



INTRODUCCIÓN

Hasta hace poco se tenía el convencimiento de que la imagen científica final del mundo sería hermosa, ordenada y sencilla, pero a medida que aquélla se ha ido enriqueciendo, nos hemos llevado muchas sorpresas. La belleza existe, pero no es como se la suponía; el orden también existe, pero no silencia nuestras preguntas; la sencillez ha desaparecido.

No se podría encontrar mejor ejemplo que el tema de este libro. La materia es el mundo en derredor nuestro; es todo lo que vemos, sentimos y tocamos. Nos parece muy familiar hasta que leemos lo que los científicos han descubierto acerca de ella durante los últimos 50, los últimos 20, los últimos 2 años. Así el brillante, por ejemplo, parece a primera vista de resplandeciente consistencia; pero a medida que vamos leyendo nos enteramos de que es un conjunto ordenado de átomos, los cuales son a su vez principalmente espacio vacío, y motas infinitesimales de protones y neutrones. Sabemos ahora que todo eso es materia, pero no estamos, ni mucho menos, seguros de que la imagen sea completa. En el interior del minúsculo corazón del átomo — el núcleo — se han hallado no menos de 30 clases de partículas elementales, y nadie puede decir qué otras cosas saldrán del bombardeo nuclear. Cuanto más analizan los científicos, menos evidentes parecen las respuestas.

Los misterios de la materia han estimulado la gran exploración intelectual de nuestro tiempo. Hay dos razones por las cuales debemos compartir este entusiasmo. Una de ellas es la diversión, el placer estético de penetrar más profundamente en lo desconocido; la otra son los conocimientos que obtenemos como resultado.

Debemos poseer esos conocimientos, no sólo por sí mismos, sino también por el poder que ponen en nuestras manos. Si entendemos la naturaleza de la materia, podemos controlarla para nuestros usos, mortíferos o benéficos. Un pedazo de uranio parece tan inactivo como cualquier otro trozo de roca. Las primeras investigaciones sobre la estructura de tales trozos parecían ser sólo un ejercicio académico. No obstante, en el curso de una generación, los gobiernos gastaban

miles de millones de dólares en proyectos científicos, que eran consecuencia directa de los primeros inocentes experimentos. Había sucedido que los científicos encontraron una manera de liberar cantidades de energía que el hombre nunca tuvo a su disposición. Los resultados han cambiado la historia del mundo durante 20 años.

Algo semejante puede suceder de nuevo, y es probable que ocurra. Y si bien los científicos y los políticos tomarán finalmente las decisiones que sean necesarias, los ciudadanos responsables tendrán que hacer sentir lo que piensan. Y no podrán hacerlo a menos de que comprendan de qué se trata. La ciencia nos proporcionará un mundo mejor, solamente si hay suficientes personas que se cercioren de que sea así, lo cual significa que, para empezar, tenemos que adquirir los conocimientos que nos ayuden a comprender. Este libro es un paso en tal dirección.

C. P. SNOW

EL AUTOR

RALPH E. LAPP ha desempeñado en la era atómica un papel poco corriente. Como físico ha participado en el desarrollo de la bomba atómica, y ha sido de los primeros en interpretar la ciencia para el gobierno y la industria, así como, en conferencias, artículos y libros, para el hombre de la calle. Ha publicado nueve que abarcan desde el libro de texto *Nuclear Radiation Physics*, hasta bestsellers como *Kill and Overkill*, un análisis de los problemas críticos que ofrece la política defensiva en la era de la bomba H.



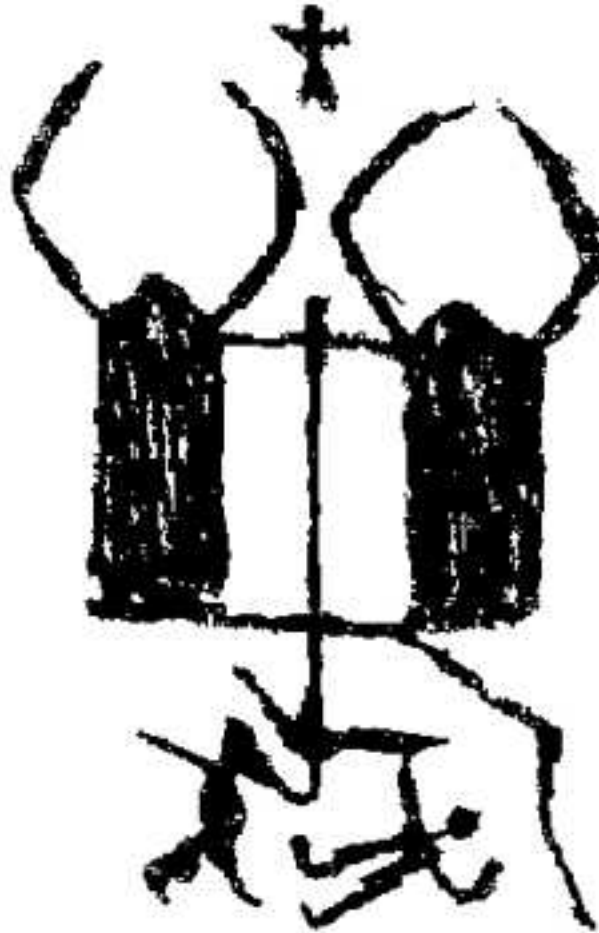
Capítulo 1

La eterna búsqueda de la sustancia



LA POTENCIA DE UNA ROCA. La curiosidad del hombre sobre la materia ha sido recompensada. La roca que inspecciona un estudiante de la National Youth Conference on the Atom en 1961, es un trozo de mineral de uranio. Al ser descubierto en 1789 el uranio parecía un metal indiferente, gris e inútil; desde entonces se ha convertido en fuente de energía para la guerra y la paz.

Hace millones de años un precursor del hombre se encontró con una piedra del tamaño de la mano, a la cual la erosión había accidentalmente proporcionado un borde agudo; al manejar aquel extraño utensilio, lo encontró útil, tanto para tallar una rama como para luchar contra un enemigo.



UN USO TERRENAL PARA EL BRONCE. Este dibujo de dos bueyes que tiran de un arado, con la ayuda de tres campesinos, fue grabado en una roca de los Alpes italianos en la Edad del Bronce. Durante este periodo prehistórico, el hombre por vez primera martilló y fundió bronce, fabricando herramientas tales como rejas de arado. La primera aleación fue una mezcla de cobre y estaño: cuanto más estaño, tanto más duro es el bronce.

En junio de 1962 los físicos del sincrotrón rompe-átomos de 33 mil millones de electrón-voltios de Brookhaven, Long Island, dispararon partículas atómicas a través de una plancha blindada de 12 metros de espesor y descubrieron la existencia de dos diferentes variedades de neutrino, misteriosa y evasiva partícula,

lo más cercano a la nada que algo pueda ser, y tan penetrante que puede atravesar 160 billones de kilómetros de plomo como una bala atraviesa una nube.

Aunque inmensamente lejanos en el tiempo y en la inteligencia, el hombre primitivo con su piedra, y el hombre moderno con su complejo sin- crotón, se ocupaban de la misma empresa: la investigación de la materia. Diferían sólo en su intención: el primero trataba de utilizar la materia; su civilizado sucesor trata de comprenderla.



MINA DE COBRE DIVINA. Dioses y diosas trabajan con sus manos en la mina de cobre representada en esta tableta griega de arcilla, del siglo VI a.C. Hermes maneja un hacha (derecha). Anfitrite carga mineral (centro) y Poseidón pasa una cesta cargada de mineral a una joven diosa (izquierda). El cobre fue descubierto en forma de metal puro durante la Edad de Piedra, hacia el año 8000 antes de Jesucristo.

El estudio de la materia ha enseñado al hombre a guisar, vestirse, fabricar herramientas, desbrozar la maleza, arar la tierra, construir ciudades, viajar a través de los mares y subir al espacio exterior. Le ha dado los medios de destruirse en guerra termonuclear, o bien la esperanza de eliminar algún día su peor maldición, la pobreza, cuando logre utilizar la energía del hidrógeno pesado del mar.

Pero, a pesar de todo lo que hemos aprendido de la materia, persisten parte de sus fundamentales misterios. Cuanto más indagan los científicos, mayor complejidad encuentran. Por ejemplo, ahora saben que casi nada, ni siquiera el más duro

diamante, es realmente compacto; que el átomo — corazón de la materia — es casi todo espacio vacío; y que si todos los átomos se redujesen a esferas no mayores que su núcleo, entonces el monumento a Washington podría comprimirse en un espacio no mayor que una goma de borrar.

Pero, ¿qué es en realidad la materia?

«Aquello que ocupa espacio», dice el diccionario; «aquello que constituye la sustancia del universo físico...». La tierra, los mares, la brisa, el sol, las estrellas — todo lo que el hombre contempla, toca o siente — es materia. También lo es el hombre mismo. La palabra misma deriva del latín *mater*, madre. La materia es tan dura como el acero, tan adaptable como el agua, tan informe como el oxígeno del aire. Cada uno de sus estados — sólido, líquido y gaseoso — puede pasar a los otros a diferentes temperaturas. Pero cualquiera que sea su forma, la materia está formada por las mismas entidades básicas: los átomos.

La pequeñez del átomo embota la imaginación. Su diámetro es de unas dos cienmillonésimas de centímetro; se necesitaría más de un millón de átomos toándose de canto para igualar el grueso de esta página. En el interior del átomo está su núcleo central — de un diámetro del orden de la cienmilésima del átomo, pero que contiene el 99,9 %, de la totalidad de la «masa» —, toda su sustancia. En el interior del núcleo se encuentran dos de las tres clases de bloques de construcción del átomo, el protón y el neutrón. Fuera del núcleo está la tercera clase, el electrón. Como planetas alrededor del sol — la distancia entre los reductos interno y externo del átomo es proporcionalmente mucho mayor que la que hay entre el sol y la tierra —, los electrones giran sin cesar alrededor del núcleo a velocidades vertiginosas, sujetos a él por su fuerza de atracción eléctrica. Los electrones (que tienen menos del 0,1 por ciento de la masa del átomo) son una especie de apéndice atómico, pero son los que dan al átomo su personalidad básica.

Parentesco entre pianos y pinos

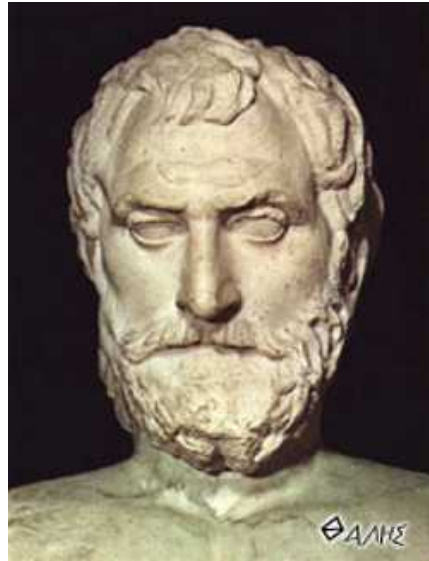
Todos los átomos tienen la misma estructura. Los protones, neutrones y electrones de un átomo son idénticos a los de cualquier otro, tanto si el átomo habita un piano como si forma parte de un pino. Los átomos de un elemento difieren de los de otro

sólo por el número de sus protones y electrones; es esta diferencia de número la que hace que un elemento sea lo que es.

A pesar de todo lo que el hombre ha descubierto de la materia, prosiguen sus esfuerzos. Sólo el gobierno de los EE.UU. gasta 500 millones de dólares anuales en investigación en ciencias físicas puras. En esencia, se trata de un viaje de exploración — a través de los canales de la física y la química — a las regiones aún desconocidas de la materia. La empresa se ha vuelto tan complicada que a los que en ella participan no se les llama ya físicos o químicos, sino químicos analíticos, radioquímicos, físicos nucleares, físicos del estado sólido, astrofísicos, cristalógrafos y plasmólogos — por no citar más que unas cuantas especialidades.

Ya ahora sus esfuerzos han transformado definitivamente nuestras vidas. Los aparatos para conservar alimentos, los tejidos sintéticos, los cohetes a chorro y armas nucleares, son el fruto de las investigaciones de químicos y físicos sobre el comportamiento y estructura de la materia. Los sistemas de computadores y las radios de transistores nacieron de las investigaciones de especialistas del estado sólido sobre el tipo de sólidos llamados semiconductores; el trabajo actual de estos hombres en la «microelectrónica» quizás haga pronto posible todo un circuito electrónico en la cabeza de un alfiler, y ha producido ya un amplificador fonográfico veinte veces más pequeño que una moneda de diez centavos.

Por prodigiosas que sean estas conquistas sobre la materia, atrae la posibilidad de otras victorias. Los científicos exploran ahora el llamado «cuarto estado de la materia», el plasma, que aparece cuando el tercer estado, el gaseoso, se calienta a temperaturas de varios miles de grados. En el estado de plasma, las partículas se mueven sin freno y con furiosa individualidad. Si se pudiese conseguir la unión de partículas de plasma de sustancias ligeras como el hidrógeno, se liberaría su enorme energía potencial; si se encerrasen y controlasen, su energía satisfaría las necesidades del mundo durante 20 mil millones de años.



UNA IDEA AGUADA DE LA MATERIA. Tales de Mileto tenía la teoría que todas las sustancias proceden del agua, y acabarían convirtiéndose en agua. Fue el primer intento humano de encontrar un común denominador, a la diversidad de la materia.

Un crítico moderno dice: Aunque hubiese propuesto... las melazas..., hubiera también sido homenajeado igualmente como padre de la ciencia especulativa moderna.

La unión de las partículas de plasma no puede ser conseguida a velocidad conveniente excepto a la increíble temperatura de 100.000.000 °C (el núcleo del sol tiene 14.000.000 °C). No es posible encerrar el plasma sobrecalentado dentro de un envase material. Pero, a pesar de estos formidables obstáculos, se presiente el progreso; científicos americanos y rusos han conseguido calentar plasma a unos 40.000.000 °C durante unas fracciones de segundo. Además, los investigadores creen que podrán conseguir encerrar el plasma en el interior de un campo magnético en forma de botella «inmaterial»; en los experimentos se consiguió retener algo de plasma por breves instantes.



UNA SIMETRÍA CUÁDRUPLE. Las ilustraciones de estas páginas presentan tres versiones — en un periodo de 2.000 años— de la clásica e incorrecta teoría de Aristóteles que todo lo materia estaba formado por cuatro elementos: fuego, aire, agua y tierra. A cada uno de éstos se atribuían dos de entre cuatro propiedades fundamentales: caliente, frío húmedo y seco. Según muestra el diagrama, Aristóteles creía que seco y frío se unían para formar la tierra; húmedo y caliente, el aire; caliente y seco, el fuego; frío y húmedo, el agua. La teoría fue adoptado por alquimistas y filósofos, y retrasó el progreso de la ciencia hasta el siglo XVII

En otra de las fronteras de la materia se está estudiando el cristal — ese cuerpo ordenado, en forma de enrejado, que forman los átomos de muchos sólidos. La mayor parte de los enrejados cristalinos contienen imperfecciones; un cristal sin un fallo sería la sustancia más fuerte conocida, hasta el punto que algunos metalúrgicos y físicos piensan que la construcción de un cristal metálico absolutamente puro sería una hazaña comparable a la escisión del átomo. Y es posible que se estén acercando a ese objetivo; algunos cortocircuitos en sistemas telefónicos y de radio han podido ser atribuidos a cabellos cristalinos ultrafinos sobre las superficies metálicas presentes, cadmio en un caso, revestimiento de cinc en otro. También se han encontrado «patillas» semejantes en muchos metales, y han sido también producidas en el laboratorio en condiciones atmosféricas diversas. No se sabe aún porqué se producen estos pequeños crecimientos, pero sus

posibilidades se están estudiando cuidadosamente. Por ejemplo, un pelo de hierro tiene una resistencia a la tracción de cerca de seis millones de kilos por centímetro cuadrado; si el hierro de esa calidad abundase, se podrían construir puentes y rascacielos más fuertes que los actuales, con mucho menos material,

La presa definitiva

Pero por muy interesantes que sean estos aspectos de la investigación de la materia, el objetivo principal de los científicos permanece invariable; .están aún buscando la respuesta fundamental a lo que es la materia, qué es lo que hace que las partículas elementales del átomo, electrón, protón y neutrón adopten sus formas y se comporten como lo hacen. En sus excursiones hacia el interior del átomo utilizan máquinas en las que no podía ni soñarse hace algunos años: rompe-átomos o «aceleradores de partículas» muy caros y de enorme potencia. El primero de estos artificios fue construido en 1932 y, según demuestran las fotografías y diagramas de las páginas 150 a 167, se han hecho cada vez más espectaculares. Gracias a tales instrumentos, los científicos confían en averiguar qué fuerzas operan en el interior del núcleo, y las reacciones que ocurren entre las partículas que intervienen.

Al producir transmutaciones en el interior del núcleo ya han identificado más de 30 partículas fundamentales, muchas de ellas inestables al nacer, y que a menudo se transforman en otras partículas. Pero cuanto más se sabe, más profundo se hace el misterio. Los físicos ya no están seguros que los protones, electrones y neutrones «ocupen espacio», según define el diccionario la materia. En efecto, algunas teorías definen estas partículas como ondas o puntos sin volumen, como dice un físico, «particularidades matemáticas que rondan por el espacio».

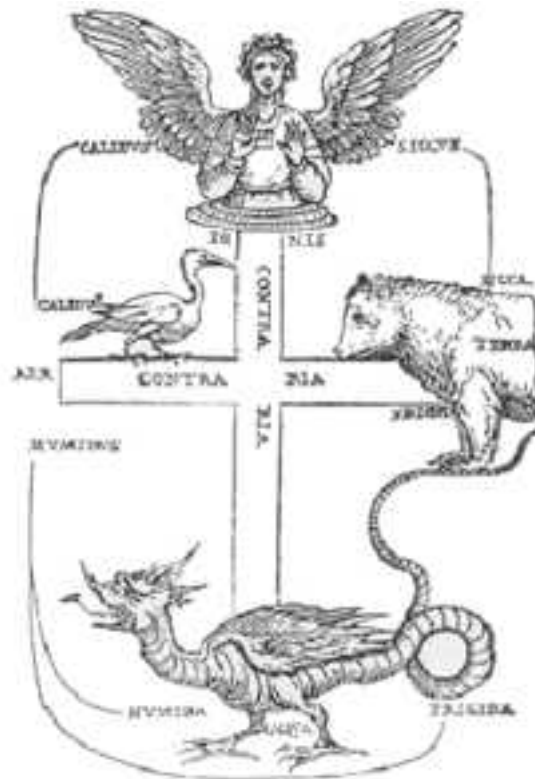
Comienza a parecer que la pregunta de «qué es la materia» no puede ser contestada — por lo menos actualmente — de manera definitiva e inalterable.

La curiosidad organizada del hombre respecto a la materia — teniendo en cuenta los milenios que lleva sobre la tierra — es relativamente reciente. Pero cada uno de los períodos de su manipulación de la materia ha aprovechado el precedente. La química moderna está en deuda con la imaginación y las técnicas de laboratorio de los alquimistas medievales. Los principios de la alquimia se basan en una teoría de

Aristóteles sobre los «cuatro elementos» del universo. Las meditaciones filosóficas de los griegos sobre la materia, incluso una teoría atómica de aspectos notablemente modernos, se basaban en observaciones de química rudimentaria transmitidas por los babilonios y egipcios.

Polos, piedras y progreso

El hombre prehistórico comenzó a comprender la materia por error, ensayo y accidente. Sus primeros encuentros con ella fueron cuando tuvo que escoger entre plantas sabrosas y venenosas; al descubrir que frotando dos palos uno con otro se producía fuego; al construir herramientas con pedernales y otras piedras duras. Los grandes adelantos vinieron con el descubrimiento de los metales.



DRAGÓN, ÁNGEL, PÁJARO Y BESTIA. Los elementos de Aristóteles eran personificados por criaturas vivientes, como en este dibujo (izquierda) de la "Pretiosa Margarita Novella", enciclopedia alquímica (Venecia, 1546). El dragón representa el agua; el ángel, el fuego; el pájaro, el aire y la bestia, la tierra. Los nombres latinos corresponden a los castellanos en el diagrama geométrico. La palabra latina Contraria sobre las cruces se refiere a la creencia que el aire es opuesto a la tierra, y el fuego al agua.

Puede que fuese el oro el primero en atraerle en las arenas de aluvi3n; pudo haber visto el primer resplandor del cobre en alg3n fuego extinguido con tierra que contuviese su mineral. Ocurri3 que el esta3o se fundi3 en sus fuegos, y descubri3 que el esta3o y el cobre juntos producían bronce. Luego vino el hierro, que probablemente le atrajo en forma de fragmentos de meteorito del espacio exterior. Aprendiendo a trabajar estos metales se inici3 en la ciencia de la materia que ahora llamamos metalurgia. Despu3 de los metales, se dio cuenta de otras materias: minerales coloreados que alegraban las paredes de su caverna, la materia vidriosa, vista quiz3s en forma de obsidiana, sustancia semitransparente que se encuentra en el residuo de las erupciones volcánicas. Entre los huesos del hombre de Pekín, que habit3 la tierra hace aproximadamente un mill3n de a3os, se han encontrado instrumentos de cristal de cuarzo.



DE LA QUÍMICA A LA ALEGORÍA. Los grabados, obra del artista flamenco Crispijn van de Passe (1564-1637), representan s aleg3ricas que simbolizan los cuatro elementos de Arist3teles. El fuego (ignis) sostiene teas y carbones ardiendo. El agua (aqua) maneja un cántaro, y al fondo un pescador realiza sus faenas. La tierra (terra) lleva los frutos de la misma, mientras un cazador persigue sus animales. El aire (aer) camina por las nubes, los pájaros vuelan en derredor y soplan los cuatro vientos.

El hombre prehist3rico se contentaba con aceptar estas particularidades de la materia, y qued3 para sus herederos de las civilizaciones del Oriente Pr3ximo el darse cuenta que la materia podía ser transformada. Una tableta de arcilla del a3o 6000 a. de J. representa la preparaci3n de cerveza con destino a los sacrificios. Jeroglíficos egipcios de 3400 a. de J. muestran prensas para vino. Aquellos primitivos fabricantes de vino y cerveza no debieron ser capaces de explicar la fermentaci3n y su dependencia de la levadura, hongo unicelular que se halla en el

aire y en las frutas maduras, pero se dieron cuenta que ocurría cierta transformación. También aprendieron a fundir ciertos minerales de sodio, formando vidrio; hacia 4000 a. de J. los egipcios pre-dinásticos fabricaban cuentas y jarros decorativos vidriando piezas de piedra o cuarzo. También aprendieron el arte de teñir, recordando que ciertos insectos y bayas manchaban los dedos. El colorante rojo procedía del intestino del insecto *kermes* (de donde carmesí); el azul, de la planta del índigo. En 1500 a. de J. los ciudadanos de Tiro, en Fenicia, ya sabían que la glándula de un molusco, el *murex*, se volvía amarilla al ser expuesta al aire, luego azul brillante y, finalmente, púrpura; la púrpura de Tiro se convirtió en símbolo de realeza. Luego, algún genio desconocido descubrió que el alumbre, una sustancia mineral blanquecina, contribuía a «fijar» el colorante en la tela. La aplicación de tales fijadores en diversas porciones de la misma tela producía una capa de muchos colores.

La importancia del peso

Como el hombre de aquellos tiempos no se daba cuenta del significado profundo de lo que efectuaba, generaciones posteriores han denigrado su papel en el progreso de nuestro conocimiento de la materia, pero no fue menos vital que la de los taumaturgos de laboratorio de hoy. En el curso de todas aquellas transformaciones primitivas de la materia se establecieron los rudimentos de la química; la formación de compuestos insolubles en la tintura, el típico proceso bioquímico de la fermentación, la reducción de minerales por técnicas de altas temperaturas. Y en los antiguos mercados se manifestó otro aspecto fundamental de la materia; al florecer el comercio, el peso de la materia adquirió importancia. Se hicieron imprescindibles los sistemas de pesos y medidas; así los babilonios idearon el shekel que pesaba 9,5 gramos, y el talento que pesaba unos 30 kilos.

Los primeros que dejaron de aceptar sin comentario la materia fueron los griegos. Ansiosos por saber, se alejaron en sus viajes, visitando los centros de cultura del Cercano Oriente y recogiendo mucha información sobre la química práctica que se empleaba en aquella parte del mundo. Luego, por discusión y deducción — eran los mayores habladores de la historia — los griegos procedieron a elaborar un imponente cuerpo de teoría sobre la materia.

El primero en exponer sus ideas fue el filósofo Tales de Mileto, seis siglos antes de Jesucristo. Pensando sobre la *physis* (naturaleza) de la materia, y sus propiedades, intentó — como siguen haciendo los hombres — hallar una respuesta que lo abarcase todo.



NO HAY PAZ PARA EL ALQUIMISTA

Algo más que los olores distraen a este alquimista que se tapa las narices. Es posible que su mujer, que le vigila mientras trabaja, le haya obligado a que convierta en oro una maloliente sustancia — como en este dibujo satírico de una crónica del siglo XV. "Mer des Hystoires." El gran alquímico alemán Helvetius dijo que su mujer con frecuencia venía "a implorar y molestarme para que hiciese experimentos..., diciendo que de no hacerlo no me dejaría dormir ni descansar en toda la noche..."

Su dictamen final fue que la sustancia básica del universo era el agua. Tales tenía buenas razones para creerlo así; de todas las cosas que estaban a su alcance, el agua era la que más se transformaba; líquida en su estado natural, se convertía en un sólido, el hielo, o en vapor en un caluroso día de verano.

Anaxímedes, contemporáneo de Tales, ideó otra teoría sencillamente soplando sobre su mano. Si soplabla con la boca abierta, el aire se sentía caliente; si soplabla con la boca casi cerrada, se sentía frío. Dedujo que el calor era producido por la

salida rápida del aire, y el enfriamiento por su compresión entre los labios. Lo acertó, pero exactamente al revés, como lo sabe quien haya hinchado un neumático o lo haya vaciado de aire. Pero de sus observaciones sobre la manera en que el aliento, que es esencial para la vida humana, puede ser comprimido y dilatado, Anaxímedes dedujo que el aire — que infunde toda la naturaleza con sus características siempre cambiantes — era la sustancia básica del universo.

En el siglo V a. de J. un griego llamado Heráclito propuso la idea que el fuego era el constituyente básico de la materia. Estaba siempre cambiando; una llama crecía, vacilaba o se apagaba, pero siempre era fuego. Heráclito creía que en ese cambio constante y en esa constante identidad, la materia revelaba su esencial unidad.

Amor, odio y una teoría

Al agua, el aire y el fuego, Empédocles, un griego de Sicilia, añadió la tierra, combinando la teoría de los cuatro «elementos» o raíces. Éstos, afirmaba, se unen o separan en presencia de unas fuerzas llamadas amor y odio. La teoría de Empédocles era hasta cierto punto razonable. La tierra, el agua y el aire representan los tres estados corrientes de la materia, y el fuego es energía, el agente que hace que la materia pase de una forma a otra.

Pero de todas las ideas griegas sobre la materia, la más atractiva fue la propuesta por un filósofo llamado Leucipo, y más tarde por su discípulo Demócrito.



EL PINTORESCO CÓDIGO DE LA ALQUIMIA. Como la ambición primordial de los alquimistas era la conversión de metales baratos en oro, llegaron a formar un pequeño grupo que ocultaba sus fórmulas, tanto a los no iniciados como entre ellos mismos, representándolas por símbolos secretos, como los de arriba. En uno de estos códigos la estrella significaba cobre; la llave, sal común; la media luna y la corona, salitre; el pez, mercurio; el sol, sal amoníaco.

La materia, dijeron, no era sino una concentración de pequeñas partículas, o «átomos», tan pequeños que no podían dividirse. (La palabra griega *atoma* significa

indivisible.) Demócrito mantuvo que los átomos estaban en movimiento constante, que se combinaban de diversas maneras y se diferenciaban entre sí solamente en forma y disposición. Por extraño que parezca, esta excelente teoría atómica no era más que una especulación arbitraria, como muchísimas otras propuestas cada tarde en el foro de Atenas. No obstante, Demócrito iba por buen camino, si bien no se le hubiese ocurrido soñar que un día su átomo indivisible sería fragmentado en pequeños pedazos.

Demócrito estaba destinado no solamente a estar 24 siglos adelantado, sino a que le fuese negado el aplauso contemporáneo. Cuando poco después apareció Aristóteles y se convirtió en el hombre prominente de su tiempo, no solamente no aceptó aquella teoría, sino que la atacó con dureza, con lo cual, según algunos historiadores, retardó el desarrollo de la moderna teoría atómica durante un período de tiempo imperdonable. Aristóteles confirió su favor a la teoría de Empédocles. Según la versión aristotélica, la base del mundo material era un agua primitiva, la cual sólo existía en potencia hasta que se le daba forma. La forma originaba los «cuatro elementos», que se distinguían por sus características: caliente, fría, seca y húmeda. Ninguno de los elementos, afirmaba Aristóteles, era inalterable; uno de ellos se podía convertir en otro por mediación de la calidad que poseían en común. Sólo la forma cambiaba; la materia fundamental que componía los elementos no variaba.

