajo mecánico de las vibraciones de la luz es muy pequeño
 - b. Porque la luz solo llega a la superficie de un cuerpo
 - c. Porque la luz solo actúa sobre la plata
 - d. Porque la luz produce combinaciones, nunca descomposiciones
2. ¿Por qué comprimir un gas hace que reaccione con más energía con otra sustancia?
- a. Porque la presión convierte el gas en líquido
 - b. Porque sus partículas se encuentran más a menudo con las de la otra sustancia
 - c. Porque la presión añade calor al gas
3. El ácido sulfúrico solo absorbe el gas oleificante tras agitarlo mucho rato. ¿Cuál es la razón?
- a. Agitar calienta el ácido
 - b. Agitar hace más pesado el gas
 - c. Agitar multiplica enormemente los puntos de contacto
 - d. Agitar saca el aire del recipiente
4. ¿Cómo explica Mendeléiev que el platino esponjoso haga combinarse el gas sulfuroso con el oxígeno?
- a. El platino se combina con el oxígeno y se gasta
 - b. El platino desprende su propio calor
 - c. El platino aporta azufre extra
 - d. En una superficie las partículas son atraídas solo desde un lado, así que la materia que la toca cambia como si se calentara

Respuestas

1. **a)** La luz es un agente débil porque el trabajo mecánico de sus vibraciones es muy pequeño, así que solo puede romper compuestos frágiles.
2. **b)** El volumen de un gas cambia mucho con la presión, así que apretado en un volumen menor sus partículas se encuentran más a menudo con las de otra sustancia.
3. **c)** Agitar los dos juntos multiplica enormemente los puntos de contacto, y más contacto hace que una reacción vaya con más fuerza.
4. **d)** La materia en una superficie está en un estado distinto, y donde toca otro cuerpo ese estado puede cambiar como si se hubiera subido la temperatura; eso es la catálisis.

Ejercicios

1. Explique con sus palabras las dos maneras en que una reacción necesita tiempo, usando la combustión de un sólido y el envejecimiento del vino.

Pista: Una trata de juntar las sustancias; la otra, de lo que pasa una vez que se tocan.

Respuesta: Primero, hay que juntar las sustancias, y eso tiene una velocidad limitada: un sólido arde por su superficie, solo tan rápido como llegan superficie nueva y aire nuevo. Segundo, incluso tras el contacto completo, la reacción misma va a su propia velocidad definida: en el vino, los ácidos y el alcohol reaccionan lentamente para dar agua y éteres compuestos fragantes, una reacción reversible que tarda mucho a temperatura ordinaria.

2. Spring hizo combinarse el azufre con metales a temperatura ordinaria. ¿Cómo lo hizo y qué muestra eso sobre los sólidos?

Pista: Piense en lo que una gran presión hace a polvos que se tocan.

Respuesta: Prensó los polvos a unas 6000 atmósferas, lo que aumentó los puntos y planos de contacto entre ellos. Muestra que los sólidos, como los líquidos y los gases, tienen movimiento interno y partículas móviles, así que pueden reaccionar cuando el contacto es lo bastante estrecho.

3. ¿Por qué empieza Mendeléiev su libro con principios generales, la conservación de la materia y de la energía, antes que con las sustancias particulares?

Pista: ¿Cómo sería el estudio de lo particular sin ellos?

Respuesta: Las ideas generales solo cobran todo su sentido con las sustancias particulares, pero los principios más amplios tenían que ir primero, porque solo reconociendo la conservación de la materia y de la energía puede el estudio de lo particular ser abarcable y fecundo.