Una dote de Aristóteles

Cuando se hizo la noche sobre la cultura griega, fue este concepto aristotélico el que formó la base filosófica del siguiente gran avance en la ciencia de la materia, la alquimia. De las suposiciones de Aristóteles los alquimistas dedujeron sus propios postulados sobre la unidad de la materia y la existencia de un agente transmutador, llamado Piedra Filosofal, el cual — de ser hallado — podría convertir los metales en oro, y convertirse también en la medicina perfecta del hombre, el *elixir vitae*, o elíxir de la vida.

No se sabe cuándo ni dónde apareció el arte de la alquimia. Sus adeptos prosperaban en Oriente y en Occidente. Dos siglos después de Jesucristo, un tal Wei Po Yang escribió el primer tratado chino sobre la preparación de un elíxir que tituló

«píldora de la inmortalidad». Los primeros alquimistas occidentales fueron griegos alejandrinos de la misma época. La palabra alquimia se deriva del árabe *alkimia*, en la cual *al* es el artículo definido y se cree que *kimia*, o bien procede del griego *chyma*, que significa fundir o moldear un metal, o de *chem*, «la, tierra oscura», nombre que los antiguos egipcios daban a su país.

En las páginas que siguen aparecen algunas de las charlatanerías y de los éxitos de la alquimia. En cuanto a la base filosófica aristotélica, se convirtió con el tiempo en una «doctrina de los contrarios». Los elementos contrarios, u opuestos, eran el azufre, que representaba el fuego o la combustibilidad, y el mercurio, que representaba el agua, o la fusibilidad o liquidez. Se creía que estas dos cualidades entraban en contacto en las profundidades de la tierra y que — según sus proporciones y grado de pureza — producían metales bajos como el plomo, o nobles como la plata y el oro.

Pero si hemos llegado a considerar la alquimia como una empresa de locos, su principio fundamental — que todas las formas de materia tienen un origen común, que poseen un «alma» permanente encerrada en una diversidad de cuerpos temporales, y que estos cuerpos pueden ser transmutados unos en otros —, se asemeja al concepto de unidad de la materia que mantiene la física de hoy.

En realidad la ciencia no deja de estar en deuda con la alquimia. En sus intentos por demostrar sus creencias, los alquimistas examinaron y ensayaron prácticamente todas las sustancias conocidas, descubriendo muchas propiedades de diversos productos químicos. Francis Bacon, brillante inglés del siglo XVI, que encabezó el método científico, resumió muy sagazmente la contribución de la alquimia a la ciencia:

«La alquimia puede compararse al hombre que dijo a sus hijos que les había dejado oro enterrado en su viñedo; si bien no encontraron oro, al sacar al aire el moho de las raíces de las vides, consiguieron una vendimia abundante. Así la búsqueda y la investigación para hacer oro han procurado muchas invenciones útiles y han conducido a muchos experimentos instructivos.»

A decir verdad, los alquimistas no estaban del todo equivocados. Hoy sabemos que el plomo difiere en esencia del oro por tener en su núcleo 82 protones, frente a los 79 del oro. Debe ser por lo tanto posible convertir plomo en oro modificando su

núcleo. La ciencia ha proporcionado medios - de conseguir transmutaciones «alquímicas», pues en el interior de los grandes aceleradores de partículas los constituyentes atómicos de la materia pueden ser ahora redistribuidos sin destruir la unidad básica de la misma.



TEORÍA MONSTRUOSA

La imagen aparecía en «The Crowne Nature», libro del siglo XVI, obra de un inglés desconocido; es la imagen de una criatura que representa la «esencia del mercurio», que los alquimistas creían ser el ingrediente fundamental de la materia.

Los tres brazos de la bestia blanden, de izquierda a derecha, los símbolos alquímicos de la plata, el oro y el mercurio.

LA ALQUIMIA EN BUSCA DEL SENTIDO DE LA MATERIA

Al hombre siempre le ha preocupado 'a sustancia que está hecho el mundo, y nunca la búsqueda de este misterio ha sido más pintoresca que en la era de la alquimia,

extraña combinación de ciencia y magia que floreció hasta bien pasada la Edad Media. Experimentando siempre, meditando sin cesar sobre la naturaleza de la materia, el alquimista representaba sus conceptos por medio de dibujos como el pintoresco dragón de tres brazos de la página siguiente.



ELIXIR ORIENTAL. Este grabado oriental moderno muestra al alquimista Sun Po ejerciendo su magia al aire libre, hace unos 2.000 años. Se decía que Sun Po hacía arder los árboles, curaba a los enfermos diciendo ¡Sé curado! Preparó un elixir de la vida y desapareció.

Pero si bien sus especulaciones le llevaban con frecuencia al reino de lo oscuro y lo metafísico, sus objetivos en el laboratorio eran claros y concretos: convertir los metales bajos en oro y encontrar el «elíxir de la vida» que haría inmortal al hombre. La alquimia tenía sus charlatanes, pero los mejores alquimistas eran investigadores, y los científicos de toda época suscribirían la plegaria del alquimista: «Purga la horrible oscuridad de nuestra mente, enciende una luz para nuestros sentidos».



CIELO FAVORABLE PARA LA ALQUIMIA. Los alquimistas invocaban con frecuencia la astrología, según el texto de arriba. El planeta Marte cabalga sobre un carnero (Aries) y blande un escarpión (Scorpio). Éstos eran augurios favorables para el proceso representado por el alambique en la parte trasera del animal.

UN ANSIA MUNDIAL DE VIDA ETERNA Y LUCRO

La alquimia se extendió por todos los rincones del mundo civilizado — desde las colinas de China a laboratorios europeos como el de aquí arriba. Los primeros alquimistas occidentales fueron griegos alejandrinos, quienes pensaban que se podían transmutar directamente los metales en oro, pero la mayoría de los europeos que les siguieron creían que no podía transmutarse nada sin tener la “Piedra Filosofal”. Existían muchas teorías sobre la naturaleza de esa sustancia — si era una verdadera piedra, una tintura o un polvo.

En general se cubría con cera y dejaba caer en el metal fundido que se trataba.

Algunos alquimistas europeos también se dedicaron a la busca del elixir de vida eterna, idea que probablemente procedía de la alquimia china (enfrente, arriba), a través de los textos islámicos (enfrente).



BUEN NEGOCIO EN OCCIDENTE. En este cuadro del siglo XVII, obra de David Teniers el Joven, un alquimista está agitando un crisol, mientras ordena atizar el fuego a su ayudante. El gorro del maestro es el signo de un "adepto", de uno que pretendía la transmutación de metales bajos en oro.

Se atribuía a los chinos el brebaje que conservaba la vida. Uno escribió: “Cuando el polvo dorado entra en las cinco entrañas, se disipa la niebla, como las nubes son dispersadas por el viento... El viejo vuelve a sentirse joven y lozano”

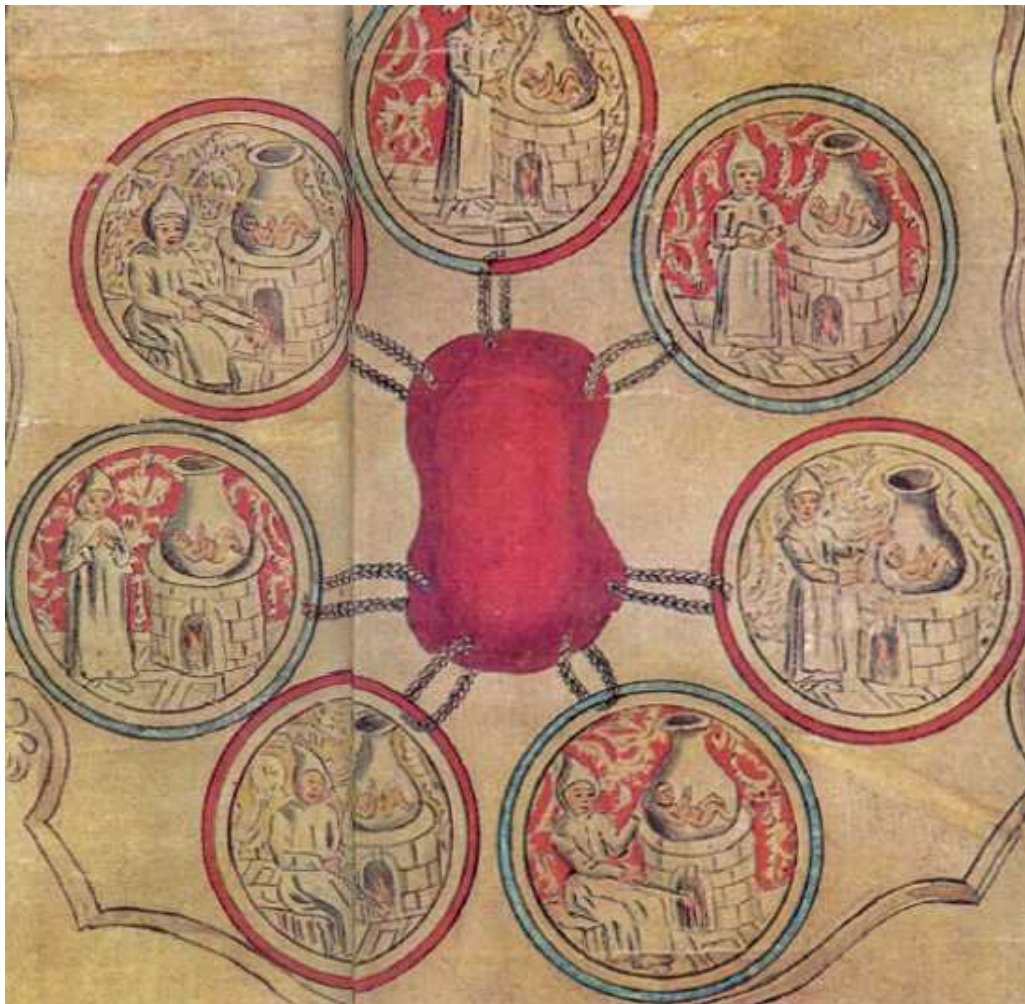
REINOS MISTERIOSOS DE SÍMBOLOS Y ALEGORÍAS

Los alquimistas acostumbraban a envolverse en el misterio. Pero para transmitir sus conocimientos a sus discípulos escribieron libros llenos de ilustraciones alegóricas y simbólicas, algunas de las cuales aparecen en estas páginas. Un metal bajo se simboliza por medio de un sapo, un dragón o un ser humano. Su esencia se representaba como un pájaro blanco. En el credo de los alquimistas este simbolismo unía lo animado y lo inanimado. Creían que las transformaciones químicas podían mostrarse en términos de transformaciones humanas; que la unión de dos productos químicos era como un matrimonio; que la conversión de metales bajos en oro estaba en cierto modo relacionada con la conversión de la naturaleza humana en algo puro, noble y brillante.



LOS APUROS DE UN REY. La pintura de un manuscrito inglés de 1582, representa al metal mercurio como un rey a quien se está hirviendo vivo para obtener su vapor o alma, simbolizado por el pájaro blanco. Una parábola que lo acompaña significa que el rejuvenecer viene al ser cortado en pedazos y hervido, consiguiéndose así una renovación de fuerza y vida.

La búsqueda del elixir de la vida tenía también otros significados: la busca de una medicina perfecta o el símbolo del deseo por la realización del hombre íntegro; intento del hombre por perfeccionarse.



RIQUEZA EN UN MATRAZ

Del famoso «Ripley Scowle», que es una relación del trabajo del alquimista inglés George Ripley, el objeto rojo del centro es la Piedra Filosofal. Ripley pretendía que se podía fabricar en siete etapas, partiendo de la sustancia representado por el pequeño ser humano en el matraz: «Primero calcina, y después corrompe, disuelve, destila, sublima, desciende y fijo...». Las proezas alquímicas de Ripley le hicieron al parecer ganar lo bastante para poder dar £ 100.000 anuales a los Caballeros de San Juan de Jerusalén.



EL VUELO DE UNA PALOMA. Estos dibujos, son de «The Crowne of Nature». El matraz ilustra la creencia que cuando se calienta un metal, su espíritu, simbolizado por una paloma, sale del calcinado cuerpo. En disolución, el metal (centro) es simbolizado por un sapo. La paloma que vuelve a la disolución (abajo) anuncia el nacimiento de una sustancia más noble, tal vez oro.

MEZCLAS CASERAS Y AFICIONADOS OPTIMISTAS

Muchos alquimistas eran sabios de nobles impulsos, otros eran intrigantes en busca de riqueza rápida — como el grupo extasiado que aquí vemos — que convirtieron sus hogares en laboratorios de aficionados y arrastraron a sus familias a la ruina en su afán de sintetizar el oro.



EL PAGO DE LA AVARICIA. Este grabado, de un dibujo de Pieter Bruegel el Viejo, muestra lo que ocurre cuando un pobre aficionado se mete a alquimista. Mientras siembra una mezcla con su última moneda de oro, (para hacer oro, era necesario oro), su mujer se lamenta de ver la bolsa vacía y sus hijos exploran la desprovista despensa. El empleado lee la receta, su soplador atiza el fuego. El recuadro indica o dónde creía Bruegel conducirlo todo esta locura: al hospicio.

Esta desordenada escena está llena de típicos aparatos de alquimia: crisoles, calderos, ollas, cubas, jarras, matraces, morteros y sus manos, alambiques, filtros, un tamiz, una cesta de carbón vegetal, botes para drogas, fuelles de mano, tenazas, una paleta, un horno para hervir agua, un reloj de arena y unas balanzas. Materiales de toda clase iban a parar a los hirvientes crisoles de los alquimistas — sapos, orina, metales, animales, vegetales, minerales. Bernard de Treves en una ocasión utilizó más de 2.000 huevos. En otra ocasión empleó tres años en un solo experimento. Los alquimistas ineducados eran llamados “sopladores”, pues se pasaban día y noche soplando con sus fuelles. Uno de los cuentos de Canterbury, de Chaucer, es una de las más mordaces acusaciones pronunciadas contra todo el arte. Su advertencia al futuro alquimista:

*"Si queréis publicar vuestra necedad
Probad vuestra mano en la transmutación;
Si alguno de vosotros tiene en la mano dinero
Adelante, que se haga alquimista.
¿Creéis que el oficio se aprende con facilidad?
Venid, y quemaros los dedos..."*

En fórmulas secretas, nuevas instrucciones para viejos oficios

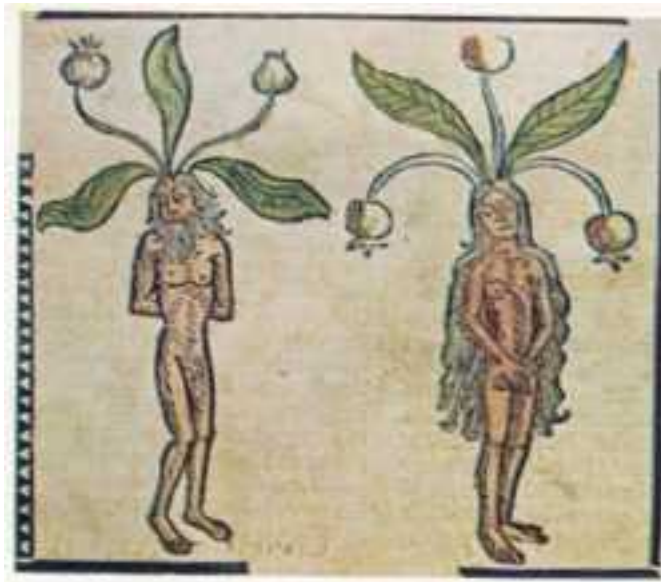
La siguiente receta fue hallada en un manuscrito atribuido al alquimista del siglo XIII, Roger Bacon: "De nitro toma 7 partes, 5 de ramitas jóvenes de avellano y 5 de azufre; y así llamarás al trueno y la destrucción, si conoces el arte". Hoy en día, esta receta produce pólvora.



UN MEDICO MODERNO PARA SU TIEMPO. En el grabado alemán del siglo XVI, vemos a un médico progresivo consultando a un alquimista sobre un remedio. La mayor parte de ellos eran escépticos respecto a los poderes curativos de las pócimas alquímicas.

Faltando a la costumbre profesional, en los siglos que siguieron a Bacon algunos alquimistas hicieron intercambios de conocimientos con otros artífices, boticarios, físicos, metalúrgicos. Según se ve en los grabados, los alquimistas dieron a la metalurgia hornos y otros aparatos para refinar y alear los metales. Con su conocimiento de los ácidos, las sales inorgánicas y las curas de hierbas, muchos se hicieron boticarios. Y los médicos, acostumbrados de antiguo a prepararse sus

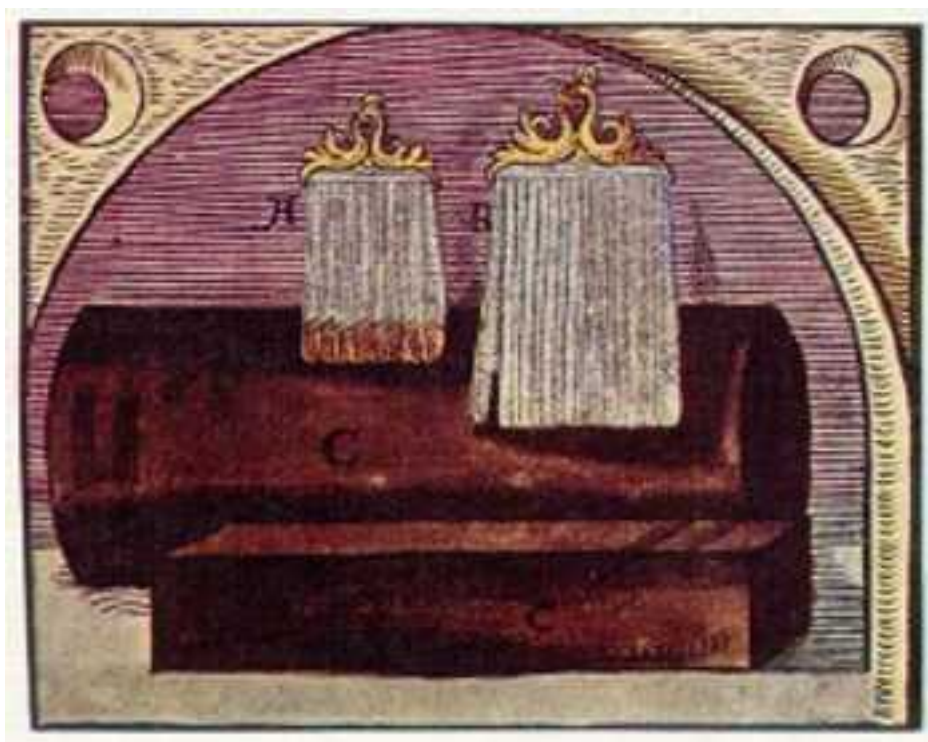
propias drogas, comenzaron a consultar a los alquimistas sobre sus recetas, comienzo de la relación entre médicos y farmacéuticos.



LA RAÍZ MÁGICA DE LA MANDRÁGORA. Debido a su forma, las raíces de mandrágora (derecha) fueron a menudo representadas como humanas, como en el grabado alemán del siglo XVI de la izquierda. Los alquimistas las arrancaban por medio de perros en plena noche.



INSTRUMENTOS DE LOS FUNDIDORES. Uno de los muchos oficios que se aprovechó de lo alquimia fue el trabajo de los metales. La escena muestra el aspecto de una «fábrica» de cobre en la Europa del siglo XVI. Muy parecida a un laboratorio de alquimia, utilizaba instrumentos y técnicas perfeccionados por los alquimistas. A es un pequeño horno de fundición donde se ensayaba el mineral de cobre; B es la puerta del horno; C es el mineral molido; D es otro horno de ensayo; E es un fuelle; F un depósito esférico para agua; G es una olla para fundir cobre con otros metales y formar aleaciones, y H es un crisol de ensayo. Este grabado, como los demás de esta página, es del libro de Lazorius Ercker publicado en Praga en 1574, una obra definitiva en su tema, durante 200 años.



ORO ENTRE LA PLATA. Los antiguos utilizaban primitivo instrumental para determinar el contenido en oro de la plata: A, horno de ensayo; B, bandeja de hierro; C, máscara para mirar en el horno; D, matraz; E, un metalúrgico pesando plata.



LA PRUEBA DE LA PIEDRA DE TOQUE

La metalurgia legó a la alquimia una variedad de cuarzo (arriba) llamada «piedra de toque» Cuando se frota el cuarzo con una muestra de oro se produce una marca amarilla cuyo color y consistencia revelan las impurezas del oro.

El legado del laboratorio

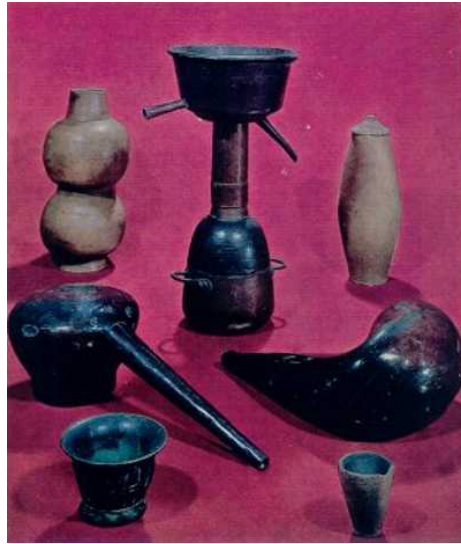
A pesar de toda su palabrería sobre dragones de tres brazos y reyes cocidos, los alquimistas dejaron una obra que les honra. Se les atribuye el descubrimiento de cinco elementos, antimonio, arsénico, bismuto, fósforo y cinc, así como el del alcohol y de muchos de los ácidos y álcalis que se encuentran en los laboratorios actuales. Perfeccionaron procesos químicos como la destilación y la cristalización, y la fundición y aleación de metales. Pero la mayor deuda de la química a su pintoresco antepasado es la idea del laboratorio mismo, con la práctica de los experimentos y los ingeniosos instrumentos que debían servir para descomponer la materia y volverla a componer. Mucho de este instrumental sobrevive aún en

museos europeos. En las fotografías de estas dos páginas mostramos algunas de estas reliquias.

La alquimia nunca consiguió su ambición de transformar un elemento en otro, y los presuntuosos científicos victorianos se burlaron de dicho objetivo. Pero los modernos físicos nucleares hallaron una sensacional versión de la Piedra Filosofal en los neutrones que iniciaron la reacción en cadena que hizo detonar la primera bomba atómica y transmutó el uranio en tres docenas de elementos químicos.



RELIQUIAS DE UN OFICIO PROHIBIDO. Esta foto del Museo de la Historia de la Ciencia de Oxford muestra una petición de 1457 dirigida a Enrique VI de Inglaterra por 12 alquimistas, quienes solicitaban ser eximidos de la ley que prohibía sus prácticas. La retorta, el mortero y los anteojos son de origen inglés.



INSTRUMENTOS PARA LA TRANSMUTACIÓN. Entre el instrumental alquímico de los siglos XVI, y XVIII que se conserva en Oxford se encuentra un alambique de "cabeza de moro", un crisol, una retorta, una vasija de arcilla, un mortero de bronce, un alambique destilador y un aludel condensador.



AROMA DEL PASADO. La Universidad polaca de Cracovia, una de las más antiguas de Europa, ha reconstruido un taller medieval con el ambiente de 1490, cuando Copérnico era estudiante. Con sus frascos, sus animales disecados y su disco del zodiaco con el dragón ardiente, esta reconstrucción intenta captar la atmósfera de un desaparecido laboratorio de alquimia.

Capítulo 2

Ingredientes fundamentales de un mundo complejo



LUZ EN LA OSCURIDAD DE LA ALQUIMIA. La escena de la página anterior, cuadro del inglés Joseph Wright de 1771, representa al alquimista Hennig Brand rezando después de haber descubierto en 1669 un extraño y nuevo elemento. Su laboratorio está iluminado por el resplandor de su nuevo hallazgo: el fósforo. Los alquimistas identificaron otros elementos: bismuto, arsénico, cinc, antimonio.

Si el más modesto propietario de entre nosotros contase todos los objetos que posee, con facilidad llegaría hasta los millares. Si su inventario fuese universal, e incluyese el contenido de fábricas, granjas y otros centros de actividad humana, el número total serían miles de millones. Tal es el fruto del ingenio del hombre; cuanto más civilizado se vuelve, tanto más llena está su existencia de toda clase de cosas que considera esenciales, amenas y de lujo. Pero lo extraordinario es que estas miríadas de objetos, por distintos que puedan ser su forma, aspecto o uso, están formados por compuestos de sólo 88 elementos, o sea, sustancias de características especiales y que no pueden ser reducidas químicamente a un constituyente más fundamental.

Esta provisión limitada de materiales ha producido la infinita variedad de cosas con las cuales vive el hombre, de la misma manera que un alfabeto de 26 letras proporciona la enorme cantidad de palabras con las cuales se comunica, gracias a diferentes combinaciones, disposiciones y yuxtaposiciones. Así como, por ejemplo, las letras a, e y r forman las palabras ara, era, are, rae, aérea, así los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno se encuentran en un bloque de papel, una goma de borrar, una gota de cola, un terrón de azúcar y un Martini seco.

Los elementos pertenecen a tres categorías: metales, que predominan (comprenden los tres cuartos del total), no metales y metaloides, que presentan algunas características de ambos (por ejemplo, el arsénico). En condiciones ordinarias algunos elementos, como el cloro y el neón, son gaseosos; dos, el mercurio y el bromo, líquidos; la mayoría son sólidos, desde algunos relativamente nuevos como el hafnio y el lutecio, hasta antiguos conocidos como el estaño y el hierro.

Además de los 88 elementos naturales hay otros 15, llamados «artificiales». Algunos han sido fabricados en el laboratorio, otros se forman por desintegración natural de elementos radiactivos. La mayoría de estas sustancias se transforman rápidamente en otras sustancias y son de vida cortísima; muchas no han sido producidas en cantidades suficientes para distinguirlas a simple vista.

Los elementos, naturales o artificiales, se agrupan en «familias», según la forma en que se comportan cuando se enfrentan con miembros de otras familias. Los más encopetados son los gases «nobles» que se mantienen separados de los demás elementos. Dos clanes mucho más democráticos son los halógenos, que forman

sales, y los metales alcalinos; ambos se asocian fácilmente con otros elementos. En cuanto al número total de familias, los científicos difieren. Algunos cuentan solamente ocho, otros - utilizando divisiones más precisas del comportamiento de un elemento - cuentan hasta 18.

Es evidente que los elementos han existido desde siempre, pero el hombre los ha conocido como tales en los últimos 300 años.

No se les había reconocido por lo que eran, debido a que rara vez aparecen en la naturaleza excepto combinados entre sí, formando compuestos químicos que en modo alguno se asemejan físicamente a sus progenitores.



EL DOCTOR FLOGISTO. Estas palabras eran el título original de esta caricatura del siglo XVIII que ridiculizaba al clérigo-científico inglés Joseph Priestley por sus ideas radicales en política y religión, y por su defensa de la anticuada teoría que mantenía que el fuego era la liberación de un misterioso elemento llamado flogisto. Después de haber apoyado la Revolución Francesa, Priestley fue a América donde continuó la separación de gases. También inventó el agua de soda.

Incluso cuando aparecieron en tiempos primitivos, los elementos no despertaron la curiosidad del hombre; no le interesaba lo que eran, sino para qué servían. Como ya se ha indicado en el capítulo anterior, trabajaba con el oro, el estaño, el cobre y el hierro. Conocía también el carbono, en forma de negro de humo. Más tarde se encontró con la plata y el plomo. La experiencia le enseñó sus aspectos y tretas; que el cobre y el oro eran maleables; que el cobre y el estaño al juntarse producían una aleación (mezcla) de gran tenacidad, el bronce; que se podía dar forma al hierro martillándolo repetidamente en caliente y endurecerlo formando acero en bruto cuando se le añadía el carbono de un fuego de carbón vegetal. Pero a pesar de ir adquiriendo tan gran cantidad de conocimientos prácticos, el hombre no se interesó por la naturaleza fundamental de los elementos.

Los griegos y los romanos tampoco hicieron gran cosa en ese sentido. El Partenón, monumento permanente a la gloria griega, fue construido con las rentas de las minas de plomo de Laurión. Algunos de los grandes acueductos romanos de España fueron construidos para facilitar la explotación de valiosos depósitos de estaño. Para el tiempo en que las legiones de César alcanzaron su máxima extensión se habían producido nueve elementos en forma bastante pura, sin que se hubiese aún investigado su principio común. Lo que retrasó tal investigación fue la ordenada teoría de Aristóteles, citada ya antes, de que en el universo había solamente «cuatro elementos»: tierra, aire, agua y fuego. En los siglos siguientes los alquimistas se aferraron a la teoría de Aristóteles, si bien añadieron arsénico, antimonio, bismuto, fósforo y cinc al almacén de los distintos elementos.

Un séptimo hijo escéptico

Un profesor de ciencia autodidacta, el anglo-irlandés Robert Boyle, séptimo hijo del Conde de Cork, estaba destinado a establecer el principio fundamental de los elementos, lo cual hizo en un libro, *The Sceptical Chymist*, publicado en 1661: «Entiendo por elementos ... ciertos cuerpos primitivos y simples o perfectamente libres de mezcla; que al no estar formados por ningún otro cuerpo, ni uno de ellos por otro, son los ingredientes con los que se componen directamente los cuerpos llamados perfectamente mezclados, y en los que estos cuerpos se descomponen en último término».

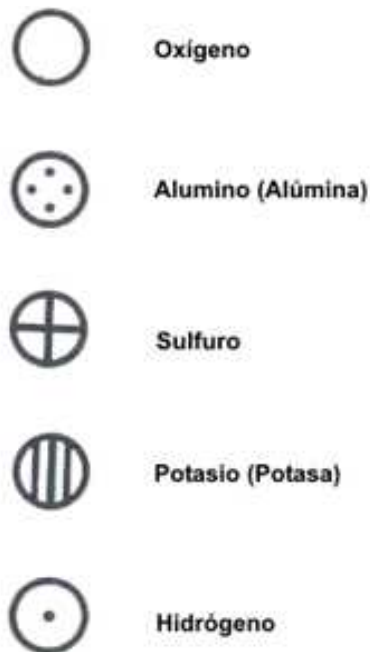
El hombre que asestó el golpe mortal a la teoría de los cuatro elementos era una especie de contrapartida, del otro lado del Canal de la Mancha, del hombre europeo del Renacimiento. Boyle fue escritor, teólogo, estudiante de las lenguas sagradas de Oriente, viajero, financiador de la publicación de Isaac Newton *Principia, químico y físico*. Sobre todo fue un practicante del llamado «método científico» que anunció el comienzo de la ciencia moderna. (La palabra inglesa «scientist», que se basa en la latina *scire*, conocer o saber, data solamente de 1840).

Más que de «método científico» debería hablarse de «espíritu científico». Su antítesis es la especie de sistema filosófico cerrado que hizo que la Iglesia prohibiese al gran Galileo que sostuviera que la tierra se mueve alrededor del sol. Su origen es esa consagración invariable a la verdad que hizo, según se dice, que Galileo murmurase durante su juicio: «Y, sin embargo, se mueve». Consagración - y curiosidad- son sin duda los ingredientes principales del espíritu científico; también lo son la imparcialidad, y un escepticismo que se niega a aceptar como cierto algo que no puede ser demostrado. A veces el espíritu aparece en una intuición tan extraña e inexplicable que llega a parecer paranormal, pero también se muestra en la meticulosidad laboriosa en la observación y clasificación de los hechos.

Una fecunda mezcla de rivales

A veces se ha tratado de establecer una rivalidad entre los métodos científicos propugnados poco antes del tiempo de Boyle por el inglés Francis Bacon, que predicaba la paciente acumulación de hechos, y por el francés René Descartes, al que gustaba proponer grandes conceptos y estimular la busca de hechos para comprobarlos. Utilizando el método de Bacon, el científico recoge y compara tantos ejemplos como puede del efecto que está investigando, y solamente entonces trata de generalizar; es la inducción. Por el procedimiento de Descartes, el científico pasa de alguna teoría a los experimentos que han de probarla o refutarla; es la deducción. En la realidad, los avances fundamentales han sido a veces consecuencia del primer método y a veces del segundo. Y algunos de los más importantes han sido el resultado de ráfagas de inspiración pura inexplicables. Einstein creía que hay momentos en que la lógica no puede ya llevar más lejos a la mente, y que entonces

el pensamiento da un salto instintivo cuyos orígenes en ningún momento llegan a ser claros ni para el mismo pensador.



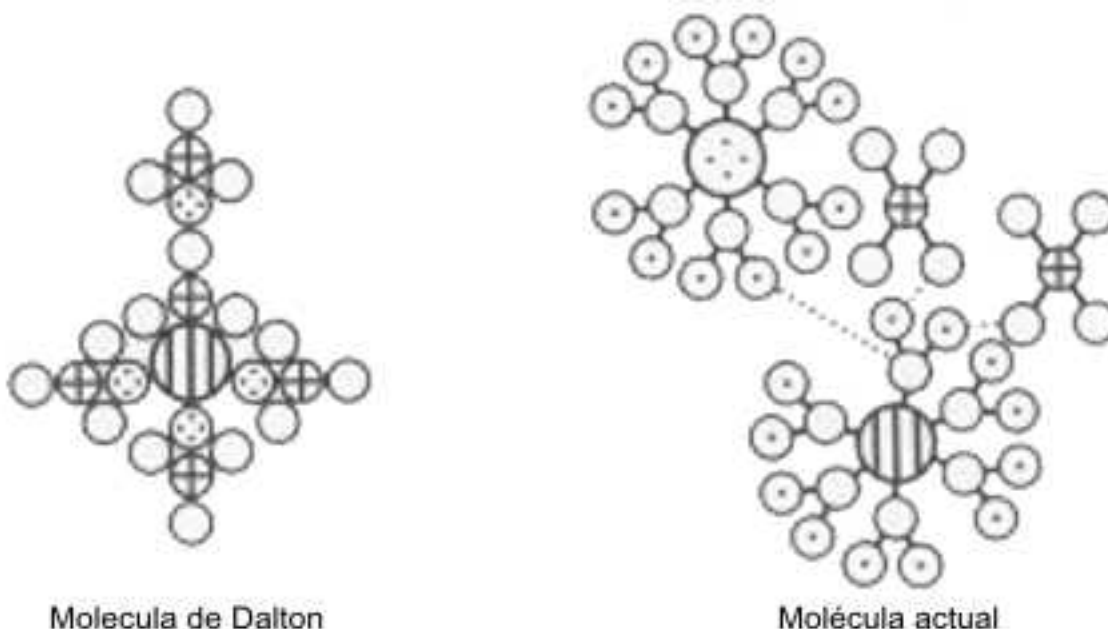
PLANOS MOLECULARES, ANTIGUOS Y MODERNOS. John Dalton ideó un conjunto personal de símbolos para los elementos conocidos, cinco de los cuales mostramos («alúmina» y «potasa» eran los nombres de Dalton para el aluminio y el potasio).

En el siglo XVII, Robert Boyle aplicó el método de Bacon en experimentos a los que la ciencia debe su primer conocimiento sistemático de muchos elementos y compuestos.

En aquellos tiempos no existía criterio establecido para el análisis químico. El color no siempre era indicación segura. Dos sustancias semejantes podían tener colores diferentes debido a impurezas, y en cambio, en otros casos, colores diferentes podían ser muy significativos, por ejemplo, los vitriolos verde, azul y blanco son, respectivamente, sulfatos de hierro, cobre y cinc. Por medio del «ensayo a la llama», Boyle mostró que incluso una pequeña porción de un elemento demuestra en el acto su presencia por el color distintivo que comunica a la llama.

Los experimentos de Boyle, sus observaciones y clasificaciones hicieron posible identificar muchas sustancias con una seguridad antes sólo conocida para algunos metales.

Boyle desempeñó un papel fundamental en el establecimiento de la identidad del primer elemento que se sabe positivamente que haya sido aislado por una sola persona: el fósforo blanco.



REPRESENTACIÓN CORRECTA E INCORRECTA. A la izquierda reproducimos su intento de representar la molécula del sulfato de aluminio y potasio, alumbre ordinaria, mostramos el esquema de Dalton para el sulfato de aluminio y potasio, que llamó «alumbre potásico». Un químico actual dibujaría la molécula como la de la derecha. Excepto por la omisión del hidrógeno, la molécula de Dalton contiene todos los elementos, pero en proporciones erróneas. Esa se debe a que no tenía manera de determinar el número exacto de átomos de un compuesto, y en parte también porque a menudo confundió compuestos con elementos.

Este hecho, de fundamental importancia para la comprensión de la materia, fue logrado sin proponérselo por un alquimista alemán, Hennig Brand. Brand estaba perpetuamente a la busca de lo que se suponía ser la suma total y el fin de las sustancias, la Piedra Filosofal. Un día, en 1669, en su laboratorio de Hamburgo, encendió su horno, llenó una retorta con líquido y lo evaporó para ver qué sedimentos quedaban. Lo que resultó fue una sustancia blanca pastosa; al anochecer la pasta comenzó a resplandecer, y cuando Brand sacó un fragmento del líquido residual, se inflamó.

Brand mostró su nuevo producto, pero mantuvo en secreto la procedencia del líquido, hasta que la información le fue sonsacada, mediante un pago, por un tal Johann Daniel Krafft de Dresde. Después de haber preparado cierta cantidad de la sustancia, Krafft fue algún tiempo después a Inglaterra para presentar aquel «fuego perpetuo» al rey Carlos II. Allí se encontró con Boyle, quien sólo pudo averiguar que el origen de la sustancia era «algo que pertenecía al cuerpo del hombre». Experimentando, Boyle resolvió el misterio: encontró que la materia prima utilizada era la orina, y acabó por volver a descubrir el fósforo empleando para ello la suya propia.

Por lo que consiguió, con frecuencia se le proclama padre de la química moderna: pero con la misma frecuencia tal honor se atribuye a un brillante francés del siglo siguiente, Antoine Laurent Lavoisier. Boyle estableció la definición básica de elemento: Lavoisier fijó el criterio fundamental para determinar si una sustancia correspondía a aquella definición: un elemento era «el único punto que el análisis podía alcanzar». Con esta guía de operaciones era posible eliminar a los impostores y a los imitadores de entre los elementos, y establecer una lista. En 1789 una lista de Lavoisier comprendía 23 elementos.

Hundimiento de un fantasma

Lavoisier aportó otra contribución al demoler la llamada teoría del flogisto, muy estimada desde hacía tiempo por los científicos. Esta idea, propuesta por un alemán, Georg Ernst Stahl, postulaba la existencia, en todas las sustancias combustibles y metales, de una sustancia invisible, el flogisto, especie de cómodo ingrediente, que podía servir para explicar las reacciones químicas. Así, por ejemplo, la razón por la cual una sustancia se convertía en cenizas al quemarse, era la de que el flogisto había «salido» de ella: la razón por la cual una cal u óxido metálico (polvo suave), tomaba otra vez forma metálica al ser calentada con carbón de encina, era que «tomaba» flogisto del carbón. Si bien durante décadas los científicos aceptaron las supuestas maravillas del fantasmal flogisto, causaba cierto malestar la afirmación de los flogísticos de que, según de qué ocasión química se tratase, el flogisto podía pesar, o no pesar, o incluso presentar lo que llamaban peso «negativo». Fue en este punto donde, en último término, fracasaron.

Utilizando balanzas especiales muy exactas, una de ellas podía apreciar una variación de peso del orden de un centésimo del de una gota de agua, Lavoisier llevó a cabo una clásica serie de experimentos con cantidades exactamente pesadas de estaño y plomo. En uno de ellos colocó estaño en un matraz, lo selló, lo pesó, y lo calentó hasta que no se formó ya más cal pulverulenta, y volvió a pesar el frasco: no había cambio de peso. Luego rompió el sello, dejando que entrara aire, y volvió a pesar el matraz; esta vez observó un aumento de peso.

Una historia del óxido rojo

Lavoisier dedujo que el aumento de peso era debido al aire que había entrado al abrir el matraz, y que este peso había reemplazado el del aire que había en el matraz cerrado y que se consumió para formar la cal.



ARQUITECTO DE LA MATERIA. Director de escuela a la edad de 12 años, el inglés John Dalton (1766-1844) aparece en la caricatura como un viejo con un medidor de lluvia en la mano. En el curso de su vida anotó diariamente estadísticas del tiempo, hasta 200.000 veces, pero su fama se basa en haber resucitado la antigua idea de Demócrito de que toda la materia está formada por pequeñas partículas indestructibles llamadas átomos. Dalton dio consistencia a la teoría al preparar la primera tabla de pesos atómicos, y fue el primero en esbozar la estructura de muchos compuestos químicos.

Lavoisier no estaba seguro de qué era lo que había sido sustraído al aire en el proceso de combustión y calcinación (formación de la cal); lo describió de un modo general, como un «principio atmosférico». Con el tiempo obtuvo la solución de un clérigo científico inglés que le visitó, Joseph Priestley, quien le habló de uno de sus propios experimentos. En lugar de formar una cal, Priestley había hecho la descomposición del óxido rojo de mercurio en polvo calentándolo con luz solar por medio de una lente de aumento. En este experimento había liberado un nuevo gas que, como convencido flogístico, había llamado «*aire deflogisticado*». Lavoisier, después de recoger este «aire» en un nuevo experimento, encontró que era el «principio atmosférico» que buscaba: el que producía la combustión y la calcinación, y también el que mantenía la respiración de todas las cosas vivientes. Como encontró que tenía la propiedad de formar ácidos, le llamó oxígeno, del griego *oxys*, ácido, y *gène*, formar.

Lavoisier pasó a otros experimentos con otras reacciones químicas, y formuló el principio de que el peso total de los productos de una reacción es exactamente igual al peso conjunto de los reactivos a partir de los cuales se forman; en pocas palabras, la transformación química no ocasionaba variación de masa. Este hallazgo fue como si se hubiese alzado un velo para todos los que trabajaban en los laboratorios: ahora podría analizarse a fondo el incesante juego de los elementos.

En el cuarto de siglo que siguió a Lavoisier, se pudo por vez primera ordenar los elementos. Se atribuyó un peso específico (masa) al átomo de cada elemento conocido, y se comprobó que existían relaciones cuantitativas entre los elementos. El hombre a quien se debe este monumental trabajo fue un cuáquero inglés, John Dalton, quien comenzó su vida como maestro y llegó a ser catedrático de matemáticas y filosofía natural de la Universidad de Manchester. (Murió soltero, por no haber «tenido nunca tiempo de casarse». Una sola de sus ocupaciones puede explicar este dilema; su costumbre de anotar diariamente sus observaciones sobre el estado del tiempo; el total de las mencionadas anotaciones llega a 200.000.)

En 1808 Dalton enunció la teoría de que en sus menores partes químicamente activas, los elementos están compuestos por átomos que son inmutables y que todos los átomos de un elemento dado pesan lo mismo, pero difieren en peso de los átomos de otros elementos. Por lo tanto, el peso de un átomo era una característica

de un elemento; se podía atribuir a un elemento un número que representase aquel peso, y sobre esa base podía establecerse un orden en el esquema de los elementos. En lugar de intentar determinar el verdadero peso del átomo mismo, Dalton propuso atribuir arbitrariamente el peso de la sustancia más ligera conocida, el hidrógeno, y asignar a los demás átomos pesos referidos a aquel patrón. Cuando se descompuso el agua en sus elementos - hidrógeno y oxígeno - se encontró que el oxígeno pesaba siete veces más que el hidrógeno, una relación de 1: 7 (el valor aceptado hoy es aproximadamente 1: 8). Así, pues, en la tabla de pesos atómicos de Dalton, primitiva pero portentosa, se atribuía al oxígeno el número 7; por medio de comparaciones semejantes, dio al nitrógeno el 5, al carbono el 5, al fósforo el 9, al azufre, el 13. En algunos casos los pesos de Dalton estaban bastante equivocados, pero la introducción del factor cuantitativo fue un adelanto fundamental. Con el tiempo, los pesos atómicos se determinaron con exactitud.

Una bandada de combinaciones

Dalton también adelantó la idea de que los compuestos químicos están formados por átomos combinados en proporciones definidas. Encontró que el óxido carbónico y el ácido carbónico, cuando se descomponen en sus constituyentes producen diferentes proporciones de oxígeno: el óxido (monóxido de carbono) contenía partes iguales de carbono y de oxígeno, pero el ácido (dióxido de carbono) tenía dos partes de oxígeno por cada una de carbono. Eso sugería que en vez de combinarse en proporciones fijas, los elementos podían combinarse en varios múltiplos de uno y otro, formando diversidad de compuestos. Habiendo hallado muchos ejemplos en que eso sucedía, observó que los elementos se combinaban en múltiplos aritméticos sencillos, dos a uno, como en el dióxido de carbono, o tres a uno, o tres a dos.

Dalton dedujo que la porción más pequeña de un compuesto consistía en una agrupación de un número definido de átomos de cada elemento, lo que llamó «átomo compuesto», y que ahora conocemos por «molécula». Pero un problema era por qué los átomos se combinaban de maneras diferentes. ¿Por qué el hidrógeno y el oxígeno forman agua? ¿Dónde un átomo de oxígeno se combina con dos de hidrógeno, o peróxido de hidrógeno? ¿Dónde dos átomos de oxígeno se combinan

con dos de hidrógeno? Más tarde este problema fue resuelto por el concepto de «valencia», o «capacidad de combinación».

Los primitivos conceptos de valencia suponían que el átomo de cada elemento tenía uno o más «ganchos», uno para el átomo de hidrógeno, dos para el del oxígeno. Así el oxígeno podía agarrar un gancho de hidrógeno en cada uno de sus dos ganchos, formando H_2O , agua; o dos átomos de oxígeno, uniendo entre sí uno de sus ganchos, podían cada uno de ellos agarrar un gancho de hidrógeno, formando H_2O_2 , peróxido de hidrógeno. Incluso números idénticos de átomos producen compuestos diferentes, según la forma en que se agrupen, la glucosa y la fructosa, por ejemplo, están ambas compuestas por 6 átomos de carbono, 12 de hidrógeno y 6 de oxígeno.

Hay que tener en cuenta que los hoy familiares símbolos de los elementos - C para el carbono, H para el hidrógeno, O para el oxígeno no existían en los tiempos de Dalton. Los griegos, para designar metales u otras sustancias, empleaban contracciones de sus nombres o representaciones de los planetas; motivos semejantes bastaron a los alquimistas. Con el tiempo la situación respecto a los símbolos se aproximó al caos. Un manuscrito italiano de principios del siglo XVII designaba al mercurio por no menos de 20 símbolos diferentes; otro representaba al plomo por 14. La solución de Dalton al problema consistía en un sistema esquemático en el cual los átomos de diversos elementos venían representados por líneas y círculos; diversas agrupaciones de círculos representaban sus «átomos compuestos». Algunos químicos encontraron engorroso el simbolismo de Dalton. Para llegar a la forma moderna hubo que esperar al sueco Jöns Jacob Berzelius; con sólo pequeñas modificaciones, sus símbolos son los actuales. Berzelius descartó los ideogramas de Dalton y utilizó la letra inicial o combinación de las primeras letras del nombre latino para cada elemento. Así, por ejemplo, el potasio fue K (de *kalium*), la plata Ag, (de *argentum*) y el estaño Sn (de *stannum*). Dalton se aferró a su sistema; los símbolos de Berzelius, decía, eran «horripilantes».

EL INICIADOR DEL ORDEN ELEMENTAL



DMITRI IVANOVICH MENDELEIEV. Este sello soviético apareció en 1934, en el centenario del nacimiento de Dmitri Mendeleiev, químico ruso que descubrió que existía un orden natural entre los elementos. Según se ve más abajo, en una reproducción de su tabla original, Mendeleiev dispuso los elementos según su peso atómico, y luego observó que los elementos que están juntos en columnas adyacentes (por ejemplo, vanadio, niobio, tantalio) se comporten igual. Los huecos de la tabla, representados por interrogantes, nunca perturbaron a Mendeleiev: los explicó por medio de predicciones atrevidas y exactas acerca de los elementos por descubrir.

Pero el interés en simbolizar los elementos era secundario al interés en descubrirlos. A medida que se iba obteniendo nueva información sobre los elementos conocidos, se aguzaba el apetito por los desconocidos.

			Ti=50	Zr=90	?=180.
			V=51	Nb=94	Ta=182.
			Cr=52	Mo=96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,4
			Fe=56	Ru=104,4	Ir=198.
		Ni=Co=59		Pl=106,5	Os=199.
H=1			Cu=63,4	Ag=108	Hg=200.
	Be=9,4	Mg=24	Zn=65,2	Cd=112	
	B=11	Al=27,4	?=68	Ur=116	Au=197?
	C=12	Si=28	?=70	Sn=118	
	N=14	P=31	As=75	Sb=122	Bi=210
	O=16	S=32	Se=79,4	Te=128?	
	F=19	Cl=35,5	Br=80	I=127	
Li=7	Na=23	K=39	Rb=85,4	Cs=133	Tl=204
		Ca=40	Sr=87,4	Ba=137	Pb=207.
		?=45	Ce=92		
		?Er=56	La=94		
		?Yt=60	Di=95		
		?In=75,4	Th=118?		

Ya en tiempos de Dalton la caza de elementos se convirtió en un gran deporte científico (el uranio, tan íntimamente relacionado con nuestra era, fue descubierto ya en 1789, por un alemán, Martin Klaproth). Durante la primera mitad del siglo XIX se aceleró el ritmo de la cacería, y en 1870 se habían capturado y etiquetado 65 elementos.

Era una variada colección en la que se distinguía poco orden; relaciones mutuas entre elementos, posibles conexiones familiares, parecían desafiar toda identificación. Se necesitaba un examen sistemático, persistente, increíblemente paciente de una cantidad inmensa de hechos. Esta gigantesca tarea fue emprendida por un ruso, Dmitri Mendeleiev, hombre de espíritu inquebrantable. Una ojeada al interior de cualquier aula de ciencia de una escuela superior atestigua su triunfo: colgando de la pared, la familiar Tabla Periódica de los Elementos es - a pesar de su moderno vestido- su obra permanente.

Cuando Mendeleiev comenzó su *magnum opus*, a fines de los 1860, no tenía mucho más de 30 años, pero ocupaba la cátedra de química general de la Universidad de San Petersburgo. Nacido en Siberia, el menor de 17 hijos, recorrió con su madre, a la edad de 15 años, el largo camino de Moscú, para ser admitido en la Universidad. La señora Mendeleiev consideraba que su hijo era un genio científico, pero las autoridades académicas no lo creyeron así. Rechazado, Dmitri siguió hasta San Petersburgo, donde ingresó en el Instituto Pedagógico de la Universidad. Aunque tuberculoso, llegó a ser maestro, químico y consejero de la industria rusa del petróleo. La estima en que se le tenía duró toda la vida; más tarde, cuando se casó por segunda vez sin haberse divorciado, se dice que el Zar comentó: «Sí, Mendeleiev tiene dos mujeres, pero yo sólo tengo un Mendeleiev».

La clásica tabla periódica se originó en los preparativos de Mendeleiev para su libro, *Principios de Química*, publicado en 1868. Al considerar su plan de trabajo, le llamó la atención la falta de sistematización de los hechos en la química inorgánica. Se puso a recoger todos los fragmentos de evidencia sobre la naturaleza de los elementos conocidos, con la intención de averiguar si había algún orden «periódico» entre ellos. Disponía ya de algunos datos. Sabía, por ejemplo, que los halógenos, o elementos que forman sales (flúor, cloro, bromo, yodo) tenían características comunes. También las tenían los metales alcalinos (que comprendían litio, sodio y potasio, aumentados luego con rubidio, cesio y francio), que se oxidaban al ser expuestos al aire, y no se encontraban en la naturaleza sino en forma de compuestos. Y lo mismo las tenían los metales «nobles» (cobre, plata y oro), que fueron así calificados porque eran duraderos y resistentes a la corrosión.

Carteles por las paredes

Mendeleiev ideó el sistema de colocar carteles por las paredes de su laboratorio para catalogar su información. Asignó a cada elemento una tarjeta oblonga y luego las ordenó una y otra vez por la pared. Sobre cada una de las tarjetas anotó el peso atómico y otras propiedades del elemento y de sus compuestos. Más tarde ideó un sistema de hileras laterales y columnas verticales en las cuales dispuso las tarjetas que correspondían a semejanzas químicas y físicas. Después de haber situado el hidrógeno en un lugar especial por sus propiedades únicas, dispuso en la primera

hilera los siete elementos siguientes conocidos, desde el litio al flúor, por orden de peso atómico creciente. En la hilera siguiente escribió los otros siete, desde el sodio al cloro. Ya en sólo estas dos hileras la periodicidad de comportamiento químico resultaba evidente; en la primera columna vertical estaban los dos primeros metales alcalinos, en la séptima, los dos primeros halógenos, y en todas las demás columnas verticales los elementos eran químicamente semejantes.

Lo genial de Mendeleiev consistió en darse cuenta de estas relaciones. Cuando comenzó su tercera hilera lateral de elementos, el potasio encontró su propio lugar bajo el litio y el sodio. Luego vino el calcio, semejante al magnesio y al berilio de encima. Para la tercera columna el siguiente elemento conocido era el titanio, pero Mendeleiev sabía que sus propiedades eran semejantes a las del carbono y del silicio, que se encontraban en la cuarta columna, de modo que puso el titanio inmediatamente debajo de aquéllos y dejó en blanco el tercer lugar de la hilera. Para completar la clasificación debería haber un elemento hasta entonces insospechado cuyo peso atómico estuviese situado entre el del calcio (40) y el del titanio (48).

Una profecía en sánscrito

Mendeleiev colocó otros espacios en blanco entre sus tarjetas; afirmó que, tarde o temprano, el elemento que faltaba aparecería. Incluso dio nombre a esos miembros ausentes, usando los prefijos sánscritos *eka* y *dvi* («uno» y «dos») combinados con los nombres de elementos conocidos, a uno o dos lugares de distancia en la agrupación periódica.

	1500s	1600s	1700s	1783	1808	1814
ORO						Au
MERCURIO						Hg
PLOMO						Pb

DESARROLLO DE UNA TAQUIGRAFÍA QUÍMICA. A la izquierda mostramos la evolución de los símbolos químicos para tres metales comunes. Todos ellos se derivan de la alquimia, la cual utilizaba el sol como símbolo del oro, el caduceo de Mercurio como símbolo del mercurio, y la guadaña de Saturno como símbolo del plomo. La notación alfabética moderna, introducida en 1814 por el químico sueco Jöns Berzelius, da a los elementos símbolos basados en sus nombres antiguos, aurum, hydrargyrum y plumbum.

«Es posible», escribió, «predecir las propiedades de los elementos aún desconocidos». Su predicción se cumplió con el descubrimiento del galio en 1875; sus propiedades correspondían casi exactamente a las del «eka-aluminio». Su «eka-boro» -el elemento que faltaba entre el calcio y el titanio- fue descubierto en 1879 en Suecia y llamado escandio; su «eka-silicio» fue hallado en Alemania en 1886 y denominado germanio, uno de los materiales de los transistores. Y si bien Mendeleiev no predijo los gases inertes o «nobles», que aparecieron durante los últimos años de su vida, fue fácil encajarlos más tarde en su tabla añadiendo sencillamente otra columna vertical.

A pesar de toda su intuición, Mendeleiev no pudo prever que poco después de su muerte, en 1907, los laboratorios estarían produciendo elementos artificiales que añadir a su histórica tabla. Pero en cuanto a los elementos que aparecen en la naturaleza, la lista es completa; comienza con el gas más ligero, el hidrógeno, N° 1, y termina con el metal más pesado, el uranio, N° 92. Este número, en vista de la existencia de sólo 88 elementos naturales, parece indicar una discrepancia; ésta se explica por la existencia de cuatro elementos, tecnecio, prometio, astato y francio,

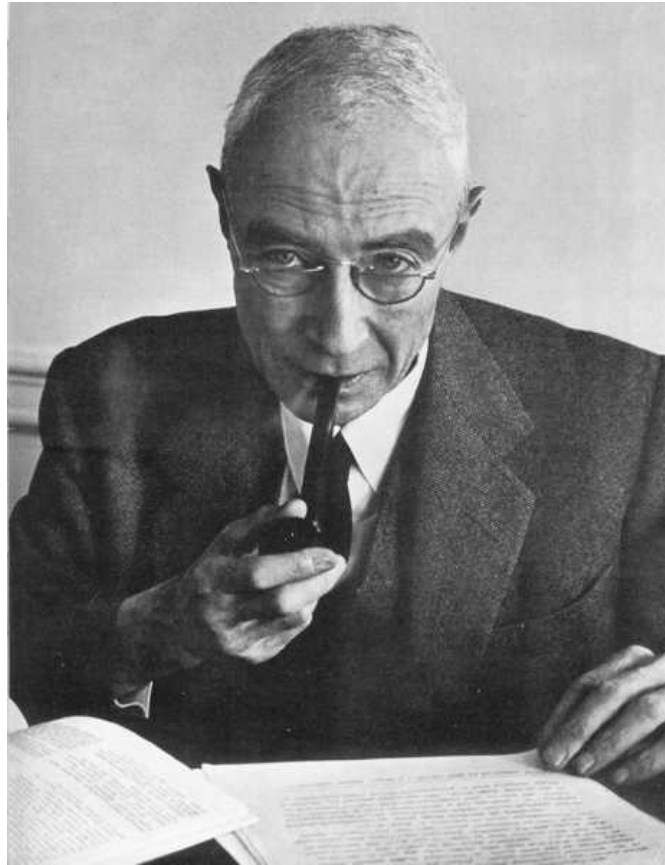
comprendidos entre los primeros 92 por su peso atómico, pero que no existen en la naturaleza, o son sólo producidos en el proceso de desintegración radiactiva. Actualmente sabemos que ya no se descubrirán otros elementos naturales entre el hidrógeno y el uranio por una sencilla razón así como un elemento tiene su «peso» atómico, también tiene un «número» atómico, basado en el número de protones del núcleo de sus átomos. Es el protón único del hidrógeno lo que le hace ser el primero de la lista; cada uno de los elementos que le siguen tiene un protón más. No puede haber adiciones, pues no existen fracciones de protón.

Si bien este conocimiento ha frustrado la aventura de la búsqueda de elementos, otros conocimientos la han compensado. Los astrónomos, utilizando espectrógrafos acoplados a sus telescopios, han explorado la estructura de distantes estrellas y han encontrado que el universo está formado por los elementos de la tabla de Mendeleiev. Estrellas a miles de millones de años luz envían mensajes espectrales que revelan que también contienen hidrógeno, helio y demás elementos conocidos en la tierra. Podemos, pues, estar seguros de que cuando estudiamos la materia trabajamos con las mismas sustancias que forman el universo. Es posible que la materia de las estrellas exista en condiciones completamente diferentes, comprimida a densidades increíbles o bien calentada a muchos millones de grados, pero tanto allí como aquí los elementos son los mismos.

INTÉRPRETES INDISPENSABLES DE UNA ERA CIENTÍFICA

Uno de los hechos notables en relación con la ciencia actual es el cambio que el público ha experimentado acerca de las personas que la practican. Actualmente no es que el hombre de la calle comprenda mejor al científico físico, pues habla de bosones vectoriales y viscoelasticidad de polímeros, y escribe sobre «Ecuaciones de ondas spin en el espacio de De Sitter», pero goza de la admiración popular. "Tiene a su disposición grandes recursos; gobierno e industria están pendientes de su palabra. Este notable ascenso del científico se debe, más que nada, al éxito en sus estudios sobre la estructura y el comportamiento de la materia, y a su papel esencial como intérprete de la era atómica que ha contribuido a iniciar. Sin embargo, uno de los más agudos de estos intérpretes, J. Robert Oppenheimer, dice

que hay todavía un requisito esencial para entrar en ese campo: «Sobre todo, tiene que gustarle».



VIEJO ESTADISTA DE LA CIENCIA. Arquitecto principal de la primera bomba atómica y notable promotor entre los físicos de los EE.UU., J. Robert Oppenheimer dirige el Institute for Advanced Study de Princeton, cuartel general de los más brillantes pensadores del mundo. «Los físicos», dice, "reúnen una aguda curiosidad y una imperiosa necesidad de orden... Nos gusta saber qué diablos ocurre..."



UNO QUE EXPLORA PARTÍCULAS. Jack Steinberger, de 42 años, descansa entre sus instrumentos en el Laboratorio Nevis de la Universidad de Columbia en Irvington, Nueva York. Al principio de su carrera, Steinberger probó la física teórica, «pero me era muy difícil tener ideas». Después pasó a ser experimentador, y desde entonces ha estado ocupado en investigaciones sobre partículas elementales. Steinberger cree que el científico «no le estorba ser inteligente e inventivo». Para él, el mayor placer es «la libertad de que se disfruta: uno puede hacer lo que quiera»



CAMBIO DE OPINIÓN. Leonard Reiffel, de 35 años, fuera del «cuarto caliente», donde se efectúan experimentos radiactivos en el Instituto de Investigación del I. I. T. (Illinois Institute of Technology) de Chicago. Es jefe de la sección de investigación física del Instituto. Dirige a 260 personas que trabajan en 50 proyectos. "En mis días de estudiante", dice Reiffel: "creía que los físicos eran individuos pesados que vivían en torres de marfil dedicados al pensamiento abstracto, dando siempre vueltas a lo mismo. El Proyecto Manhattan me hizo cambiar de opinión

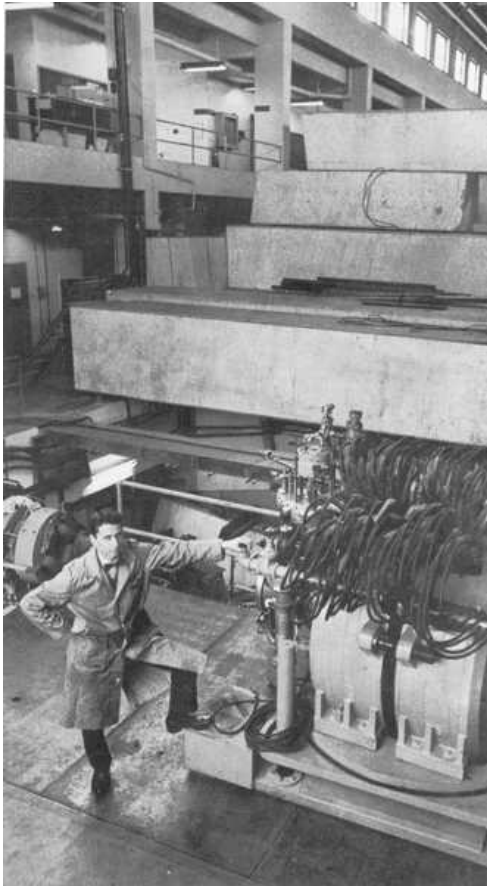
Las moradas de la selecta hermandad de los físicos

De los científicos de la actual cosecha, ninguno inflama la imaginación popular tanto como el físico. Su morada habitual es una instalación estatal, el laboratorio de una universidad o centro de investigación. Dondequiera que trabaje está entre grandes máquinas y costosas instalaciones. Pero algunos científicos se mantienen apartados de todos los laboratorios: teóricos que idean tesis y dejan la comprobación a los experimentadores.

Hay en los EE.UU. unos 32.000 físicos que ejercen su profesión; desde los criogénicos, que congelan la materia hasta casi el cero absoluto, hasta los físicos del plasma que manipulan materia a temperaturas más elevadas que las del sol. Hay investigadores “puros” y “aplicados”, que no siempre están en contacto. “No tengo ni idea de lo que se hace en los laboratorios industriales”, dice el físico universitario Jack Steinber.

Para el doctorado en física se necesitan tres años de estudios de grado, de los cuales uno es de investigación original. Un físico americano gana por término medio US\$ 12.000 anuales (algunos más de US\$ 40.000).

Lo mismo que los matemáticos, con frecuencia realizan su mejor trabajo a edad temprana, pero a diferencia de la mayoría de aquéllos, parece que los físicos continúan su trabajo hasta una edad avanzada.



LÍO CON LOS MESONES. Roger Hildebrand, de 41 años, director asociado del Argonne National Laboratory de Chicago, centro de diseño y tecnología de reactores, mira hacia arriba desde la base de un Síncrotrón rompe-átomos. Le intrigan unas partículas subatómicas llamadas mesones-mu, que se comportan tan extrañamente que «perturban todos nuestros cálculos. No comprendemos por qué la naturaleza se tomó el trabajo de hacerlos. La enseñanza le agrada: "No creo que mi investigación fuese tan eficaz, si mis estudiantes no me mantuvieran siempre alerta.

Los químicos: hombres que se meten con la naturaleza

Los talleres del químico moderno son tan variados como los del físico; también es solicitado por el gobierno, las universidades, las corporaciones y las fundaciones para la investigación. Si bien se considera que la química es menos brillante que la física, los que la ejercen lo toman filosóficamente. "La ciencia suele tener sus modas", dice Robert Burns Woodward. Pocos campos de la ciencia brillan más que la bioquímica, que penetra en la química de la vida, el código genético, los virus y el cáncer.

En años recientes los químicos han estado fascinados por los problemas de síntesis, fabricación a medida de moléculas grandes, incluso gigantes, con objetos definidos.



MÁS ALLÁ DE LA TEORÍA PURA. George Schmidt, de 35 años, químico de polímeros de Allied Chemical Corporation, comprueba en su laboratorio un aparato especial de destilación. Está especializado en la síntesis de nuevos polímeros, grandes moléculas de plásticos, fibras y otros productos, para su firma.

Experimentador aplicado, Schmidt cree que en mayor o menor grado todos los científicos tienen objetivos prácticos. "No creo que existan científicos teóricos puros" dice. "Incluso los más teóricos pueden imaginarse el futuro y ver alguna consecuencia práctica de su trabajo. Pero en realidad no les preocupa el tiempo que sus descubrimientos puedan tardar en convertirse en algún producto útil.

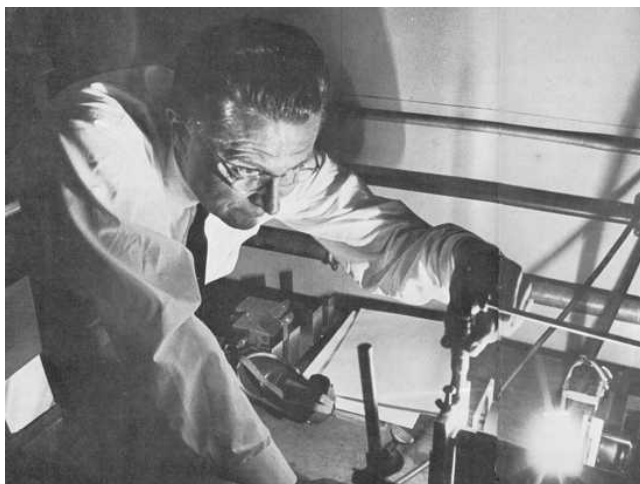
Para doblegar la naturaleza a nuevos objetivos, los químicos han tenido que explorar la estructura de la materia. La investigación, tanto fundamental como aplicada, ha producido gran abundancia de nuevos plásticos y espumas... fibras, adhesivos y detergentes. Pero no todos los químicos son sintetizadores, entre los 110.000 químicos de los EE.UU. algunos se dedican a especialidades tales como la venta de productos químicos y la química de alcantarillados. Cada vez la química se mezcla con más disciplinas: un químico que estudie cristales apenas sabe si está haciendo química estructural o física del estado sólido.

Los químicos ganan más o menos lo mismo que los físicos y tienden cada vez más a especializarse. Tan violento ha sido el desarrollo en este campo que una persona apenas si puede mantenerse al día en lo concerniente a una sola especialidad.

George Schmidt observa: "Gran parte del trabajo del químico consiste en leer y escribir... demasiado, en realidad".

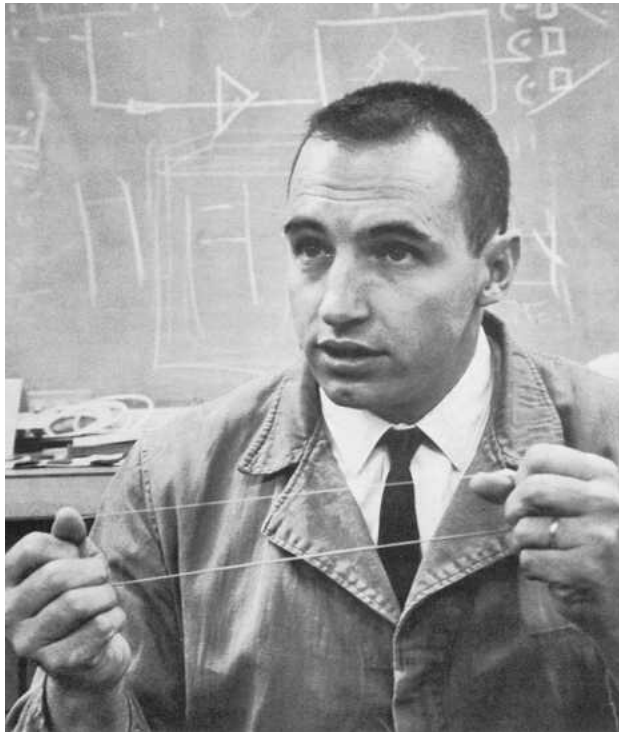


UNA VISIÓN AMPLIA. Robert Burns Woodward, de 46 años, poseedor de nueve títulos honorarios de Doctor en Ciencias, y una de los principales químicos de síntesis del país, observo una muestra de una sustancia que puede conducir a la producción en el laboratorio de la vitamina B-12, uno de las proyectos de investigación que dirige. Además de sintetizar la clorofila, la quinina y la cortisona, Woodward ha contribuido a revolucionar la química sintética al insistir en un amplio ataque teórico en vez de los métodos corrientes en el pasado. Si bien no cree que la física y la química se confundan, observa que "los químicos están dispuestos al uso de descubrimientos físicos aplicables a sus problemas.



UN PRODUCTO IMPORTANTE. Un resplandor de gases calientes iluminó la cara de Sanborn Brown, de 50 años, mientras observa una reacción de plasma en su laboratorio del Instituto de Tecnológico de Massachussets, donde es decano adjunto. Los datos fundamentales que recoge quizás un día contribuyan al uso de la fusión

controlada. Brown no considera que la física teórica sea superior a la aplicada, ni viceversa. "Hay a quienes les gusta resolver problemas útiles", dice, "mientras que a otros les satisface saber lo que sucede". A Brown le satisface la enseñanza. "Mi producto más importante son los personas. Mi satisfacción procede de lo educación que puedo proporcionar. Se puede aprender tanto en el cuarto grado como preparando el doctorado".



LISTA DE CUALIDADES. Robert Landel, de 37 años, jefe de la sección de investigación de polímetros del Laboratorio de Propulsión a Chorro, de Pasadena, California, estira una cinta de goma mientras discute su especialidad, los usos de la goma en la ligazón de combustibles sólidos para cohetes. Los principales cualidades de un científico son, según Landel, «lo decisión de trabajar de firme, bueno memoria, habilidad en matemáticas y talento para análisis y descripción. Por lo que o su propia memoria se refiere, Landel tuvo sus dudas; primero deseaba estudiar ornitología, pero: «La idea de aprender de memoria todos aquellas plumas me horripilaba.

Fuerza y promesa. De los extremos de frío y de calor

Nada ilustra con más claridad el inmenso campo que la física ha abarcado que el trabajo de los dos hombres que mostramos en estas páginas. Sanborn Brown se ocupa de la física del plasma, que comprende el llamado cuarto estado de la materia... masa de partículas a temperaturas extremadamente elevadas (el sol y las estrellas están formados por plasma). Por otra parte, William M. Fairbank, de Stanford, se dedica al extremo opuesto del espectro de temperaturas, el campo de la criogenia, que trata del frío en las proximidades del cero absoluto.

Opuesto en apariencia, el trabajo de estos dos hombres se entrelaza de un modo curioso. En la especialidad de Brown un problema decisivo es cómo encerrar un plasma tan caliente que ningún envase puede contenerlo. Lo curioso es que los estudios del frío quizás proporcionen la solución. Fairbank utiliza potentes imanes criogénicos capaces de contener plasma en sus campos sin contacto directo. "Si es así", dice Fairbank, "habremos llegado al límite de la absurdidad: una "botella" a -169°C que contendría un proceso a millones de grados de calor."



LA VENTAJA DE QUE SALGA MAL.

Rodeado de mangueras y de nubes de vapor de agua, William M. Fairbank, de 46 años, de la Universidad Stanford en California, inspecciona un experimento en el que interviene materia a temperaturas súper frías. Además de estas investigaciones, Fairbank también enseñó. Tiene especial interés en encontrar estudiantes excepcionales entre la juventud. Su criterio: «Combinación de curiosidad y originalidad productiva, unida a confianza. La curiosidad habla por sí misma. La originalidad no productiva, es inútil. La

confianza en sí mismo debe ser ilustrada... Además, el fracaso es parte de la formación. «El estudiante necesita que todo le salga mal. Entonces tiene que recoger los escombros y proseguir; así aprende...»



UNA SOLA PREOCUPACIÓN. Delgado, enérgico, de travieso sentido del humor y brillante inteligencia, preocupado por lo físico cerca de 24 horas diarias, Tsung Doo Lee, de 36 años, discute su tema favorito durante un paseo en la Universidad de Columbia, Nueva York. Lee dice que en su trabajo es vital dominar las matemáticas, puesto que «las ecuaciones son los instrumentos». Y él trabaja casi continuamente. «La investigación es algo constante», dice. «No se pueden contar las horas.» Casado y padre de dos niños, Lee nació en Shangai y llegó a los EE.UU. en 1946 gracias a una beca del gobierno chino. Diez años después era catedrático en Columbia, el más joven que había en aquella época.



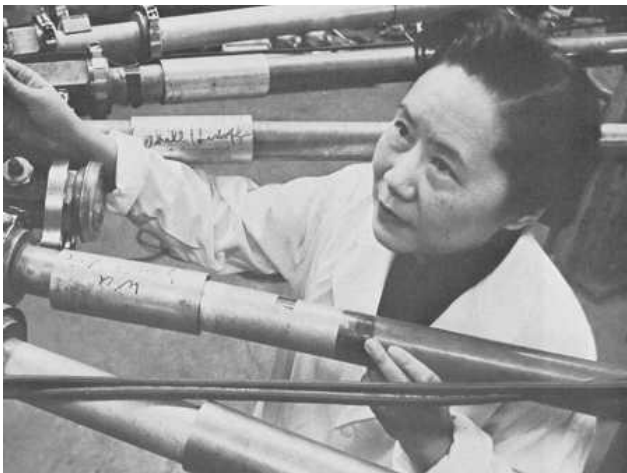
CUESTIÓN DE AUDACIA. Chen Ning Yang es el otro miembro del equipo que trastornó la ley de paridad. Yang se encuentra ahora en el Institute for Advanced Study de Princeton, y afirma que a pesar del impulso actual de la ciencia, «cuanto más estudiamos lo naturaleza, más compleja nos aparece». Premio Nobel o los 34 años, Yang, que ahora tiene 40, cree que la juventud es una ventaja en el trabajo científico. «A medida que uno se hace viejo, se vuelve menos audaz... por cada nueva idea que uno tiene, se presentan gran número de argumentos en contra. Cuando se es joven, se siguen inmediatamente las ideas nuevas. ¿He perdido mi audacia? Con frecuencia me lo pregunto.»

Los extranjeros, una riqueza para la ciencia de los EE.UU.

La supremacía de los Estados Unidos en la física actual se debe en gran parte a la contribución de los científicos nacidos en el extranjero. El más famoso fue Albert Einstein, que huyó de Alemania en la época de Hitler. Y también hubo aquel notable italiano, Enrico Fermi, famoso por haber ganado el Premio Nobel, y que era maestro al mismo tiempo. De Hungría procedía Edward Teller, y de Alemania, Hans Bethe. Sin hombres de esta clase los EE.UU. no hubiesen podido adelantarse de modo tan impresionante en el campo de la física nuclear.

Desde la segunda Guerra Mundial, América ha seguido atrayendo talentos científicos. Pero ahora el influjo del extranjero consiste principalmente en estudiantes. De cada diez estudiantes graduados en este país, uno procede de otras tierras, y tiene la intención de regresar al final de sus estudios.

Dos de los tres distinguidos físicos chinos de estas páginas, Tsung Dao Lee y Chen Ning Yang, vinieron a los EE.UU. como licenciados y decidieron quedarse. En 1957 compartieron el Premio Nobel de Física cuando derribaron la sacrosanta ley de la conservación de la paridad. En esencia esta ley mantenía que cuando se desintegra un núcleo atómico las partículas que emite tenían la misma probabilidad de que su spin (giro) fuese en un sentido o en el opuesto. En su lugar Lee y Yang mantuvieron que cada tipo de partícula elemental que se produce en una desintegración radiactiva posee un spin característico, hipótesis revalidada en el laboratorio por la doctora Chien-Shiung Wu.



ROTURA CON LA TRADICIÓN. Famosa experimentadora en física, la doctora Chien-Shiung Wu, de 50 años, aparece aquí entre los tubos de un acelerador de partículas en su laboratorio de la Universidad de Columbia. La Dra. Wu, que es famosa sobre todo por un experimento que confirmó la refutación de la paridad de Lee y Yang, ha conseguido además muchos otros éxitos, especialmente en el campo de las partículas subatómicas. Cree que la atmósfera de EE.UU. no es propicia a la carrera científica de las mujeres pues se considera poco femenina. La Dra. Wu opina que las que han roto con la tradición, lo están haciendo bastante bien. Y siguió: El estar casado con un científico lo soluciona todo. A veces se puede hablar de física.

El impulso de educar a los jóvenes

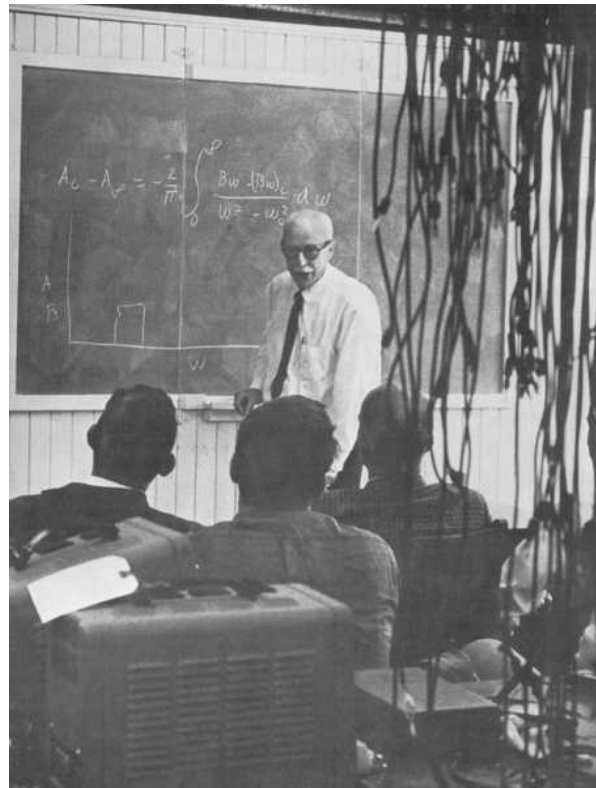
Por poco que se profundice, bajo casi todo científico se encuentra al educador. Muchos hombres prominentes dan clases a principiantes, aunque la mayor parte se limitan a pequeños seminarios de estudiantes. Hay maestros que tienen hasta una docena de candidatos al doctorado, trabajando bajo su dirección.

De todos los candidatos al doctorado, un 10%, aproximadamente 11.000, se dedican a física y química. Este porcentaje se mantiene bastante constante, puesto que representa a aquellos estudiantes que tienen suficiente interés y empuje para encontrar atractivos en la ciencia. A pesar de la escasez de estudiantes de ciencias, el plan de estudios se hace mayor cada día. Un gran centro como la Universidad de Illinois tiene, en física solamente, 30 especialidades de investigación, desde superconductividad a resonancia magnética. Colegios para pregraduados como el de Whitman se especializan también en cursos avanzados de física. La Universidad de Western Reserve, en Cleveland, investiga sobre la aniquilación de positrones, y la Universidad de Alaska los “fenómenos de aurora”.



CONCEPTO DE LUZ Y SOMBRA. Dudley Herschbach da una explicación a un estudiante de la Universidad de California. A los 30 años Herschbach fue nombrado Catedrático de Química en Harvard en 1963. Su contribución más notable a la investigación ha sido el estudio de reacciones químicas por observación de colisiones entre las moléculas de gases, técnica tomada de la física. Como maestro, Herschbach supone que los estudiantes soben 'que se ha inventado la imprenta. «Un maestro no es quien suministra lo que ya está en un libro, sino alguien que puede añadir matices, una especie de poder espiritual.

RIENDA SUELTA PARA LOS INDEPENDIENTES. Walter Brattain hace una pregunta o una clase de física superior en el Whitman College, Walla-Walla, Washington (matrícula limitada a 850) Brattain pasa tres semanas de cada mes en Bell Telephone Laboratories en Nueva Jersey, donde, como investigador físico, contribuyó al desarrollo del transistor, con lo cual ganó el Premio Nobel. Uno vez al mes se desplaza 8.000 km para dar clases durante una semana en Whitman, su alma mater, Brattain cree que las pequeñas escuelas son lugares en donde los independientes tienen rienda suelta... y eso es bueno para todos.



Capítulo 3

Caprichosas y obstinadas costumbres de los gases



HOLOCAUSTO EN HIDRÓGENO. La explosión del zeppelin alemán Hindenburg en Lakehurst, Nueva Jersey, el 6 de mayo de 1937 fue causada por la unión de 190.000 m^3 de hidrógeno con el oxígeno que lo rodeaba. Se destruyó la nave y 35 vidas en menos de cinco minutos. Los aparatos más ligeros que el aire evitan ahora el hidrógeno y utilizan helio incombustible.

La mejor manera de describir los tres estados familiares de la materia, sólido, líquido y gaseoso, es en términos de analogías humanas. Un sólido es semejante a un pelotón de soldados en posición de firmes y en filas cerradas. Un líquido es como

una multitud amotinada, que va ya en un sentido, ya en otro. Un gas se asemeja a un grupo de muchachos que juegan en un gran solar, y de vez en cuando chocan entre sí; su comportamiento es algo caótico. Efectivamente, la palabra gas deriva de la griega *chaos*.

Podría parecer que los gases deberían ser la más desconcertante de las formas de la materia; es la más tenue, y con frecuencia son intangibles. Para el hombre de la calle estas sustancias son un enigma, aun cuando aparecen por todas partes en la vida, el aire que respiramos, el maloliente combustible de una cocina, el gas Freón de un acondicionador de aire, el aire que llena los globos de juguete y los neumáticos, el oxígeno y el acetileno de un soplete para soldar, el anestésico que conforta en la mesa de operaciones.

Por otra parte, para el científico, los gases son paradójicamente la forma de materia que mejor conoce, pues las moléculas de gas están tan separadas, en comparación con las de un líquido o sólido, que una molécula obra más o menos independientemente de las demás; su comportamiento colectivo es por lo tanto más fácil de observar.

Si bien la materia puede, a cierta temperatura, pasar de un estado a otro, cada estado tiene sus propiedades peculiares. Las características de un gas reflejan el despreocupado comportamiento de sus moléculas.

En primer lugar, los gases son elásticos: el más pequeño impacto en el aire hace que sus moléculas se golpeen entre sí. Esto origina ondas sonoras; el frote de las alas de un grillo determina tal conmoción molecular que puede oírse casi desde un kilómetro. La misma elasticidad hace saltar el tapón de una botella de champaña e impulsa los ruidosos taladros neumáticos que quebrantan las calzadas.

Los gases también se mezclan entre sí con facilidad, y se difunden uno en otro. Una botella de perfume que se deja abierta pronto perfuma toda la habitación, pues al evaporarse sus moléculas gaseosas se difunden y son dispersadas por las corrientes de aire. El aire mismo es una mezcla homogénea de gases; tanto si flota sobre un desierto ártico o sobre la llanura africana, contiene aproximadamente las mismas proporciones de nitrógeno, oxígeno y otros gases.

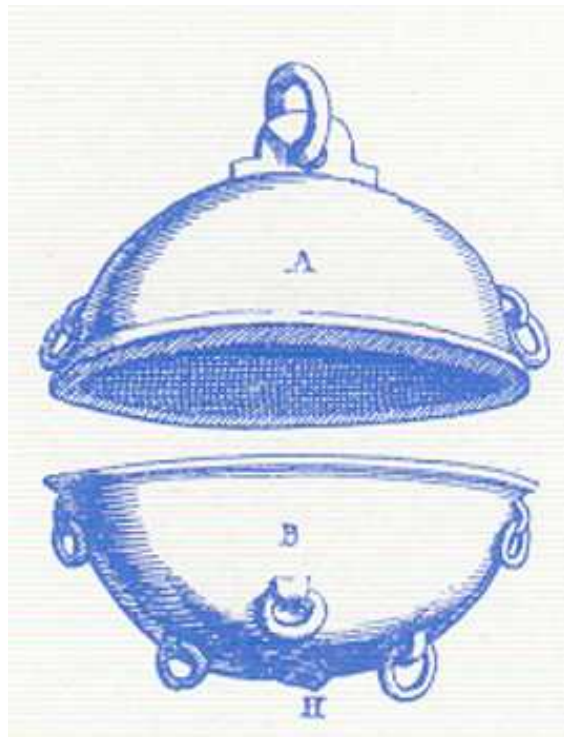
Los gases no tienen forma propia y se dilatan libremente llenando cualquier envase. Las luces de neón siguen las curvas de la escritura en un anuncio, porque el gas de

su interior se adapta a cualquier forma. Además, el volumen de un gas varía según su presión y temperatura. Un globo se dilata al ascender a un aire «más tenue» donde la presión es menor; se contrae cuando una nube oscurece el sol.

Al dilatarse, los gases se enfrían, y cuando se comprimen, se calientan.

Quien haya llenado a mano la cámara de un neumático sabe que la bomba se calienta, así como la cámara. Esta misma particularidad del gas ha hecho posible el refrigerador; una bomba eléctrica comprime el gas refrigerante, que luego se dilata a través de una serie de serpentines, enfría el interior del refrigerador al dilatarse y vuelve a entrar en el compresor para un nuevo ciclo.

ROMPIENDO VACÍOS EN ALEMANIA



LA ESFERA DE VON GUERICKE. Otto von Guericke (arriba), de Magdeburgo, Alemania, inventor de la bomba de aire, exhibió su invento delante de la nobleza del Sacro Imperio Romano. Tomó dos hemisferios de cobre, puso uno de ellos sobre el otro, y extrajo el aire. A pesar de que las dos esferas no se mantenían juntas más que por la presión del aire, fueron necesarios dos troncos de caballos para separarlos. Los ciudadanos de Magdeburgo admiraban a Von Guericke lo suficiente para mantenerlo en el cargo de burgomaestre durante 35 años.



Los gases fluyen, lo mismo que los líquidos. Esta fluidez permite que el gas circule por tuberías a través de todo el país, y permite que un ama de casa en Nueva Inglaterra queme en su hornillo un gas que cinco días antes estaba enterrado en Texas.

Quizás la forma más sensacional de demostrar las propiedades de un gas es el brillante fogonazo que impulsa un proyectil al espacio. Pero una exhibición aún más espectacular se encuentra en el mundo microscópico de las moléculas gaseosas. En este mundo sub-superficial, un gas aparece como una nube de moléculas libres que bogan a través del vacío a tremendas velocidades, girando, rebotando y chocando. Las moléculas de aire golpean el cristal de una ventana a razón de trillones de veces por centímetro cuadrado y segundo. Por su tamaño, estas moléculas están relativamente distantes entre sí, pero debido a la velocidad a que se mueve la molécula media, 1.600 kilómetros por hora, choca con sus compañeras cinco mil millones de veces por segundo. Estas colisiones son «elásticas». Lo mismo que los automóviles de los parques de atracciones, las moléculas rebotan sin disipar energía.

Un centímetro cuadrado de furia

Es esta incesante furia del movimiento molecular y de las colisiones lo que explica el comportamiento característico de un gas. El impacto de trillones de moléculas por segundo y por centímetro cuadrado haría trizas el cristal si al mismo tiempo no se

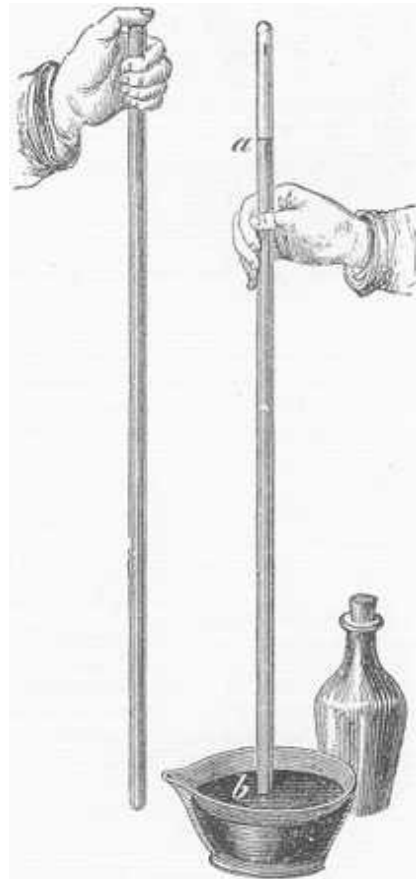
descargasen al otro lado un número igual de golpes moleculares; la enorme fuerza de esta presión gaseosa es lo que impulsa una máquina de vapor o un turborreactor. Asimismo, la elasticidad de un gas se debe a su conducta molecular desordenada; cuanto más se le comprime, más se juntan sus moléculas y más golpean la superficie del compresor, ofreciéndole una resistencia elástica. Un gas se difunde, mezcla y llena un envase de cualquier forma o tamaño debido al desenfado con que se mueven sus moléculas.

El movimiento molecular de un gas se mide por su temperatura. La expansión de un gas lo enfría porque, al apartarse, sus moléculas tienen que empujar a otras. Esto es trabajo pesado, incluso para las moléculas del gas; las retarda, y el resultado, es una temperatura inferior. A la inversa, la compresión de un gas lo calienta porque el empujón las acelera, dando al gas una temperatura más elevada.

Si bien ahora se sabe más de los gases que de los sólidos o líquidos, los gases fueron los últimos en ser identificados. Hasta el siglo XVII, tan prolífico en técnicas e instrumentos científicos, los gases eran difíciles de capturar y analizar. A diferencia de los sólidos no se les podía partir, doblar, pulverizar o amontonar en las estanterías de los químicos; tampoco podían como los líquidos, ser vertidos, empapados, congelados o hervidos. Los conocimientos que el hombre tenía de ellos se basaban principalmente en especulaciones.

Los griegos fueron los primeros en reconocer que el aire tenía consistencia. En el siglo V a. de J., Empédocles describió el funcionamiento de la clepsidra, o reloj de agua, recipiente en forma de bulbo con orificios a ambos extremos.

COMO SE PESÓ EN ITALIA LA ATMÓSFERA



EL BARÓMETRO DE TORRICELLI. Vivimos sumergidos en el fondo de un océano de aire, dijo el italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), y lo demostró el inventor un instrumento que medía el peso de ese océano, el barómetro. Primero vertió mercurio por el extremo abierto de un tubo (izquierda). Luego invirtió el tubo y lo puso en un crisol con mercurio (derecha). El mercurio bajó hasta el nivel a. No se salió completamente del tubo porque el peso del aire empujaba hacia abajo el mercurio del crisol con fuerza bastante para mantener la columna en el interior del tubo.

Cuando se le introducía en el agua con el orificio superior tapado, no se llenaba; cuando se destapaba de modo que pudiera salir el aire, entonces entraba el agua. Empédocles dedujo que el aire se había opuesto a la entrada del agua.

Convencidos de que el aire tenía consistencia, los griegos supusieron que también tendría peso, pero no pudieron confirmarlo experimentalmente. Luego el omnisciente Aristóteles, un siglo después de Empédocles, decidió que el espacio vacío no podía existir en la naturaleza. La cómoda frase «la naturaleza aborrece el

vacío» bastó durante los 2000 años siguientes para explicar los efectos del peso del aire en los primitivos sifones, fuelles y bombas.

Pero ningún erudito de los que apoyaban la tesis de Aristóteles podía explicar por qué la aversión de la naturaleza por el vacío se detenía a los 10 metros: todos los fontaneros sabían que el agua no sube más en una tubería en la que se hace el vacío. Incluso el gran Galileo, cuyos experimentos anunciaron el renacimiento científico de la Europa del siglo XVII, estaba perplejo; pero entonces encontró la solución gracias a un sencillo experimento que demostró que el aire tenía peso. Puso en sus balanzas una vasija cerrada que contenía aire a la presión atmosférica normal, y lo equilibró con un montón de arena. Luego metió aire a presión en la vasija, lo volvió a sellar, lo puso en la balanza y observó que pesaba más que la arena. Galileo razonó que el aumento de peso de la vasija sólo podía deberse a la mayor cantidad de aire en su interior.

Un pozo de sabiduría

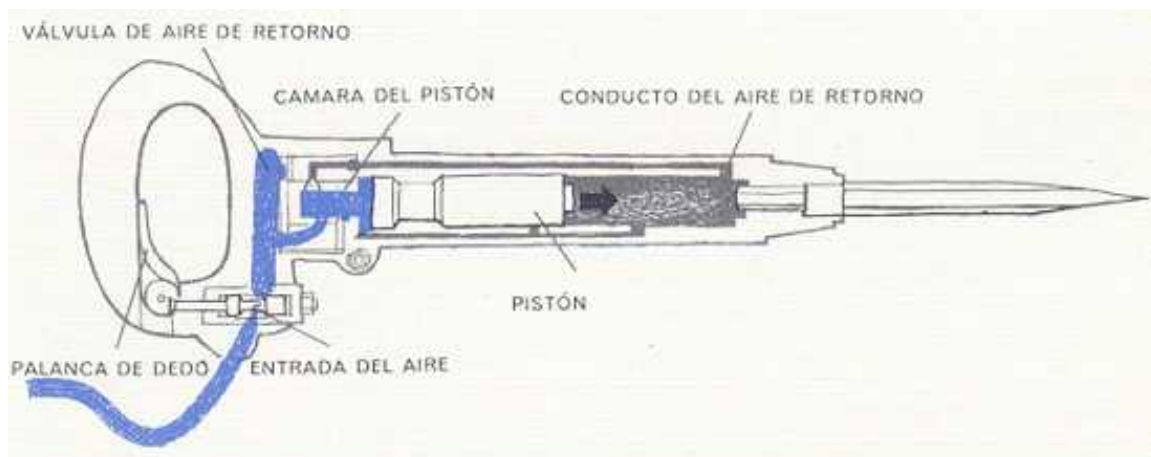
Un matemático italiano, Evangelista Torricelli, hizo dar al hallazgo de Galileo un paso adelante. Torricelli, que tenía 35 años, fue a Florencia para trabajar en investigación científica con el anciano maestro, pero se encontró con que Galileo estaba confinado en su casa por la Inquisición. Al iniciar experimentos por su cuenta, observó algo que escapara a Galileo; al introducir una tubería en un pozo y vaciarla, era el aire de alrededor, y que pesaba sobre el agua, lo que la hacía ascender por la tubería. Torricelli adivinó que la atmósfera no pesaba lo bastante para impulsar el agua a más de 10 metros de altura.

Para demostrarlo ideó un experimento a menor escala; en lugar de agua, utilizó mercurio, que es 13,6 veces más denso. Selló por un extremo un tubo de 120 centímetros y lo llenó hasta el borde con mercurio. Después de cerrar con el dedo el extremo abierto, invirtió el tubo y lo introdujo en un cuenco igualmente lleno de mercurio. Al quitar el dedo el mercurio bajó hasta cierta altura, dejando un vacío en la parte superior; quedó a una altura de 760 milímetros, lo cual demostraba que la presión del aire sobre la superficie del cuenco compensaba la presión de los 760 milímetros de mercurio. El artificio ideado por Torricelli para el experimento de 1643 constituyó el primer barómetro del mundo. Hoy en día, en los partes

meteorológicos, se indica la «presión barométrica» del aire en los términos del experimento de Torricelli, o sea, en milímetros «de mercurio».

La noticia del experimento de Torricelli llegó al joven filósofo francés Blaise Pascal, quien decidió repetirlo en gran escala. Pascal obtuvo dos tubos de cristal de 14 metros de largo; llenó uno de ellos de agua y el otro de vino tinto y observó que el peso del aire en condiciones normales podía mantener 10 metros de agua (algo más de vino), lo mismo que mantenía 760 milímetros de mercurio. Partiendo de la observación de Torricelli de que la presión ejercida por el aire en un lugar determinado se debe al peso del aire que hay encima, Pascal dedujo que las diferencias de altura afectarían la presión del aire.

Utilizó un barómetro para comparar la presión del aire al nivel de la calle y en lo alto del campanario de una iglesia. Los resultados no fueron concluyentes, pero Pascal no se desanimó; hizo que su cuñado, Florian Perier, colocase un barómetro en la base de la montaña de Puy de Dôme, en el centro de Francia, y llevase otro a la cumbre, a 960 metros. En la cumbre el mercurio se alzó ocho centímetros menos que en la base, hecho que, según el informe de Perier, «nos transportó de admiración y asombro».



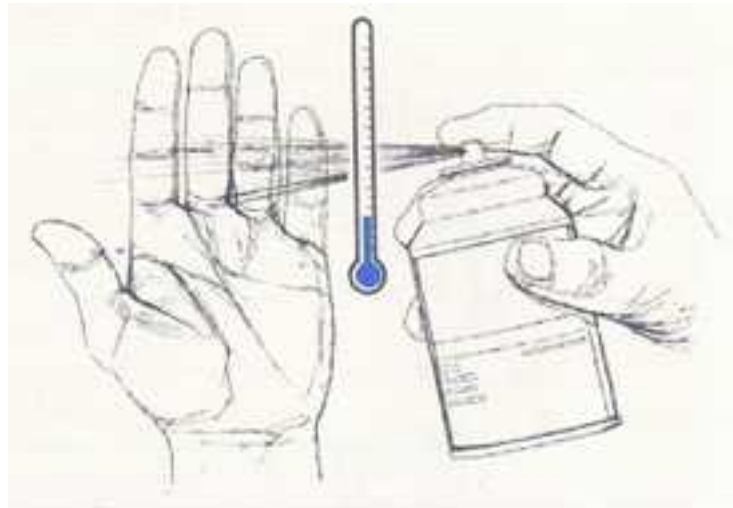
AIRE QUE PARTE HORMIGÓN. Accionado por aire comprimido, un martillo neumático puede atacar un suelo con velocidad de ametralladora, o más de 2000 golpes por minuto. Apretando la palanca de dedo se da entrada al aire, el cual lleno la cámara del pistón, lo cual proyecta el pistón contra la herramienta cortante, que golpea el hormigón. Entretanto la válvula de retorno del aire varía su posición de manera que el aire pase a través del conducto de retorno, forzando así el pistón a su posición primitiva.

Este experimento, como el de Torricelli, tuvo una consecuencia interesante, pues al evidenciar que en la tierra la presión atmosférica decrece al aumentar la altura, Pascal demostró que un barómetro, que mide variaciones de presión, puede ser también utilizado como altímetro para medir alturas sobre el nivel del mar.

Los maravillas de un burgomaestre

Al utilizar la escala y el barómetro para investigar el aire, Galileo, Torricelli y Pascal iniciaron el estudio científico de los gases. Otro adelanto consistió en la construcción de la primera bomba de vacío lo bastante potente para vaciar de aire cualquier recipiente. Tal artificio fue construido por un ingeniero y burgomaestre alemán, Otto von Guericke, y las maravillas que hizo con él le elevaron a la categoría de hacedor de milagros; una bujía se apagaba al extraerse el aire, las uvas se conservaban, el sonido dejaba de transmitirse y los animales morían.

EXPANSIVO Y FRÍO, RESTRINGIDO Y CALIENTE



UNA ROCIADA QUE ENFRÍA. Al usar una lata de aerosol salen juntos, en forma de fina pulverización, un líquido y un gas comprimido. Según indica el termómetro, la pulverización está fría porque un gas pierde color al expansionarse. Una pulverización con insecticida llega a congelar las plantas.

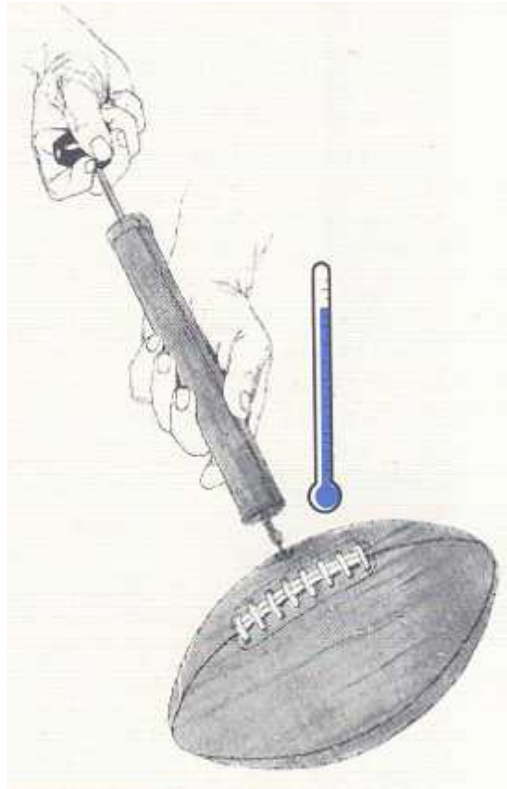
Con el tiempo, la fama local de Von Guericke se fue extendiendo: un día de 1654, en que combinó la ciencia con la espectacularidad, el emperador se hallaba presente. Von Guericke consiguió de un herrero dos hemisferios de bronce vacíos,

de unos 50 centímetros de diámetro. Los encajó por los bordes y extrajo el aire del interior. Luego enganchó un tiro de caballos a cada hemisferio, y bajo la mirada del asombrado emperador los caballos ejercieron toda su fuerza para separar los hemisferios, pero éstos permanecieron unidos, debido, según Von Guericke aseguró a la asamblea, a la presión del aire exterior.

Hacia la mitad del siglo XVII comenzó a hablarse del trabajo de Johann Baptista van Helmont, químico y médico belga, muerto en 1644 después de 13 años de investigación. Van Helmont, que inventó la palabra gas, fue también el primero en reconocer que hay diferentes clases de gases y que la «sustancia» del aire es uno de ellos. En un experimento memorable calentó 28 kilogramos de carbón vegetal en una vasija cerrada, y encontró que el peso de la vasija no variaba después de haberse reducido el carbón a medio kilogramo de cenizas; dedujo que los otros 27,5 kilogramos se habían convertido en «espíritu desenfrenado» que no había podido escapar. Al tratar de encontrar una descripción apta, Van Helmont se decidió por la palabra griega *chaos*: «Llamo a este espíritu, hasta ahora desconocido, con el nuevo nombre de gas, que no puede ni ser retenido en vasijas, ni reducido a forma visible...»

La suerte de una bujía flotante

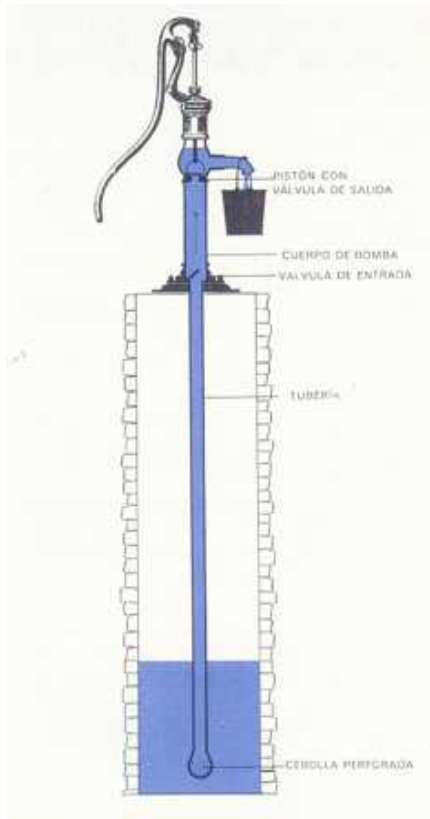
Van Helmont compartía muchas de las creencias populares de su tiempo. Estaba convencido de que se podían producir ratones por «generación espontánea», partiendo de trigo en un vaso tapado con ropa sucia.



COMPRESIÓN CALIENTE. Una bomba de pistón comprime aire en una pelota de rugby. El termómetro indica que el aire de la bomba está a temperatura superior a la ambiente, porque un gas se calienta cuando se juntan sus moléculas empujándolos. La bomba se calienta tanto que no se puede tocar.

Creía que si se aplastaba albahaca en una cavidad entre dos ladrillos, engendraría escorpiones. Pero consiguió adquirir bastante información sobre los gases. En un experimento hizo flotar sobre agua una bujía encendida y la cubrió con una taza de cristal invertida. Al observar que la llama se apagaba y que el nivel del agua subía dentro de la copa, escribió: «Hay en el aire algo que es menos que un cuerpo, que llena los vacíos del aire y que es completamente aniquilado por el fuego». Si bien este gas, el oxígeno, no fue identificado hasta siglo y medio después, Van Helmont distinguió otros 14 gases. Los encontró en lugares tan dispares como en las aguas de los manantiales minerales, y en el interior del intestino grueso del hombre.

USO DEL AIRE PARA SACAR AGUA DE UN POZO

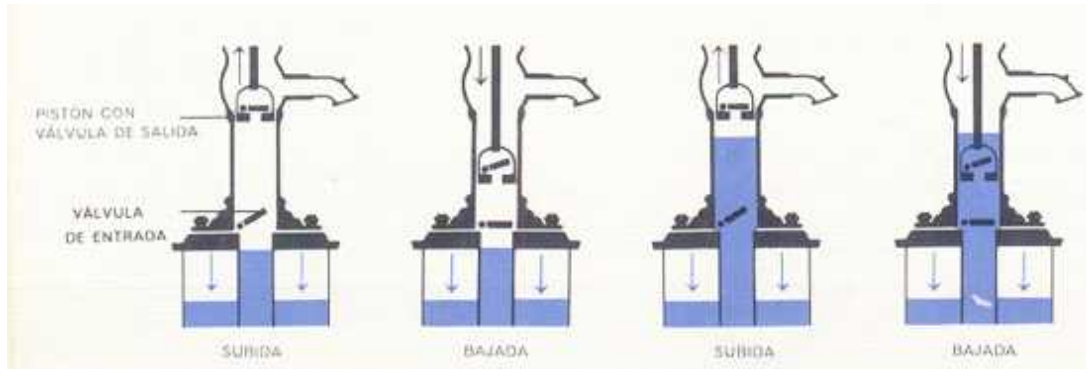


UNA PIPETA MÉDICA GIGANTESCA. La bomba de mano todavía se utiliza para sacar agua en algunas regiones rurales. Funciona como una enorme pipeta, pero con maquinaria más compleja. El peso de la atmósfera sobre el agua la hace subir por la tubería, en la cual se ha creado por bombeo un vacío parcial, como el que se hace apretando y aflojando la goma de un cuentagotas.

Como que carecía de instrumental para el análisis, la lista de gases de Van Helmont contenía algunos duplicados, pero comprendía gases hoy reconocidos, entre ellos el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, el dióxido de azufre y el óxido nítrico. Las notas de Van Helmont sobre los gases fueron leídas en Inglaterra por Robert Boyle, quien, como hemos visto anteriormente, formuló el concepto moderno de los elementos. Intrigado por el trabajo del belga, así como por la bomba de aire y los experimentos sobre el vacío de Von Guericke, y por el ensayo de Pascal sobre la presión atmosférica en la montaña, Boyle se puso a trabajar en su laboratorio, el mejor equipado de su tiempo, y efectuó un experimento que le hubiese por sí solo conseguido un lugar en los anales de la ciencia.

Boyle marcó a escala los dos brazos de un tubo en forma de J y selló el tubo más corto. Añadió luego mercurio por el brazo más largo, encerrando aire en el otro, hasta que el mercurio en ambos lados del tubo se encontró al mismo nivel; Boyle

razonó que el aire encerrado ejercía entonces una presión igual a la del aire del exterior.



CÓMO FUNCIONA UNA BOMBA ASPIRANTE. El primer golpe ascendente del pistón (extremo izquierdo) aumenta el volumen del cuerpo de bomba, lo cual crea un vacío parcial, y la presión del aire (flechas) al oprimir el agua del pozo la hace subir por la tubería de la bomba. Después de un golpe descendente, otro ascendente hace subir el agua aún más arriba. El último golpe descendente empuja el agua en dirección de la espita, y hasta el cubo.

Continuó añadiendo mercurio por el extremo abierto del tubo hasta que el volumen del aire encerrado se redujo a la mitad; para conseguirlo tuvo que añadir 760 milímetros de mercurio, y Boyle sabía por el experimento de Torricelli que 760 milímetros de mercurio equivalían al peso o presión de la atmósfera. Así, pues, había doblado la presión para reducir a la mitad el volumen del aire encerrado, demostrando que la presión y el volumen varían en razón inversa. Esto es lo que se conoce como ley de Boyle. Boyle probablemente se dio cuenta de que esa ley era sólo válida a temperatura constante, pero la variación con la temperatura no se determinó hasta después. Más tarde la ley de Boyle fue restringida aún más, siendo aplicable sólo a un gas «ideal», en el cual no hay fuerzas que actúen entre las moléculas; en los gases reales unas pequeñas fuerzas intermoleculares, llamadas fuerzas de Van der Waals, causan pequeñas desviaciones en la relación presión-volumen de Boyle.

Un temprano experto en «smog»

Los experimentos de Boyle se concentraron sobre la naturaleza física de los gases. Para determinar sus propiedades químicas faltaban medios para recogerlos y

analizarlos. Fue un londinense del siglo siguiente, Henry Cavendish, quien desbrozó este terreno. Cavendish fue probablemente el primer experto en «smog» de la historia, al recoger muestras de aire de todos los barrios de la ciudad; podría también considerársele el primer «científico del espacio», pues recogió muestras del aire superior, por medio de un globo. Pero se le recuerda principalmente por un experimento con el nuevo «aire deflogisticado» descubierto por su compatriota Joseph Priestley en 1774 (un boticario sueco, Carl Wilhelm Scheele lo había ya descubierto, llamándolo «aire ígneo», varios años antes). Ya se indicó en el capítulo 2 que el científico francés Antoine Lavoisier identificó más tarde esta sustancia, llamándola oxígeno; pero entonces se la admiraba por el «esplendor» y el «brillo» con que hacía arder las cosas. Cavendish hizo arder cantidades cuidadosamente medidas de este nuevo «aire» junto con hidrógeno, y encontró que los dos gases se convertían en su peso de agua. Ésta fue la primera prueba de que el agua era un compuesto de hidrógeno y oxígeno.

En el otro lado del Canal de la Mancha, Lavoisier repitió el experimento de diversas maneras con sus balanzas. No solamente combinó oxígeno e hidrógeno formando agua, sino que invirtió el proceso y descompuso agua en los dos gases. Mostró que el agua podía ser convertida en vapor, y luego lo condensó sin que hubiera alteración de peso. Lavoisier adujo el resultado de estos experimentos en apoyo de su principio: que en las reacciones químicas la materia, sólida, líquida o gaseosa, ni se crea ni se destruye. Suplementó esta teoría con otros estudios sobre la combustión de diversas sustancias, fósforo, carbón vegetal, aceite de oliva, cera, e investigó la fermentación y putrefacción.

Nacimiento de un «best seller»

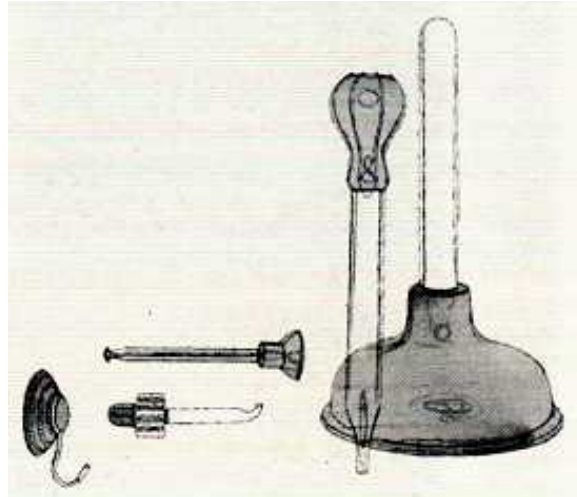
El talento de Lavoisier no se limitó a la experimentación: consolidó mucha información fragmentaria sobre los gases, y también decidió «mejorar el lenguaje químico de su día». Esto le condujo a escribir su voluminoso tratado de química, pues, según dijo, «no podía separar la nomenclatura de una ciencia, de la ciencia misma». El resultante *Traité Élémentaire de Chimie*, con su sección bellamente ilustrada de instrumentos de laboratorio de química, consiguió un éxito enorme, no

solamente en su país, sino también en las subsiguientes ediciones inglesa, holandesa, española, italiana y mexicana.

Así como otras lumbreras de la ciencia habían antes sufrido a manos de la Inquisición, Lavoisier fue condenado por un tribunal laico. Cuando joven había adquirido intereses en una participación de *Fermier Général*, corporación financiera con licencia real para recaudar impuestos; con las rentas pagaba las cuentas de sus experimentos. Pero con la Revolución Francesa todos los directores de los odiados *Fermier Général* fueron acusados de corrupción y sentenciados a la guillotina. Una petición de clemencia presentada en favor de Lavoisier fue rechazada con las siguientes palabras: «La República no necesita sabios». Murió ejecutado en el año 1794.

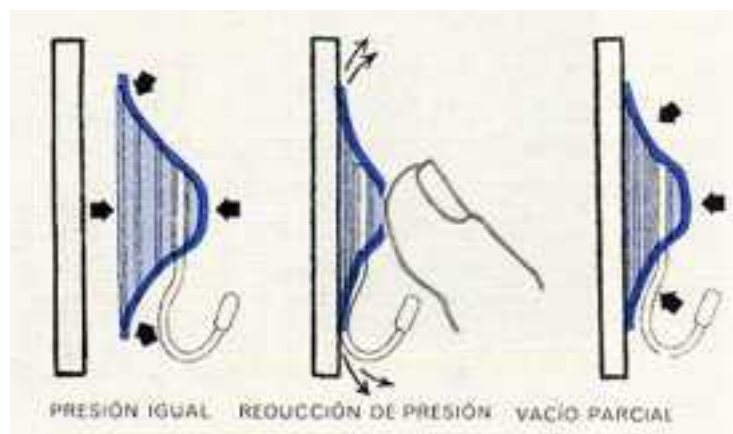
El fermento político de aquellos tiempos tenía su contrapartida en una creciente tempestad intelectual. A medida que aumentaba la actividad en todos los frentes científicos, los químicos de Europa se dividían en una controversia histórica. John Dalton, en Inglaterra, al idear el sistema de pesos atómicos descrito en el capítulo precedente, propuso el trascendental concepto de que cada elemento está compuesto de átomos idénticos del mismo peso, y que éstos se combinan de diversas maneras formando lo que describió como «átomos compuestos» (ahora llamados moléculas).

INSTRUMENTOS Y JUGUETES QUE FUNCIONAN POR AIRE



CIENCIA DETRÁS DE LA SUCCIÓN

La ventosa, el cuentagotas médico, la flecha de juguete, y el desatascador de desagües (arriba) funcionan por la acción del aire. En esencia son todas variaciones de una sencilla ventosa, que funciona según los tres tiempos que mostramos más abajo. (1) cuando no se aprieta la ventosa contra la superficie, la presión del aire (flechas gruesas) es la misma para todos lados. (2) Al aplastarla contra la pared sale la mayor parte del aire (flechas finas). (3) La copa elástica recobra su forma originando un vacío parcial. La presión externa (flechas gruesas) mantiene la ventosa contra la pared.



Esta idea estaba de acuerdo con las observaciones empíricas de que cuando un elemento se combina de dos maneras diferentes con un peso determinado de otro elemento, los dos pesos del primer elemento están en una relación de números enteros. Pero la teoría de Dalton no explicaba el hallazgo de un químico francés,

Joseph Gay Lussac, de que un volumen de oxígeno y un volumen de nitrógeno producían no un volumen de óxido nítrico, sino dos. Dalton insistía en que los gases consistían en átomos sencillos en estrecho contacto entre sí, y que solamente podía formarse un volumen de óxido nítrico de un volumen de nitrógeno y uno de oxígeno. Incluso acusó a Gay Lussac de descuido en sus medidas.

Una teoría de floración tardía

En 1811, un profesor italiano de física, Amadeo Avogadro, emitió una hipótesis que más tarde determinó todo el curso del pensamiento científico sobre los gases y su composición.

Gas	Porcentaje en el aire
Nitrógeno	78,09
Oxígeno	20,95
Argón	0,93
Dióxido de carbono	02-04
Neón	0,0018
Helio	0,0005
Kriptón	0,0001
Hidrógeno	0,0005
Xenón	0,000008
Ozono	0,000002
Radón	(Pequeños vestigios)

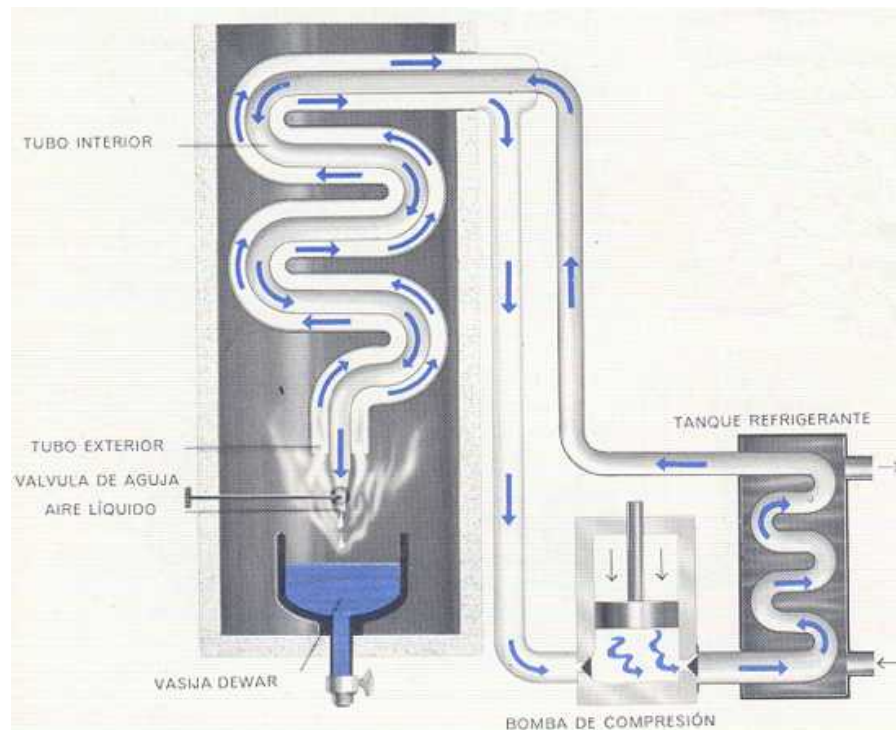
Temperatura de licuación	
Radón	— 61,8° C
Xenón	—107,1° C
Ozono	—112,0° C
Kriptón	—152,9° C
Oxígeno	—183,0° C
Argón	—185,7° C
Nitrógeno	—195,8° C
Neón	—245,9° C
Hidrógeno	—252,8° C
Helio	—268,9° C

<i>Pasa directamente a sólido a</i>	
Dióxido de carbono	—78,5° C

El AIRE A NUESTRO ALREDEDOR. La primera tabla muestra los componentes del aire, en orden decreciente de abundancia. Como la composición del aire varía según factores tales como la estación y la latitud, estos porcentajes son promedios. La segunda tabla indica la temperatura a que se licuan estos componentes.

Avogadro hizo dos atrevidas suposiciones: que los elementos gaseosos, a diferencia de los sólidos y los líquidos, existen en moléculas diatómicas, o sea, de dos átomos cada una; y que volúmenes iguales de gases a la misma temperatura y presión

contienen el mismo número de moléculas. Así que los volúmenes de oxígeno y nitrógeno de Gay-Lussac contenían el doble de átomos de los que suponía Dalton, y podían en efecto producir dos volúmenes de óxido nítrico.

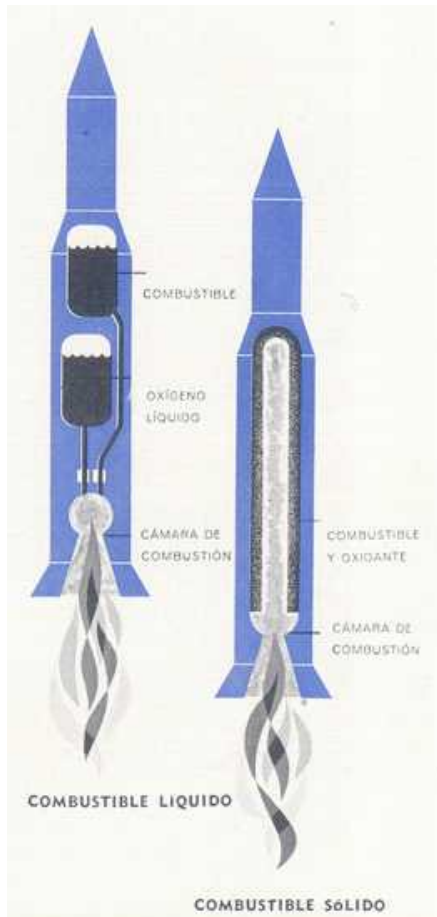


LICUACIÓN DE LA ATMÓSFERA. Para licuar el aire es primero preciso comprimirlo con una bomba y hacerlo circular por un tanque refrigerante. El aire frío comprimido se escapa entonces a través del tubo interior de un serpentín de paredes dobles. Después de pasar por una válvula de aguja, se expande con tanta velocidad que su temperatura desciende rápidamente. El aire sube por el tubo externo del serpentín y vuelve al compresor, donde se repite el ciclo hasta que el aire se enfría a -194°C , se licúa y gotea en una vasija Dewar.

En el calor de la disputa, la hipótesis de Avogadro pasó inadvertida porque no consiguió aclarar su concepto de molécula, utilizando en su lugar la palabra «partícula». 50 años más tarde otro italiano, el químico Stanislao Cannizzaro, desempolvó la hipótesis de Avogadro y la utilizó para determinar los pesos atómicos de los gases. Avogadro fue honrado más tarde al dar su nombre a una constante física. El número de Avogadro, del cual él nunca oyó hablar, es el número de moléculas gaseosas contenidas en un «mol», que es la cantidad que ocupan 22,4

litros a temperatura y presión normales. Numéricamente es $6,02 \times 10^{23}$, o sea, 600.000 trillones de moléculas.

Mientras los químicos seguían discutiendo cómo se combinan los gases, un físico llamado Michael Faraday, hijo de un herrero inglés, seguía una nueva línea de investigación de enormes consecuencias prácticas para el futuro. En 1823 Faraday decidió averiguar qué sucede cuando se comprime y enfría un gas. Utilizando un tubo de vidrio doblado, puso cristales de un compuesto de cloro en el brazo más corto, selló el tubo y sumergió luego el brazo más largo en una mezcla congeladora. Calentando los cristales hizo que se desprendiese gas y aumentase la presión; a medida que el gas se fue desplazando hacia la zona fría del tubo se iba condensando.



PROPULSIÓN GASEOSA HACIA EL ESPACIO. Un cohete de combustible líquido (izquierda) lleva un tanque de combustible y un tanque de oxígeno líquido, los cuales se unen en la cámara de combustión, el calor que se produce hace dilatar tanto los gases resultantes que estallan, saliendo por el tubo de cola. En un cohete de combustible sólido (derecha), el combustible y el oxidante se mezclan en una masa sólida. Una chispa los hace arder. La fuerza de los gases que surgen, impulsa el cohete.

Éste fue el primero de muchos experimentos en los cuales Faraday licuó un gas. Utilizó la misma técnica con sulfuro de hidrógeno (que da a los huevos podridos su

olor característico), dióxido de azufre, amoníaco y otros gases. Pero no lo consiguió con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno; los cuales fueron llamados «gases permanentes» por su resistencia a pasar al estado líquido. Más tarde se averiguó que cada gas tiene una «temperatura crítica» por encima de la cual no se puede licuar. Para los gases permanentes estas temperaturas son bajísimas.

Tal temperatura fue alcanzada para el oxígeno en 1877 por dos hombres que trabajaban independientemente: Louis Paul Cailletet, metalúrgico de Châtillon-Sur-Seine, Francia, y Raoul Pictet, profesor de física en Ginebra. La temperatura crítica del oxígeno resultó ser sub-ártica, $-119\text{ }^{\circ}\text{C}$. 30 años más tarde todos los gases conocidos habían sido licuados; el último en sucumbir fue el helio en 1908, a manos de H. Kamerlingh Onnes, físico holandés. El punto crítico al cual el helio se licuó fue $-268\text{ }^{\circ}\text{C}$, solamente $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima del «cero absoluto», temperatura a la cual las movedizas moléculas llegarían a detenerse por completo.

El helio y los gases con él emparentados, no sólo eran difíciles de licuar, sino que también eran difíciles de encontrar. Llamados gases «inertes» o «nobles» porque rechazaban a los otros elementos, fueron descubiertos en el curso de una de las grandes historias de detección química. La pista se inició en 1785, cuando Henry Cavendish, en un experimento con aire, observó una pequeña burbuja de gas «no mayor de $1/120$ del total» que no tomaba parte en la reacción química. La importancia de esta observación se ignoró durante más de un siglo. En 1894 dos ingleses, J. W. S. Rayleigh y William Ramsay observaron el misterioso gas en el aire y lo analizaron con un espectroscopio, aparato que identifica gases por las líneas coloreadas que presenta cuando se hace pasar una corriente eléctrica a su través. Este gas, que parecía no tener propiedad química alguna, mostraba líneas rojas y verdes jamás observadas antes. Rayleigh y Ramsay lo llamaron argón, «el perezoso».

Acumulación de pistas

Anteriormente, durante un eclipse de sol en 1868, un astrónomo francés, Jules César Janssen, observó una brillante línea amarilla en el espectro del sol, que fue atribuida a un elemento desconocido, y que recibió el nombre de *helios*, palabra griega que designa al sol. Trece años más tarde un físico italiano, Luigi Palmieri,

observó la misma línea en los efluvios del cráter del Vesubio, y un químico americano, William Hillebrand aisló más tarde, de un mineral de uranio, un gas inerte con el mismo espectro. Partiendo de todos estos datos, Ramsay identificó al helio. Poco más tarde fueron hallados los demás gases raros; Ramsay y su ayudante, M. W. Travers, identificaron el criptón, el neón y el xenón en 1898, licuando el aire y examinando el residuo que quedaba después de evaporar el oxígeno y el nitrógeno. El último gas inerte, el radón, fue descubierto en 1900 por un profesor alemán, Ernst Dom, entre los productos de desintegración radiactiva del radio.

La mejor manera de separar los gases contenidos en el aire ha resultado ser la licuación del mismo; esto se ha convertido en una industria de mil millones de dólares anuales. En volumen, el aire contiene 78,09 por ciento de nitrógeno, 20,95 por ciento de oxígeno, 0,93 por ciento de argón, 0,02 a 0,04 por ciento de dióxido de carbono, 0,0018 por ciento de neón, y vestigios de hidrógeno, helio, criptón y xenón. A medida que se evapora el aire líquido, cada uno de los gases se extrae en su punto de ebullición. Una vez aislados, estos gases son inestimables. El helio se utiliza en la producción del circonio, metal de gran tenacidad y resistente a la corrosión; el argón en soldadura; el criptón en bombillas eléctricas; el xenón es un anestésico que produce un sueño semejante al natural.



DE UN HIELO ARDIENTE, PALOMITAS FRESCAS. Las compradoras de palomitas heladas, pueden tener la certeza de que lo que compran no estará fundido, porque el contenido del carrito se mantiene por debajo de la congelación gracias al hielo seco (dióxido de carbono helado), cuyo frío quema los dedos al tocarlo. El frío hace que el vapor de agua del aire se condense en forma de niebla blanca.

La tecnología de los gases licuados ha avanzado desde la segunda Guerra Mundial, cuando se utilizó el oxígeno líquido en las bombas V2 alemanas que cayeron sobre Londres. Los proyectiles espaciales actuales lo utilizan como oxidante, y los astronautas respiran su vapor. Un combustible espacial aún más potente es una combinación de hidrógeno y flúor líquidos; se están estudiando motores de cohetes que utilizan este combustible. El oxígeno líquido, que se produce a menos de cinco dólares por tonelada, se usa en los hornos de acero. El nitrógeno líquido refrigera vagones de alimentos, congela frutas y verduras, y conserva sangre y tejidos del cuerpo humano indefinidamente. La investigación a las temperaturas superfrías

necesarias para licuar estos gases ha abierto la nueva frontera de la ciencia llamada criogenia, algunas de cuyas maravillas mostramos a continuación.

Tales han sido los beneficios que ha proporcionado al hombre la materia en su forma más tenue y que en tiempos pasados se temió fuese incluso demasiado huidiza para ser examinada.

El extraño mundo de lo superfrío

El mordisco de la helada, el filo cortante del viento invernal, en eso pensamos al hablar de frío. Pero pocas veces son las heladas y el viento tan frías como el «hielo seco» del carrito de helados de la página opuesta.



EBULLICIÓN A TEMPERATURA AMBIENTE. Estos tres matraces Dewar de aislamiento al vacío (el equivalente para el químico de los termos) contienen, de abajo a arriba, respectivamente, argón, oxígeno y nitrógeno líquidos. Su bajo punto de ebullición hace que, al ser expuestos al calor del laboratorio, se evaporen pasando al estado gaseoso; el vapor de agua del aire se congela formando nubes de hielo.

Incluso el hielo seco, que es la cosa más fría (-78°C) con que la gente suele encontrarse, resulta tropical en comparación con los fluidos superfríos obtenidos por criogenia (del griego *kryos*, frío como hielo, y el sufijo *gen*, que significa producir).

La nueva ciencia estudia el comportamiento de la materia a temperaturas bajísimas; todo lo que sea por encima de -190°C le parece demasiado caliente.

REACCIÓN DE FLORES Y METALES, BAJO UN FRÍO EXTREMO

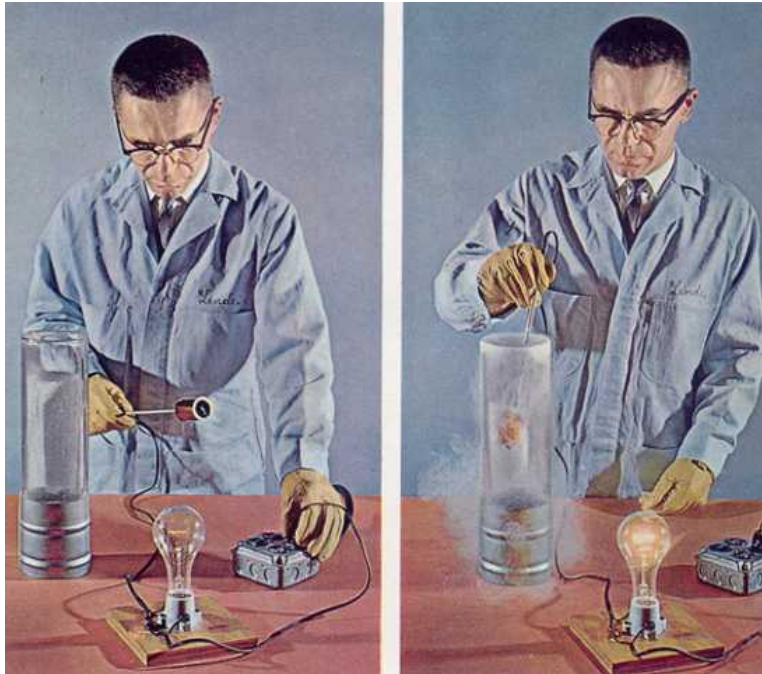


Cuando se introduce un clavel en nitrógeno líquido, se convierte en tan quebradizo, al helarse, que se deshace en la mano.

Ha conseguido descender hasta una millonésima de grado del «cero absoluto» que está a 273°C bajo cero, la temperatura más fría del universo. Las cosas se comportan de extraño modo en los laboratorios de criogenia; las corrientes eléctricas fluyen en movimiento «perpetuo», y los líquidos desafían la gravedad.

Caprichosos fluidos que desafían lo convencional

Si el termómetro descendiese alguna vez a -194°C , la antigua metáfora de la atmósfera como “océano de aire” se haría realidad; al llegar a dicho punto el aire se convierte en un líquido azul pálido desmesuradamente frío. Sumergida en aquel mar, la vida animal se extinguiría, pero el aire líquido es la base de la criogenia.



UNA DÉBIL INCANDESCENCIA. El experimentador introduce una clavija en un enchufe, en ausencia de temperaturas criogénicas. Así completa un circuito eléctrico con un carrete de alambre y una bombilla. Aquél retarda la electricidad, ésta apenas brillo. Derecha, UN BRILLANTE RESPLANDOR; Este circuito es el mismo que el de la izquierda, pero aquí se ha sumergido el carrete en nitrógeno líquido muy frío. A esa baja temperatura el carrete pierde casi toda su resistencia, y la bombilla brilla con luz resplandeciente.

Los tres constituyentes principales del aire son el nitrógeno (78,09 %), oxígeno (20,95 %) y argón (0,93 %). En estado líquido estos elementos presentan muchas y útiles propiedades. El argón líquido, químicamente inerte, hierve a -186°C . Se usa en electrónica para hacer crecer los pequeños cristales de los transistores. El oxígeno líquido hierve a -183°C y está tan solicitado para la conversión del hierro en acero y para propulsar cohetes al espacio, que se produce industrialmente a razón de una tonelada por segundo. El nitrógeno líquido, químicamente casi inactivo, hierve a -196°C , no es ni explosivo ni tóxico, y constituye el mejor refrigerante para alimentos y órganos vivos. Ha sido utilizado en la congelación de sangre para almacenamiento indefinido y para conservar activo el corazón de un pollo. Los “criobiólogos” creen que algún día podrá utilizarse para mantener un organismo vivo entero hibernando durante años.

Partiendo de los gases más fríos, los cohetes más ardientes

Fabricado por vez primera en 1932, el oxígeno líquido adquirió notoriedad al ser utilizado en la V-2 alemana que sembró la destrucción en Londres en 1944.



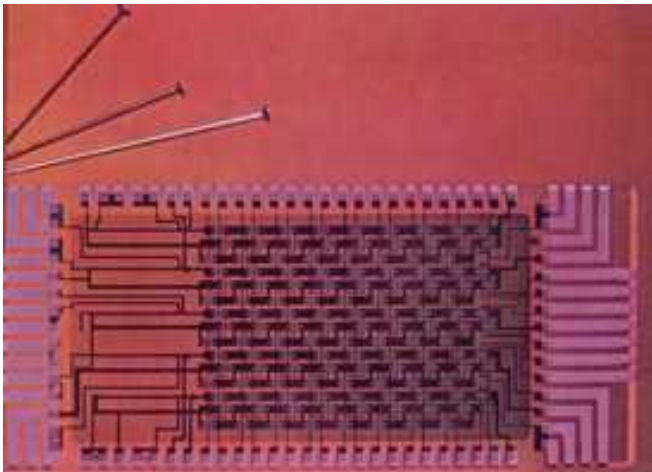
LOX EN UNA TENTATIVA A LA LUNA. El cohete Juno II, en Cabo Cañaveral está recibiendo un cargamento de LOX (se necesitan 36 toneladas para el despegue). El objeto del Juno II en 1959, consistía en propulsar el Pioneer IV para estudiar los cinturones de radiación entre la tierra y la luna.

Aquellos proyectiles funcionaban prácticamente como los actuales. En la V-2 se quemaba alcohol con oxígeno, formando vapor caliente a presión; el vapor salía comprimiéndose a través de una boquilla en la cola. Como en estado gaseoso el oxígeno ocupa demasiado espacio para poder ser transportado por un cohete, los alemanes utilizaron oxígeno líquido, llamado LOX, que tan sólo ocupa una fracción del espacio del oxígeno gaseoso.

Los cohetes actuales utilizan combustibles distintos del alcohol, petróleo en el caso de los gigantes de estas páginas, pero la mayor parte continúa utilizando oxígeno líquido. Muchos cohetes futuros utilizarán como combustible el extremadamente frío hidrógeno líquido (punto de ebullición -253°C). Este fluido arde fácilmente y, siendo su peso atómico el más bajo, determina el escape de máxima velocidad. Al ser oxidado por el LOX, su empuje es un 40 % mayor que el de un pesado chorro de petróleo y LOX. Ese ligero escape puede que sirva para propulsar la primera expedición a otro planeta.



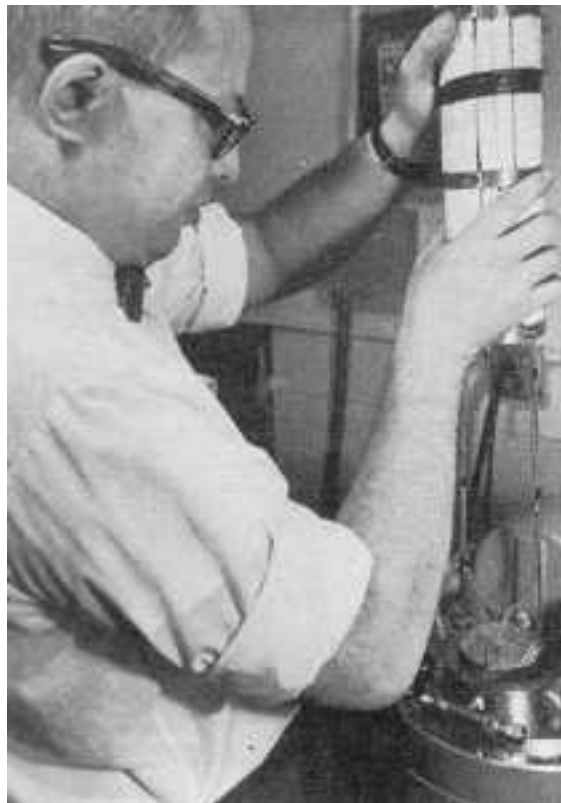
UN ASTRONAUTA SOBRE HIELO Y FUEGO. Seguido de una estela de hielo, despegue un cohete Atlas (derecha) con el astronauta Walter Schirra. El hielo se forma al helarse la humedad del aire al contacto con los tanques de oxígeno líquido. Como el LOX es muy volátil, se carga en el cohete minutos antes del despegue.



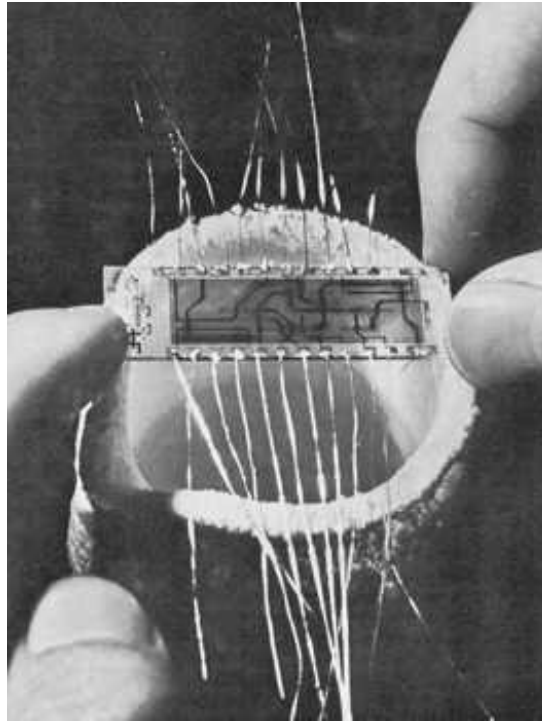
CÉLULAS CEREBRALES DE UN COMPUTADOR. Un «plano de memoria criogénico como los que se utilizan en los computadores más rápidos no es mucho mayor que un alfiler. Esta unidad tiene una red de 135 pequeños criotrones rectangulares chapeados en su superficie de cristal: funcionan como células cerebrales. Un plano de este tamaño recuerda 40 informaciones diferentes.

El frígido corazón de los modernos computadores

En el desolado abismo cercano al “cero absoluto”, muchos metales pierden repentinamente toda su resistencia a la electricidad. Cuando se aplica una corriente a uno de tales circuitos, se hace cada vez más potente porque no hay nada que lo impida. Si se suprime el voltaje, la corriente continúa fluyendo, la antigua fantasía del movimiento perpetuo hecha realidad. Se necesita muy poca energía para iniciar tal corriente y ninguna para mantenerla. Una consecuencia son los pequeños circuitos superconductores que están revolucionando las complejas “máquinas de pensar”, los computadores electrónicos. Cuando se enfrían a -269°C del helio líquido, los circuitos computadores criogénicos necesitan tan poca potencia que pueden construirse de tamaño miniatura y veloces como el relámpago.



DESCENSO A LO PROFUNDO. Se está a punto de sumergir un circuito criogénico en un refrigerador de helio líquido para ensayar la eficiencia y la duración de sus conductores metálicos a bajas temperaturas. El refrigerador se mantiene a -269°C .



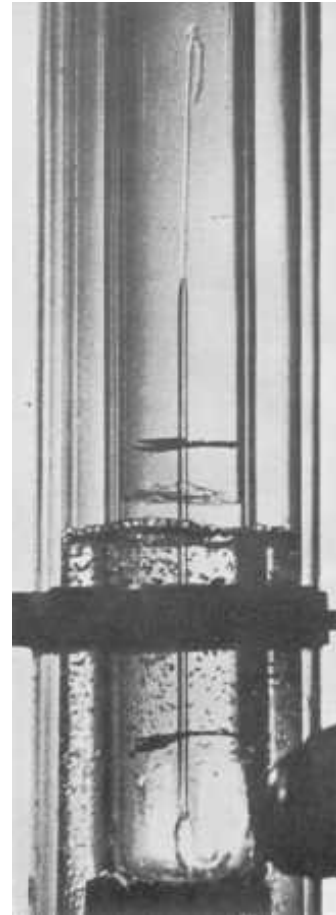
PELÍCULAS DELGADAS Y ACCIÓN RÁPIDA. El circuito representado arriba se convierte en un superconductor por la temperatura del helio líquido. Si bien lleva unidos alambres, ninguno de ellos está en el interior del circuito; sino que lleva la corriente por un enrejado de películas metálicas de 0,0005 milímetros de espesor. Los corrientes que fluyen por las películas verticales del enrejado crean campos magnéticos que interrumpen las corrientes en las películas horizontales. La interrupción se produce con gran rapidez, se cree que tarda 25 mil millonésimos de segundo. Estas velocidades son necesarias en los computadores, pues el hombre les presenta problemas complejos.

Extraordinarias rarezas del helio líquido

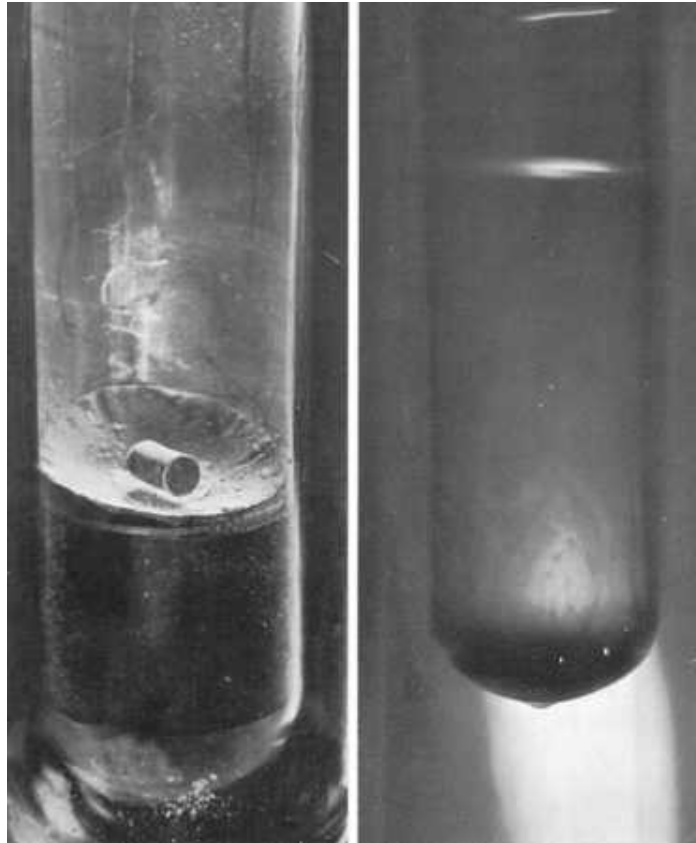
Si bien el gas helio ha recibido su nombre del lugar más caliente del sistema solar (Helios es sol en griego), puede convertirse en el más frío de los fluidos. No se licúa sino a la temperatura de -269°C . Cuando se le enfría dos grados más se desvía tan radicalmente de su comportamiento normal que los científicos lo rebautizan helio II. Una de sus travesuras es hacer que los imanes metálicos floten en el aire. Desobedece a la gravedad, fluyendo como si nada se opusiese a su movimiento, como el surtidor y la película trepadora.

Los científicos estudian su comportamiento para que les ayude a comprender los líquidos más corrientes, lo mismo que los psicólogos estudian seres anormales para que les ayuden a comprender al hombre medio.

Hasta ahora el helio II sigue cautivo en el laboratorio. Su pariente algo más caliente, el helio I, se va abriendo camino en trabajos útiles, tales como mantener fríos los motores de los cohetes.



VACIANDO UN BARRILETE MUY FRÍO (Izquierda) Aquí están llenando un matraz de helio líquido que se saca de un crióstato, aparato para licuar gases. Primero se comprime el gas y se enfría con otro gas líquido. Luego se le deja expandir, con lo cual se enfría más; se vuelve a comprimir, enfriar y expandir, hasta que el gas se convierte en líquido. UNA FUENTE FRENÉTICA (Derecha). Una débil luz suministra suficiente calor para convertir algunos de los átomos del helio II del interior del tubo delgado, en helio líquido normal. Pero para reemplazar los átomos perdidos, el helio II se precipita al interior del tubo de modo que hace saltar el líquido.



IMÁN PLANEADOR (Izquierda). En un baño de helio líquido, un plato de plomo se convierte en superconductor. Cuando se coloca una barra imantada cerca de él, la barra induce una corriente en el plomo. Al no encontrar resistencia, la barra lo convierte en un electroimán que mantiene la barra flotando. PELÍCULA TREPADORA (Derecha). Cuando se saca un vaso lleno de helio II de una masa del mismo líquido, aquél se comporta como ninguna otra sustancia conocida: se sale de su recipiente, trepa en forma de película invisible por los paredes del vaso, paso por sobre el borde, y baja por el exterior.

Enanos con músculos de gigantes

Los enormes electroimanes vitales para la investigación moderna necesitan millones de vatios de potencia y miles de litros de agua para enfriarlas; tales requisitos hacen que los grandes electroimanes no sean prácticos. Se descubrieron luego los pequeños conductores criogénicos, que a temperaturas próximas a las del helio líquido se convierten en fuentes de magnetismo. Sus núcleos pueden ser como un puño (derecha), pero tienen la misma potencia de los antiguos imanes. Estos imanes enanos son portátiles, no necesitan energía para funcionar, y pueden efectuar trabajos que los imanes corrientes nunca realizarían, como extraer del

cuerpo partículas metálicas y formar una coraza magnética para proteger a los astronautas de la radiación en el espacio.



BAÑO FRÍO QUE DA FUERZA. A punto de ser sumergido en helio líquido por unos físicos del Laboratorio Bell, este cilindro de aleación de niobio y estaño se convertirá en un formidable imán de una fuerza de 24.000 gauss. El niobio-estaño, que es el mejor metal que se conoce para imanes superconductores, pierde instantáneamente su potencia cuando se le saca de su helado baño.



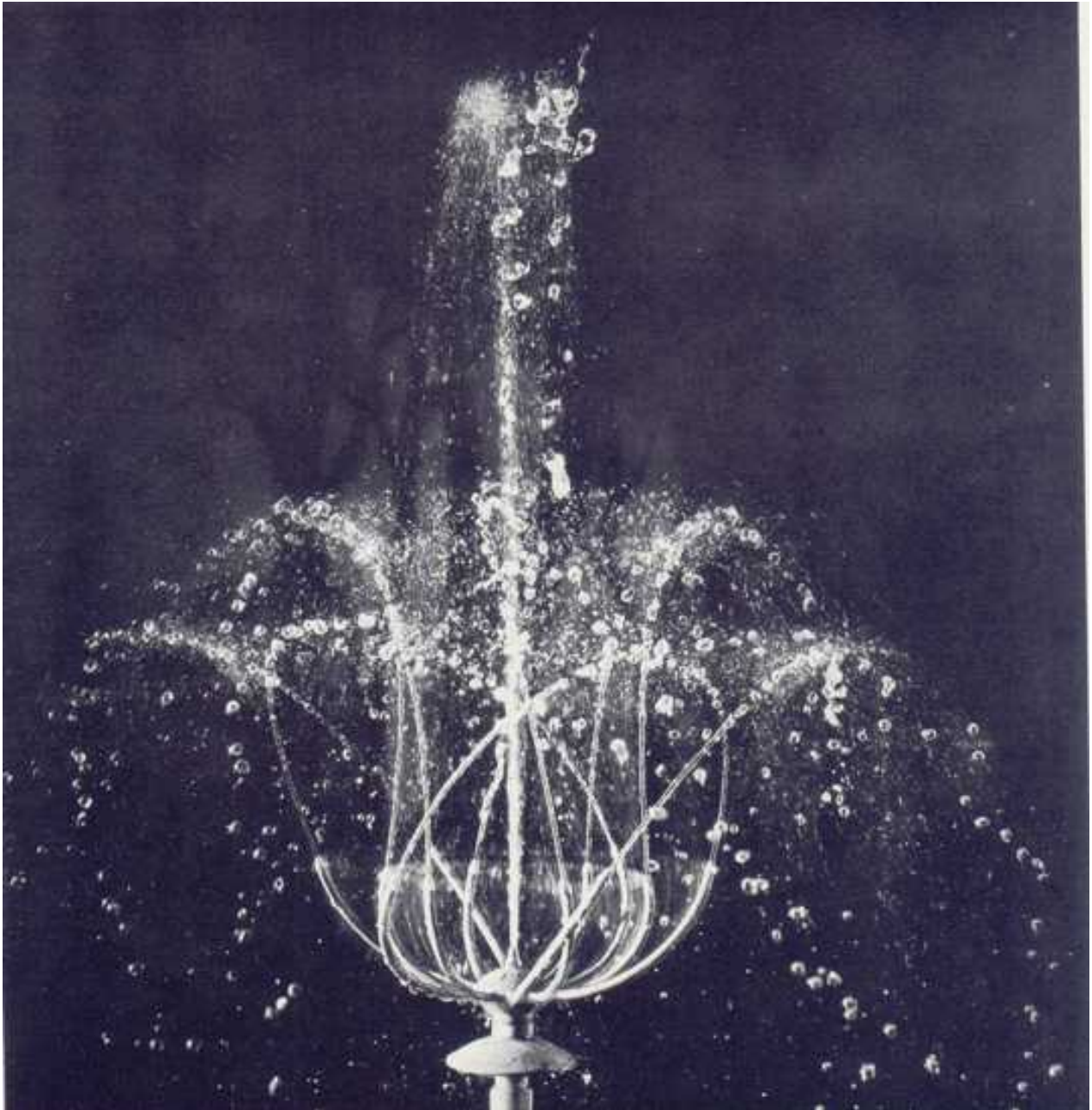
SUJETADORES DE PAPEL HIPNOTIZADOS. En las Laboratorios Avco-Everett de Everett, Massachussets, un solo imán en el interior de una vasija Dewar con helio líquida muestra su fuerza sobre 221 sujetadores de papel, cada uno colgado libremente de una chinche. Con disciplina de soldados, los sujetadores se sitúan de modo que deja «ver» las líneas de fuerzas de las polos del imán.



HOMBRE CONTRA IMÁN. El mismo imán de la figura anterior presenta otra exhibición. Su atracción sobre la llave Stillson, de kilo y medio, es tan grande, que solamente la fuerza que el técnico ejerce tirando de la cuerda impide que se precipite violentamente contra el imán. Estos imanes realizan proezas como éstos sin necesitar ninguna ayuda de la electricidad.

Capítulo 4

La incesante agitación del estado líquido



AGUA EN SU ASPECTO MÁS JUGUETÓN. La estructura floreada de esta fuente en acción muestra la fluidez controlable de la materia en su estado líquido. Las moléculas de los sólidos están demasiado juntas entre sí, y los de los gases demasiado sueltos para permitirse tan graciosas cabriolas.

En nuestro lenguaje cotidiano reconocemos con frecuencia algunas características del estado líquido; describimos una situación internacional como «fluida»; hablamos de «verter aceite en aguas revueltas» o de acontecimientos que se producen con el «ímpetu de un torrente». Cuando utilizamos tales frases casi nunca nos damos cuenta de que descansan sobre una base científica.



EL MOVIMIENTO MOLECULAR SEGÚN CÓMO SE ENCUENTRA EL AGUA. De todas las sustancias, sólo el agua es familiar al hombre en los tres estados físicos, gas, líquido y sólido. En cualquier estado, las moléculas de agua están formadas por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno, la conocida fórmula H_2O . Pero al variar su estado, varía el comportamiento molecular, como muestran los diagramas de más abajo.

La materia en estado líquido es al mismo tiempo trivial y contradictoria. Los líquidos se hallan entre los gases y los sólidos, y como ocurre a veces con el hijo intermedio de una familia, presentan una inquieta dualidad.

En sus momentos libres se mueven como los gases, fluyen casi con la misma facilidad, y son igualmente desordenados e informes. Pero cuando se les contiene, conservan una forma tan definida como la de un sólido; acostumbran a ser igualmente compactos, y tienen dimensiones definidas que no se pueden reducir.

Otra contradicción de los líquidos es que son al mismo tiempo abundantes y escasos en la naturaleza. El agua, que es el líquido fundamental, cubre las tres cuartas partes de la superficie de la tierra, y constituye el 60 por ciento del peso de nuestro cuerpo. Pero el agua y el petróleo, que está almacenado en la corteza terrestre, son los únicos líquidos que existen en la naturaleza en grandes cantidades.



CAOS EN EL VAPOR. En este modelo de moléculas de vapor, la bola grande es el átomo de oxígeno, las bolas pequeñas son hidrógeno. En el gas, las moléculas están muy separadas, se mueven con rapidez

De vez en cuando un volcán enfurecido vomita lava fundida. Existen también ciertos fluidos orgánicos, a su vez compuestos principalmente de agua; los de nuestro cuerpo, incluida la sangre, la savia de los árboles y plantas, el zumo azucarado del arce, la resma de los pinos, y el aceite de las olivas, los cacahuetes, y la semilla de algodón.



RIGIDEZ EN EL HIELO. En la forma sólida las moléculas del agua permanecen mantenidas por fuerzas de atracción. Cuando están helados, se disponen en forma de anillos huecos dando al hielo su escasa densidad.

De más de ochenta elementos que existen en la naturaleza, sólo dos son líquidos. Uno de ellos es el mercurio, la movediza sustancia de los barómetros; el otro es el bromo, fluido humeante de color pardo rojizo, que en forma de compuestos ayuda a tranquilizar nuestros nervios. El bromo y el mercurio contribuyen a resaltar la rareza de los líquidos naturales; el mercurio rara vez se encuentra en su forma líquida pura; el bromo no se halla nunca solo en la naturaleza.

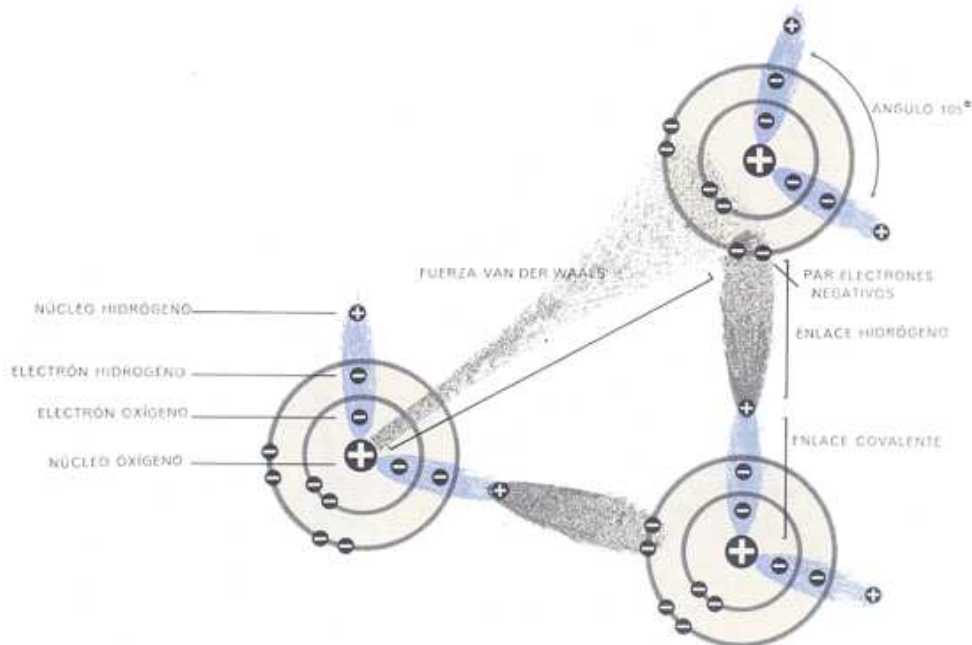
La mayor parte de los líquidos son producto del ingenio del hombre: aceite vegetal, alcohol, gasolina, glicerina, glicol, acetona y otros. Sus variedades y usos son numerosos, y abarcan desde los productos de limpieza llamados comúnmente detergentes, al glicol etilénico, anticongelante para automóviles.

Además de los líquidos básicos hay las mezclas de líquidos, que son de tres tipos: disoluciones, en las cuales la sustancia disuelta desaparece; suspensiones, donde las partículas acaban por sedimentarse, y dispersiones coloidales, donde las partículas, si bien son invisibles a simple vista, mantienen su identidad. El amoníaco corriente, gas amoníaco disuelto en agua, es una disolución; la loción de calamina es una suspensión. Entre los tipos de coloide se encuentran el gel, de sólido en líquido (por ejemplo, gelatina); el sol, menos coherente, de sólido en líquido (leche de magnesia); y una variedad del sol, llamada emulsión, de líquido en líquido, cuyos componentes vuelven a su condición original a menos que se unan con un «estabilizador». El aceite y el agua permanecen emulsionados si se añade jabón a la mezcla; y el aceite y el vinagre si se les añade yema de huevo.

El hombre que identificó oficialmente los coloides, y los designó con el nombre griego para cola, fue un químico escocés del siglo XIX, Thomas Graham, que dio con ellos al investigar la difusión de los líquidos. Hay pocos científicos que se hayan dedicado al estudio de los líquidos; la mayor parte de lo que de ellos sabemos se ha conseguido a través del estudio de los gases. Además de sus estudios de laboratorio, se recuerda también a Graham por haber recomendado que cuando se vendiese alcohol etílico para investigación, se le añadiese el venenoso «alcohol de madera», para convertirlo en im potable, idea apreciada por el científico, pero no por el bebedor.

Un pequeño mundo muy nervioso

Tanto en su estado original como en disolución o coloide, un líquido se caracteriza, lo mismo que los gases y los sólidos, por la naturaleza y el comportamiento de sus moléculas. Las moléculas de un gas, como hemos visto en el capítulo precedente, están relativamente separadas; son muy individualistas y la influencia de una sobre otra es casi despreciable. Un sólido, en cambio, es una sociedad muy estructurada y compacta, cuyas moléculas cooperan constantemente. Las moléculas de los líquidos, como las de los gases, se encuentran en movimiento incesante, pero al mismo tiempo están casi tan juntas como las moléculas de un sólido. Parecen bolas para rodamientos, infinitamente pequeñas, que ruedan y resbalan unas alrededor de otras, un mundo de desplazamientos y empujones, en continuo contacto, con objetivos independientes, pero dotado de una forzada cohesión.



TRES LAZOS QUE ATAN. Las singulares propiedades del líquido más común, el agua, tensión superficial, adherencia, punto de ebullición, dependen de un terceto de fuerzas, uno en el interior de la molécula y dos entre moléculas adyacentes. • Enlaces covalentes unen los átomos formando moléculas por medio de electrones compartidos. En el agua, las dos núcleos de hidrógeno (pequeños signos más) se mantienen a un ángulo de 105°, haciendo positivo un lado de la molécula y negativo el otro. • Los enlaces de hidrógeno son fuertes enlaces eléctricos entre las cargas positivas de los núcleos de hidrógeno y ciertos electrones negativos de los átomos cercanos. • Las fuerzas de Van der Waals son uniones eléctricas débiles entre un núcleo de oxígeno y electrones de un átomo de oxígeno cercano.

Entre las principales fuerzas que mantienen juntas las moléculas de un líquido se encuentra la variedad de Van der Waals que, según se observó en el capítulo 3, determina una atracción entre las moléculas de un gas; a decir verdad, son estas fuerzas las que determinan si una sustancia será un gas, un líquido o un sólido. El físico holandés Johannes Diderik Van der Waals emitió la hipótesis de su existencia en 1873 para explicar el comportamiento anormal de un gas, pero no explicó su causa, lo cual hizo otra generación de científicos.

Según explicaron, las fuerzas de atracción se originan como sigue: los electrones en órbita de núcleos atómicos a veces se agrupan hacia un lado, creando una preponderancia temporal de carga eléctrica negativa en aquel lado. Esta carga queda compensada por una carga positiva igual al otro lado, determinada por la ausencia de los citados electrones. El átomo en cuestión está pues «polarizado», es decir, tiene cargas positivas y negativas en extremos opuestos. Como las moléculas de los líquidos se encuentran en estrecho contacto unas con otras, la polaridad de una de ellas puede desplazar los electrones del lado cercano de sus vecinos polarizándolos también. Los lados de carga opuesta de partículas temporalmente polarizadas se atraen entre sí momentáneamente.

PODEROSAS PRESIONES QUE MOLDEAN LAS GOTAS DE AGUA



FUERZAS EQUILIBRADAS EN LA NIEBLA

La cohesión de las moléculas de agua superficiales de la gota de arriba crea una extensión (flechas de tres puntas) que presionan del exterior hacia el centro. La presión del aire también se ejerce desde el exterior (flechas negras). Presionando desde el interior está la presión hidrostática (flecha azul). La presión del aire y la tensión superficial igualan la fuerza disruptiva de la presión hidrostática; como todas las fuerzas presionan la superficie de la gota, ésta es esférica.

Pero las fuerzas de Van der Waals no son el todo en la cohesión de los líquidos. En el caso particular del agua, otra fuerza de cohesión más importante entra en juego, y determina la mayor parte de sus inesperadas propiedades. Una molécula de agua comprende un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno. Los dos átomos de hidrógeno, que sobresalen de la molécula como las orejas de un conejo, son unos cuerpos enormemente activos y cargados, que agarran y retienen los átomos de oxígeno de otras moléculas de agua. Esto ocasiona una ligazón entre las moléculas, más intensa que la atracción que representan las fuerzas de Van der Waals. Según se detallará más adelante, el «enlace de hidrógeno» es el principal responsable de los puntos de congelación y de ebullición del agua, inesperadamente elevados, así como de su cohesión poco corriente, y de la forma con que moja ciertas sustancias.

TENSIONES DESIGUALES EN LA LLUVIA

A diferencia de una gota de niebla, que es pequeña, ligera, y desciende lentamente hacia la tierra, una gota de agua (arriba), es mayor, más pesada, resulta más afectada por la fuerza de la gravedad y cae con rapidez. Al caer, se quebranta el equilibrio de tensión superficial, presión hidrostática y del aire que le da forma esférica. La fuerte presión del aire se ejerce directamente bajo la gota (flecha negra gruesa) y disminuye hacia la parte superior. Esta variación en la presión da a la gota forma de pera.

Si la temperatura de un líquido se eleva lo suficiente, no hay fuerza que evite que sus moléculas se separen violentamente; así se convierte en gas. Si la temperatura desciende, las moléculas se dispondrán en rígida alineación, de modo que no podrán resbalar unas sobre otras; así el líquido se convierte en sólido. Sólo un líquido no ha sido nunca solidificado a presión atmosférica normal: el helio líquido, que por debajo de cierta temperatura se convierte en un «superfluido» llamado helio II. Este notable líquido desafía la acción de la gravedad, asciende por los lados del envase, y sobrepasa los bordes; es también un extraordinario conductor del calor, 200 veces mejor que el cobre sólido. El comportamiento del helio II ha sorprendido e intrigado a los científicos, y la investigación de sus misterios continúa.

Pero se sabe que las propiedades de otros líquidos vienen determinadas por el comportamiento de sus moléculas. Así el grado de atracción entre capas de estas moléculas regula la característica más evidente de un líquido, su capacidad para huir. Cuanto más tienden a juntarse sus moléculas, tanto mayor es la fricción interna del líquido y se resiste a fluir. Esta viscosidad fue definida hace tres siglos por Isaac Newton en su Principia como «falta de lubricidad». Es aparente en las melazas (de ahí la expresión «más lento que melazas») y también en el aceite pesado; reconocemos esta propiedad cuando en verano usamos en nuestros autos un aceite más espeso, pues la viscosidad decrece al aumentar la temperatura.

Tendencia al nivel más bajo

Mientras el aceite pesado y las melazas se mueven lentamente, la gasolina fluye con facilidad. El agua, si bien tiene una resistencia mayor que la de la gasolina, responde lo suficiente al influjo de la gravedad terrestre para moverse «hacia abajo», a lo largo de miles de kilómetros de riachuelos y corrientes hasta formar un gran río, como el Mississippi. Es la tendencia del agua a buscar el nivel más bajo lo que crea tales vías de agua.



OPERACIÓN ETERIZADA. Este juguete oscilante funciona por evaporación de éter. El pájaro está formado por dos esferas conectadas por un tubo. En la esfera inferior se coloca éter líquido, que se evapora rápidamente a temperatura ambiente. Comienza a evaporarse creando una presión que le hace ascender por el tubo. El éter se acumula en la esfera superior, pero no se evapora porque se ha humedecido con agua fresca la cabeza. Cuando el éter de arriba llega a pesar más que el de abajo, el pájaro oscila hacia adelante, permitiendo que el éter vuelva al cuerpo. Con cada oscilación se humedece y refresca la cabeza del pájaro.

La atracción mutua de las moléculas determina otras características fundamentales de los líquidos. Una de ellas es que el volumen permanece el mismo, tanto si se vierte en un vaso pequeño como en un gran jarro (los gases, al contrario, se expansionan llenando el recipiente en cuestión). Y al estar muy juntas, las moléculas líquidas resisten con energía cualquier intento de reducir su volumen, incluso a presión. Antes que encogerse, lo que hace el líquido es transmitir la presión, sin ganar ni perder fuerza, a todas las partes de la vasija que lo contiene. La ciencia de la hidráulica (de los vocablos griegos «agua» y «tubería») se basa en este principio y en otro enunciado por el mago intelectual francés del siglo XVII,

Blaise Pascal: cualquier pequeño esfuerzo de presión desarrolla múltiplos de su propia fuerza.

En su *Tratado sobre Equilibrio de Líquidos*, Pascal trataba de una «nueva clase de máquina para multiplicar fuerzas», describiendo un experimento que realizara: «Si un recipiente lleno de agua, cerrado por todos lados, tiene dos aberturas, una cien veces mayor que la otra, con un pistón ajustado a cada una de ellas, un hombre que comprima el pistón pequeño igualará la fuerza de cien hombres que opriman el de la abertura cien veces mayor, y dominará a noventa y nueve».

Una central de fuerza en la punta de un dedo

Hoy en día vemos la aplicación de estos principios de hidráulica en la vida cotidiana cada vez que con el pie accionamos los frenos de un automóvil, y la punta de un dedo controla la dirección de un coche moderno. Gracias a un sistema adecuado de pistones y cilindros, los ingenieros proyectan «gatos» y elevadores para toda clase de objetos, grandes prensas para estampar metales, y mil otros mecanismos.

Si un líquido se niega a someterse a la presión, acepta, en cambio, amables indicaciones respecto a su forma. Como carece de forma propia, cuando se le vierte dentro de un recipiente, adopta inmediatamente la del fondo de éste, debido a que busca siempre el nivel más bajo. Existe una notable excepción a esta regla; si la cantidad de líquido es muy pequeña, entonces adopta una forma propia, la de gota, perfecto ejemplo en miniatura de la atracción que ejercen las moléculas del interior de un líquido sobre las exteriores. La forma resultante es casi esférica; la presión del aire y el influjo de la gravedad tienden a deformarla (a «gravedad cero», según han observado los astronautas, las gotas de agua adoptan la forma de perfectas esferas).

En la forma de la gotita influye también una característica única de los líquidos, llamada tensión superficial, la cual hace que un líquido se comporte como si estuviese cubierto por una membrana elástica invisible que quisiera contraerse sobre el líquido, reduciendo todo lo posible el área superficial. La resistencia de la superficie resulta aparente para quien haya dejado caer alguna vez una hoja de afeitar en un lavabo, y la haya visto flotar.

La tensión superficial de un líquido se debe a la atracción eléctrica mutua de las moléculas superficiales y a que las que se encuentran debajo de éstas tiran de ellas en dirección vertical. Si se tiene en cuenta el peso de las moléculas que intervienen, la tensión es a veces de intensidad asombrosa; el agua tiene casi la misma resistencia a la tracción que el acero para estructuras.

El fenómeno de la tensión superficial también interviene en la famosa propiedad del aceite de calmar las aguas turbulentas. Esta aptitud singular del aceite — observada ya en la época del romano Plinio, en el siglo I antes de Jesucristo — no ha sido todavía explicada por los científicos. Cuando se extiende sobre el agua una delgada capa de aceite, intervienen por lo menos dos mecanismos: la tensión superficial del agua tiende a atenuar el movimiento de las olas, o a evitar que se formen, y la adherente película de aceite actúa como una membrana que se opone al intento del agua en movimiento para estirla o contraerla. Ambos factores contribuyen a que el agua presente al viento una superficie lisa, evitando que las olas mayores aumenten de tamaño y se rompan en la cresta.

El principio de la película superficial protectora se ha aplicado también para retardar la evaporación del agua en las regiones áridas. En este caso la sustancia que se utiliza es un alcohol sólido, blanco y céreo-, el hexadecanol (llamado alcohol cetílico, que en un principio se obtenía de la ballena, y ahora se fabrica por síntesis). Cuando se le espolvorea sobre la superficie de un embalse, es fácilmente extendido por el viento y forma una película adherente de una molécula de espesor — de unas quince millonésimas de milímetro — lo cual permite el paso del oxígeno y otros gases esenciales para la vida acuática, pero proporciona al agua una superficie cristalina. La película es inofensiva para los seres humanos, los peces y las serpientes, y se vuelve a cerrar por sí misma cuando es rota por botes de remo, esquadores acuáticos, lluvia o granizo. Si bien en la práctica no se utiliza todavía en gran escala, se ha comprobado que el recubrimiento con hexadecanol disminuye hasta en un veinticinco por ciento la evaporación del agua.

Afición por los extraños

Con ser fuerte la atracción molecular que crea la tensión superficial en los líquidos, existe otra atracción aún más poderosa — en el caso del agua — hacia las moléculas

del exterior, como son las del sólido junto al cual se encuentra. Esta tendencia determina dos fenómenos líquidos de gran importancia: humectación y capilaridad. Si sobre un cristal se deja caer mercurio — cuyas moléculas están más unidas entre sí que las del agua — formará una gotita. En cambio, el agua se adhiere servilmente al cristal, enamorada de sus moléculas, cubriéndolo, mojándolo por completo; en realidad la «humectación» es esta facultad de adherirse. Es una de las características del agua que se explica por su enlace hidrogenado. Los núcleos de los átomos de hidrógeno del agua forman una fuerte unión con los átomos de oxígeno de la superficie de dióxido de silicio del cristal.

Para que el agua moje el cristal la superficie de éste tiene que estar limpia; si está manchada por pequeñas partículas de aceite o de grasa (generalmente presentes en el polvo que se ha depositado), prevalece la natural aversión del agua por aquellas sustancias. Pero en algún caso esa aversión puede superarse: disuelta con jabón, el agua puede «mojar» incluso la grasa. Se debe a la duplicidad de comportamiento de la molécula de jabón, uno de cuyos extremos es atraído por la molécula de agua y el otro por la de grasa; el jabón atrae luego la grasa al agua, permitiendo que aquélla pueda ser eliminada a voluntad. Gracias a esta sencilla estratagema consigue el hombre conservarse limpio.

La afinidad del agua por las moléculas extrañas puede verse en el fenómeno llamado capilaridad. Las moléculas del esmalte de una taza, por ejemplo, atraen de tal modo a las moléculas del agua que se vierte en ella, que el agua sube un poco por los lados. Un trozo de tubo de vidrio sumergido en la misma agua proporciona una superficie aún mayor para que las moléculas de agua puedan jugar. Intentarán izarse por el interior del tubo, como si estuvieran trepando. A medida que el agua va subiendo, la tensión superficial intenta aplanarla, lo cual a su vez permite que el agua de los lados del tubo suba aún a mayor altura. Estas actividades continúan hasta que el líquido alcanza una altura en la cual el peso de su columna equilibra la fuerza de dirección ascendente de las moléculas de cristal. Cuanto más pequeño es el diámetro interior del tubo tanto mayor es la capilaridad del agua; esa palabra se deriva del latín *capillus*, cabello, lo que hace resaltar la estrechez del canal por el que sube el agua. La capilaridad lleva a los líquidos a toda clase de pequeños espacios donde se adhieren, extienden y arrastran, como la tinta

por el papel secante. Ayuda a que las toallas sequen el cuerpo y hace que la cera fundida alimente la mecha de una vela. No hay en la naturaleza proceso más vital que el de la capilaridad: permite que el agua se mueva a través del suelo hacia las raíces de las plantas.

Fin de un aventurero

El mismo inquieto espíritu de aventura que hace que un líquido se eleve, arrastre, fluya y, en general, se mueva incesantemente, determina su destrucción: a ciertas temperaturas desaparece en forma de vapor o gas. El proceso de evaporación explica el hecho que haya tan pocos líquidos en la naturaleza. Ocurre de dos maneras: por evaporación, cuando parte del líquido superficial se convierte en gas, y por ebullición, cuando todas las partes del líquido se convierten en gas. La ebullición, producida a mayores temperaturas, es un caso extremo de evaporación.

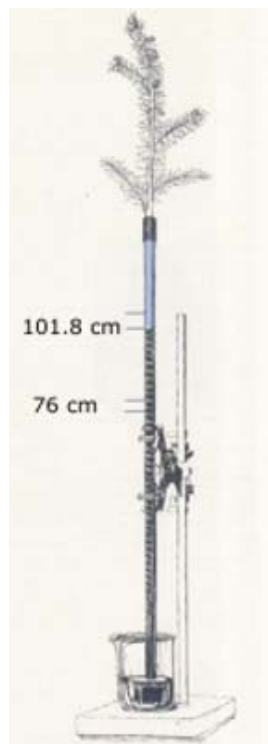
Los culpables del proceso de evaporación son, como en otros casos de raro comportamiento de los líquidos, las moléculas superficiales. Son muy veleidosas; como ya hemos dicho, pasan gran parte del tiempo tratando de volver al interior del líquido, a instancias de sus compañeras las moléculas del interior. Por otra parte, cuando adquieren mayor energía gracias a alguna fuente externa de calor, y cuando están orientadas hacia el exterior, se escapan de casa, saltan a la atmósfera, y se convierten en moléculas de vapor. A medida que aumenta el número de las que se marchan, la superficie del recipiente — tanto si es una jarra como la piel humana — va perdiendo su energía y disminuyendo de temperatura (esto explica por qué la evaporación tiene un efecto refrigerante). Al cabo de un tiempo, el vapor de encima, aburrido de estos artistas de la evasión, no acepta más; al llegar a este punto se dice que el aire está «saturado», y el vapor «en equilibrio» con el líquido. Las moléculas que continúan saliendo del líquido son compensadas por las moléculas que vuelven a él, es decir, que se condensan. De este modo la evaporación se compensa mediante la condensación.

La saturación del aire no es más que el coco del tiempo: la humedad. El aire caliente absorbe más agua vaporizada que el aire frío. En tiempo húmedo, cuando el aire caliente está casi saturado, el sudor deja de evaporarse, y nos sentimos

sofocados y oprimidos. En cambio, cuando la humedad es escasa, el calor intenso es tolerable, puesto que el sudor se evapora enfriando el cuerpo.

Ascenso y fin de una burbuja

El vapor que se forma sobre un líquido tiene su propia presión, elevada cuando la tensión superficial del líquido es baja (como ocurre con un fluido volátil, el amoníaco corriente) y baja cuando la tensión superficial es alta (como es el caso del agua y del ácido acético, ingrediente del vinagre).



CADENA MOLECULAR. La humedad sube a las copas de los árboles debido a una propiedad llamada cohesión, en virtud de la cual las moléculas se sujetan unos a otros como eslabones de una cadena. A medida que las moléculas de agua se evaporan por la hoja, otras son arrastradas hacia arriba desde las raíces. En este experimento una rama unida a una columna de agua y mercurio levanta el mercurio 101,8 cm.; la presión normal del aire la elevaría 76 cm

Cuando se eleva la temperatura de un líquido, su presión de vapor aumenta; cuando iguala la presión atmosférica existente, el líquido alcanza su punto de ebullición. La presión del vapor es capaz de superar la presión atmosférica; el líquido pierde la barrera de su tensión superficial, y en su interior se forman burbujas de vapor, que se hacen cada vez mayores y agitan violentamente el líquido, haciendo que éste vaya hirviendo hasta desaparecer.

Los líquidos hierven a temperaturas diferentes; en general su resistencia a hervir depende de lo que sus moléculas se estimen unas a otras. El éter hierve a 34,6°C;

el cloroformo a $61,3^{\circ}\text{C}$; el tetracloruro de carbono a $76,8^{\circ}\text{C}$, y el aguarrás a 160°C . El agua, de gran atracción molecular, hierve a 100°C , dilatándose más de 1.500 veces al transformarse en vapor de agua. Es esta sencilla, pero irresistible expansión la que impulsa una máquina de vapor.

Una de las mayores curiosidades referentes al agua se presenta en el punto culminante del proceso de calentamiento. Para elevar la temperatura de un gramo de agua 1°C , en cualquier punto hasta el de su ebullición, se requiere la misma cantidad de calor: una caloría por grado. Pero cuando dicha cantidad de agua alcanza su punto de ebullición a 100°C , se necesita un empujón de 540 calorías para convertirla en vapor, es decir, para que desaparezca hirviendo. La mayor parte de este calor se necesita para vencer las fuerzas de cohesión que unen a las moléculas de agua; es decir, los fuertes enlaces de hidrógeno luchan ferozmente antes de romperse. Es este hecho — que el agua necesite tanto calor para vaporizarse — lo que permite utilizarla en los sistemas de calefacción.

Problema de patatas crudas

Cuando se disminuye la presión de un líquido, su punto de ebullición disminuye y — como sabe cualquiera que haya tenido que entendérselas con unas patatas crudas en el aire enrarecido de una montaña — la comida tarda más en cocerse. Por otra parte, la disminución del punto de ebullición — con la correspondiente reducción de temperatura — tiene sus ventajas; ciertos elementos que resultarían perjudicados por elevadas temperaturas pierden alegremente su agua a bajas presiones; las técnicas de vacío que se utilizan en el tratamiento comercial del jugo de naranja, por ejemplo, eliminan la mayor parte del agua y permiten helar y envasar el jugo concentrado sin perjudicar para nada su contenido en vitaminas y su aroma.

Se obtienen beneficios parecidos cuando se aumenta la presión sobre un líquido y su punto de ebullición se eleva; el aumento de temperatura determina una cocción muy rápida, lo cual es el fundamento de la olla a presión, instrumento no tan reciente como generalmente se cree. La primera, llamada «marmita de Papin», fue inventada en Alemania hacia 1680 por un médico francés, filósofo natural y mecánico, Denis Papin, que huyó de su país por la persecución contra los protestantes que siguió a la revocación del Edicto de Nantes. Muy intrigado por el

comportamiento del agua a presión, Papin efectuó numerosos experimentos sobre vaporización. Inventó la válvula de seguridad y contribuyó al desarrollo de la máquina de vapor. Según se dice, una de esas máquinas fue montada sobre un barco de paletas; el agua elevada por la máquina caía sobre las ruedas y las hacía girar. Pero cuando Papin intentó probar su nave en un crucero por un río alemán, se convirtió en una de las primeras víctimas del odio del trabajador contra el automatismo; su nave fue destruida por los enfurecidos barqueros.



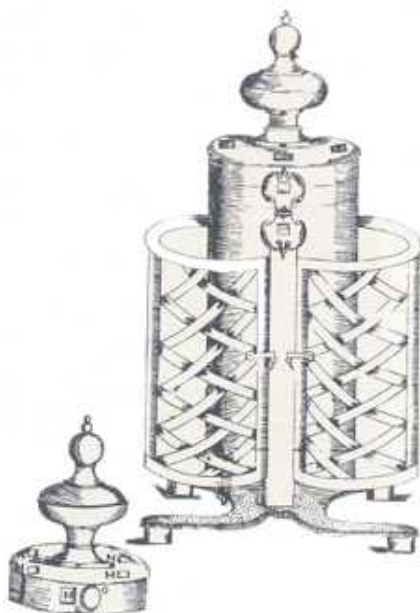
COMIENDO A PRESIÓN. El físico francés Denis Papin inventó la primera olla a presión en 1681, aplicando el principio que el punto de ebullición aumenta al aumentar la presión del aire. El agua a presión hierve a más de 100°C y cuece más rápidamente la comida. Cuando visitó Inglaterra, Papin preparó en su olla una comida para la Royal Society. La describió John Evelyn en su diario, preparado, carne y pescado, en los Digestores de Monsieur Papin, gracias a los cuales los duros huesos de buey y de carnero se volvieron blandos como el queso».

En los siglos que siguieron a Papin, el agua no ha perdido nada de su fascinación para los científicos. Incolora, inodora e insípida, y aceptada en la vida cotidiana, sigue siendo, para los hombres que han reflexionado sobre sus propiedades, el líquido más notable, a pesar del inescrutable helio II. Muchos tratados se han dedicado a una u otra de sus singulares características.

El agua es la única sustancia que existe, corriente y simultáneamente, en los tres estados, sólido, líquido y gaseoso. Sobre un río cubierto de hielo — agua en forma

sólida — se eleva el vapor de agua en su forma gaseosa; bajo la superficie del río el agua escurre en forma de líquido.

El espacio entre los puntos de congelación y de ebullición del agua (0 a 100°C) es la gama de temperaturas más importante del planeta. Al definir los límites entre los cuales el agua está en su estado líquido, se definen también los límites entre los cuales nuestros cuerpos pueden funcionar. Pues el agua es el constituyente esencial de todos los seres vivos. El cuerpo humano es un saco ambulante de fluidos. El agua es la principal sustancia de la célula viviente, la cual ha llegado a su estado actual partiendo de agua de mar enriquecida, y desde que abandonó su primitivo hogar ha tenido que llevar consigo su propia agua de mar en forma de sangre. El agua forma también un líquido como clara de huevo, llamado «fluido sinovial», que lubrica las articulaciones y que hace posible que nos movamos (sin él no podríamos ni siquiera cruzar andando una habitación). La facultad del agua de disolver sólidos y gases, y de mantener coloides en suspensión, la capacita para transportar alimentos y oxígeno.



A GUSTO DE UN REY. El rey Carlos II de Inglaterra diletante científico, encargó a Papin un Digestor, que era el nombre de la primera olla a presión. Pensando quizá en la seguridad real, Papin fabricó el sólido bote de arriba. La tapa mostrada, que aparece sola a la izquierda, se sujetaba sólidamente a la olla. Una pantalla metálica rodeaba la cámara de cocción, por si estallase. El vapor circula por el interior de un cilindro central y alrededor de un bote interior, donde se coloca la comida.

De hecho, juzgamos la posibilidad de una vida en otros planetas, en términos de si sus temperaturas permitirían o no al agua ser líquida, y de si hay o no agua. En nuestro sistema solar, esto elimina a Mercurio, cuyas temperaturas son tan altas

que el plomo se fundiría en su lado más próximo al sol. Elimina a Venus, que se achicharra en un calor seco hostil a la vida. Marte se asemeja más a la Tierra, y parece que en él se encuentran vestigios de agua en los casquetes polares, pero posiblemente no haya nada en forma líquida; a pesar de ello, la situación en Marte permite quizá alguna forma sencilla de vida. Los demás planetas parecen estar en tal estado de congelación que la presencia de agua parece extremadamente improbable.

La gratitud de un planeta

En nuestro hermoso planeta verde azulado, podemos dar gracias al agua por lo relativamente templado del ambiente. En general, la Tierra disfruta de un clima moderado debido a las corrientes oceánicas que transportan calor, y a las corrientes de aire que transportan agua, las cuales están siempre en acción sobre la superficie del globo, reduciendo las temperaturas elevadas y elevando las bajas. Este mecanismo de transporte de calor sería menos eficaz, de no ser por la más curiosa de las propiedades del agua, excepcional incluso en el excepcional mundo de los líquidos.

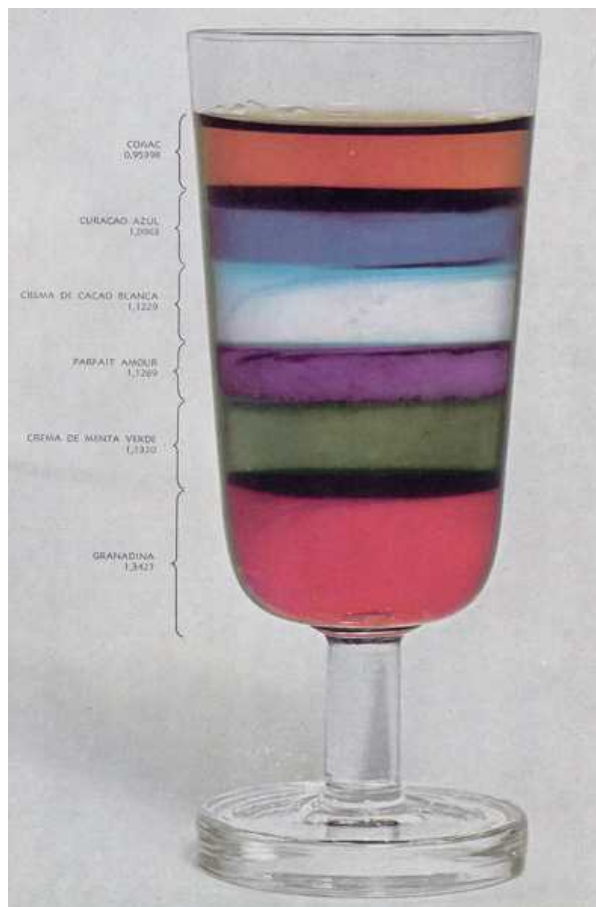
Al enfriarse, la mayor parte de los líquidos se encogen; tienen su máxima densidad en su punto de congelación, y pesan demasiado para flotar. El agua sigue la regla general hasta llegar a cuatro grados por encima de su punto de congelación. Entonces vuelve sobre sus pasos; en vez de continuar encogiéndose, comienza a dilatarse y continúa dilatándose hasta llegar al cero. (En dicho punto experimenta otra brusca expansión, que hace reventar las tuberías.) La explicación de este singular comportamiento se encuentra en la actividad de sus moléculas a la temperatura crítica de 4°C. En lugar de juntarse entre sí a medida que el frío reduce sus movimientos, se alinean en la dirección de sus enlaces de hidrógeno. Al llegar a cero dichas moléculas han formado ya una estructura cristalina, pero de tipo abierto y que resulta más ligera que el agua. Resumiendo; el agua en estado sólido — el hielo — flota sobre el agua en estado líquido.

Este fenómeno explica el hecho que las aguas de la Tierra permanezcan fluidas durante el invierno, aun cuando su superficie, esté cubierta de hielo. Al llegar la primavera, le resulta fácil al sol calentar la superficie y fundir el hielo. Sin esta

característica especial del agua, los extremos norte y sur del globo se congelarían por completo, bloqueando para siempre las corrientes oceánicas y dejando muchas partes de la Tierra en extremos intolerables de frío y de calor. Así, pues, la vida en conjunto depende del accidental comportamiento de un líquido.

Sobre la superficie, más de lo que salta a la vista

Para los no iniciados, la «superficie» de un objeto es su exterior, su parte superior, o su cara. Pero para el científico que investiga la materia, las superficies poseen propiedades especiales. Las llama, con más propiedad, «interfases», pues es virtualmente imposible que una superficie no esté en contacto con otra superficie. Semejante a un pastel líquido a capas, el coloreado combinado de enfrente, llamado «pousse-café» presenta abundantes interfases (12 en total), donde cada uno de los licores toca otros licores (o al vidrio), salvo la capa superior, donde la superficie está en contacto con el aire.



GRAVEDAD DE UNA BEBIDA. Las seis capas de licores de un «pousse-café», preparado vertiendo sucesivamente licores cada vez más ligeros, se mantienen separadas por diferencias en su gravedad específica, o peso en relación al agua (a la izquierda de la bebida). Pero las superficies de esta pesadilla de barman son muy tenues. Una sacudido los mezclaría formando una mezcla pardusca.

La importancia de las superficies proviene principalmente que muchas sustancias presentan en las mismas características que difieren notablemente de las que tienen en otras partes. Doquier se encuentran fenómenos de superficies: colorean de azul el cielo, contribuyen a la rigidez de las crinolinas, y determinan que el aceite sea resbaladizo.

Fenómenos de las mezclas culinarias familiares

Cada vez que un ama de casa prepara una de las mezclas que aquí mostramos se encuentra con fenómenos de superficie. Pues la facultad que tienen los ingredientes de quedarse mezclados depende de las propiedades de sus superficies.

Cuanto más pequeño es un objeto, más superficie tiene en relación a su peso. Un ratón tiene 5 cm² de piel por cada 10 gramos de peso; un elefante, 1 cm² por 100 gramos. Llega un momento en que la superficie de un sólido adquiere preponderancia sobre su volumen y se convierte en factor determinante de su comportamiento.



DISOLUCIÓN AZUCARADA. Cuando se añaden terrones de azúcar a una taza de té, se obtiene una disolución verdadera, una mezcla de azúcar y de agua indivisible por medios mecánicos. Para que los componentes de la mezcla puedan ser separados, uno de ellos debe sufrir una transformación física, que en este caso se consigue hirviendo para convertir el agua en vapor.

Por ejemplo, una naranja se hunde en el agua. Incluso las partículas más gruesas del jugo de naranja se sedimentan. Pero si se fragmentase suficientemente la naranja, las partículas se sostendrían por el movimiento de las moléculas de agua, como en un juego de voleibol.



SUSPENSIÓN PULPOSA. Aunque muchos de los que desayunan no se enteran, el jugo de naranja que toman por la mañana es una suspensión, pedazos de naranjo que danzan en agua. Algunas partículas se han sedimentado. Como los fragmentos son relativamente grandes, responden a la atracción de la gravedad más que a la presión molecular de flotación.

Las partículas que son lo suficientemente pequeñas tienen tanta extensión superficial expuesta, en relación con su peso, que en ellas influye más el movimiento molecular que la gravedad.



UN COLOIDE BIEN UNIDO. La mayonesa que vemos arriba sobre lo ensalada de tomate, es un coloide llamado emulsión, mezcla de líquidos no miscibles. Tal hazaña es posible con los ingredientes, aceite y vinagre, de la mayonesa, gracias a la acción de un producto aglutinante, la yema de huevo, que mantiene multitud de glóbulos microscópicos de aceite en estado coloidal.

Tal estado se llama coloidal, representado por la mayonesa, la gelatina y el almidón. Cuando las partículas sólidas son demasiado grandes para que las moléculas líquidas las mantengan, el resultado es una “suspensión” (como el jugo de naranja). En el tercer estado, “disolución”, las moléculas líquidas y sólidas se mezclan como el azúcar disuelto en té.



MEZCLA DESHECHA. Los pacanas de aquí, cuando están incrustadas en la masa húmeda, o en las pastas terminadas, se encuentran en estado de suspensión. Pero mientras forman parte de los ingredientes en seco, presentan la característica primaria de una verdadera mezcla, la facultad de poder separarse mecánicamente. En una mezcla no hay reacción químico.



SABROSA GELATINA. Cuando se mezcla gelatina en polvo con agua caliente, se convierte en un coloide que, al enfriarse, forma lo que se llama un gel, un sólido compuesto por partículas microscópicas de gelatina unidos por una red de fibras. En la gelatina de arriba, el calor y aroma de fresas, junto con el azúcar, forman una disolución. Las cápsulas para medicinas son también geles.

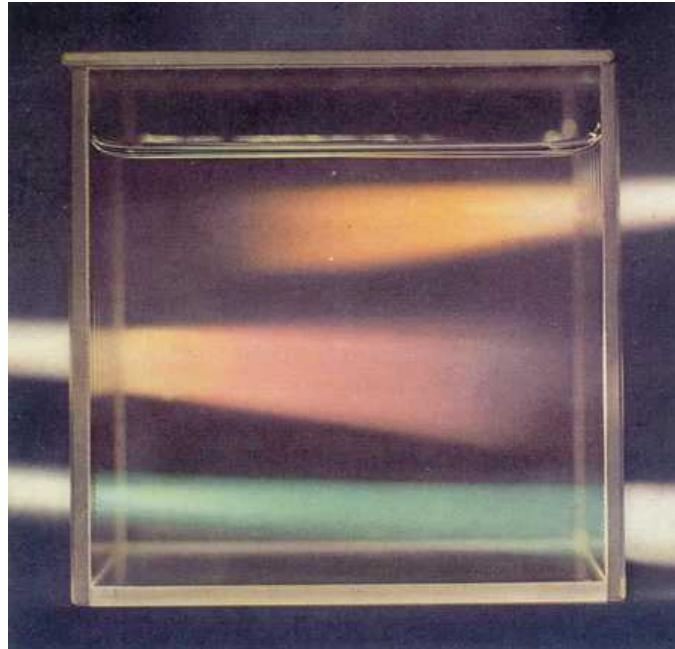


POLÍMERO FECULENTO. Todas las amas de casa saben que si se mezcla agua y almidón de planchar, después de una breve cocción se obtiene un líquido pegajoso que una vez seco endurece los cuellos de camisa. El nombre que los químicos dan a esa cola es el de coloide «alto polímero» (de muchas partes). La razón de su estado coloidal es el gran tamaño de la molécula de almidón.

La naturaleza sabe mucho de mezclas

El hombre puede hacer coloides y suspensiones, pero éstos también se presentan con gran frecuencia en la naturaleza. Una evidencia de coloides y suspensiones naturales puede hallarse en la neblina fumosa, y en el arco iris. En el caso de la neblina, una capa de humo a poca altura forma un coloide que se sostiene por las moléculas de aire. En el caso del arco iris, las gotitas de agua que deja en el aire un chubasco pasajero forman una suspensión que refleja el espectro completo de la luz solar.

El experimento de la figura muestra la reacción de la luz ante tales fenómenos naturales. Una luz blanca al penetrar en un tanque que contiene un coloide de azufre, encuentra las pequeñas partículas del coloide y se dispersa en los colores del espectro. El mismo fenómeno explica el oro de la puesta de sol y el azul del cielo; estos efectos se consiguen por dispersión de las partes amarilla o azul del espectro cuando chocan con partículas de diverso tamaño de aire y polvo, en el ámbito de la atmósfera de la tierra.



DISPERSIÓN DE LA LUZ. Tres haces de luz blanco al pasar por un coloide de partículas de azufre en un líquido, se convierten en anaranjados, rosados y azul verdosos. Este fenómeno es el efecto de Tyndall, descubierto en 1869 por John Tyndall, físico británico. Tyndall demostró que los rayos de luz son dispersados formando diferentes colores, por pequeñas partículas de tamaño uniforme. Los colores dependen del tamaño de las partículas. Cuanto más pequeños son los contenidos en el coloide, más cortas (y azules) serán las longitudes de onda del espectro.



AEROSOL NEBULOSO. Una combinación de niebla y humo sobre la ciudad de Santa Bárbara, California, ilustra dos mezclas comunes en la naturaleza. La niebla es una suspensión de gotitas de agua que se separan del aire por su propio peso. El humo es un coloide aéreo, que los científicos llaman aerosol. El color blancuzco producido por su combinación es otro ejemplo del fenómeno de Tyndall (arriba). Como las partículas de humo y neblina son de diverso tamaño, la luz del sol, al chocar con ellos, se dispersa, produciendo los colores del espectro.



SUSPENSIÓN ESPECTRAL. El arco iris de arriba fue producido por la acción de la luz solar sobre gotitas de agua en suspensión en el aire. Al entrar la luz solar en cada una de las gotitas, los diversos colores de su espectro son refractados a diferentes ángulos. Esta luz refractada se refleja en el dorso de cada uno de las gotitas, y llega, o través del aire, al ojo del observador. Cuanto mayores son las gotas, tanto más brillante es el arco iris. Este campesino español, no lejos de Madrid, está a «final» del arco iris, donde la fábula sitúa una olla de monedas de oro.

Paseo por el agua de la mano de las moléculas

El paseo en busca de comida del insecto de la figura, un tejedor muy ampliado, ilustra el fenómeno de la tensión superficial. Esta tensión recubre la superficie de los líquidos con una membrana elástica invisible, pero verdadera, formada por las moléculas del líquido, que permite a algunos insectos atravesar la superficie con la confianza de un patinador sobre una gruesa capa de hielo. Este fenómeno se debe a que cada una de las moléculas del interior de muchos líquidos, y especialmente del agua, son como pequeñísimos imanes, que irradian fuerzas de atracción en todas direcciones. Se atraen entre sí constantemente, de modo que la molécula más satisfecha es la que está completamente rodeada por sus compañeras. Pero

forzosamente algunas de las moléculas tienen que estar alguna vez de servicio en la superficie del líquido.

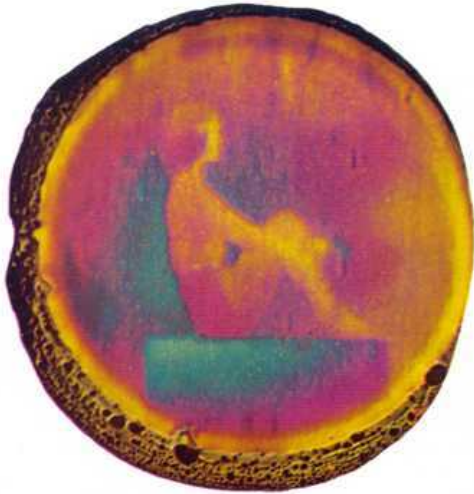


DE PUNTILLAS SOBRE LA TENSIÓN. A semejanza de otros insectos, este tejedor está dotado para utilizar la tensión superficial, gracias a la amplia distribución de su peso y a sus velludos pies, que funcionan como esquíes acuáticos. No obstante, si en algún momento se alzase sobre uno de sus pies, el peso le haría penetrar a través de la membrana que le sostiene y se daría un remojón.

En el caso del agua que mostramos aquí, las moléculas superficiales están algo expuestas al aire, por lo cual su atracción molecular es poca. Así, pues, la atracción que sobre ellas se ejerce es hacia abajo (en dirección hacia las otras moléculas) y hacia los lados (hacia sus compañeras de superficie). La atracción mutua que se establece entre las moléculas superficiales es lo suficientemente fuerte para que establezcan una unión, como si se juntasen por los brazos. Esto explica la estructura membranosa de la tensión superficial.

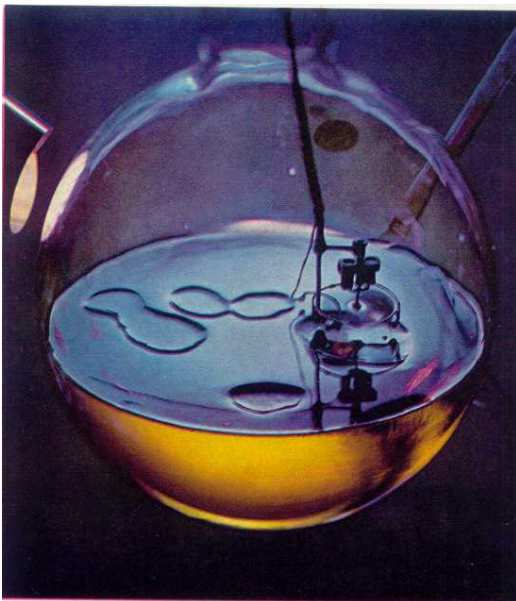
Películas monomoleculares: la materia en capas delgadas

Lo que hace posible el paseo acuático del insecto de la página anterior es una película monomolecular.



UNA SUPERFICIE SENSIBLE La imagen rojo-anaranjada de la muchacha sobre el trozo de hielo azul verdoso de arriba ha quedado registrada en la membrana plástica recubierta de aceite de un Evaporógrafo. Este aparato mide el calor de los objetos por su efecto en las radiaciones infrarrojas sobre la capa de aceite. La diferencia de color se debe al grueso variable de la película de aceite.

Esta expresión puede aplicarse a cualquier superficie. Pero los científicos la utilizan para describir la película ultra diáfana que una sustancia forma sobre otra sustancia. La capa de aceite de la figura no entra en esta definición; en comparación es gruesa como la piel de un elefante.



UNA IMPUREZA ENIGMÁTICA. El aceite que hierve al vacío (izquierda), es una curiosidad superficial que se supone debida a una película monomolecular. En teoría toda la superficie debería estar perforada con agujeros a modo de cráteres. Se cree que las impurezas que salen hirviendo del aceite vuelven a caer sobre su superficie formando una película, lo cual impide que el líquido se evapore.

Una película monomolecular verdadera es la que se ve enfrente, en el aroma graso de las rosas extendido sobre la superficie del mercurio. La existencia de una película en el aceite hirviendo no se ha comprobado.

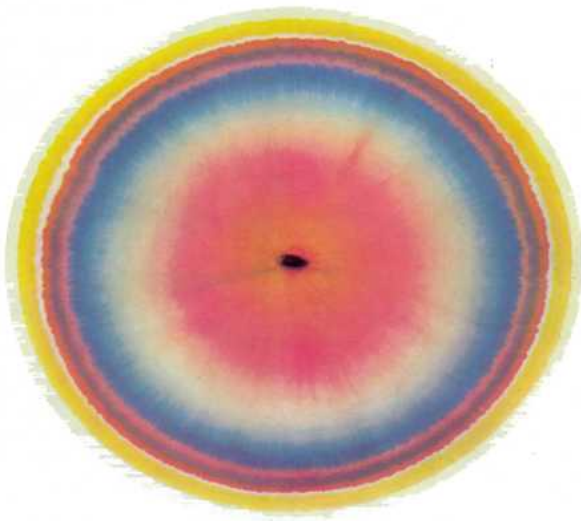
Tales películas son demasiado delgadas para ser vistas, excepto con un microscopio electrónico. Esto y su difícil captación intrigan a los experimentadores.



UN PERFUME EN ACCIÓN. El perfume graso de las dos rosas forma los remolinos cuya estructura, que cubre una superficie de mercurio con una película monomolecular de aceite, se forma cuando el aceite aparta una capa de polvo. El mercurio proporciona el fondo superliso para el experimento puesto que tiene la mayor tensión superficial entre todos los líquidos.

Ensayo del contenido, por medio de papel

Un instrumento ingenioso para uso del químico que tiene que investigar los constituyentes de disoluciones químicas, es el proceso que se muestra en estas páginas. Llamada cromatografía en papel, aprovecha dos fenómenos superficiales. El primero es la adsorción, la atracción entre moléculas superficiales de líquidos y sólidos. El segundo es la facilidad con que un producto se disuelve en un líquido, por ejemplo, lo aficionada que es la sal al agua, mientras que le gusta poco el alcohol. En uno de los métodos de cromatografía en papel, se deja caer la disolución que se analiza en el centro de un papel de filtro redondo, humedecido con otro líquido. Los ingredientes de la disolución que se ensaya se despliegan según (1) el grado de entusiasmo con que quieran adsorber al papel y (2) su capacidad para entrar en, y salir de, disolución en el disolvente original y en el líquido del papel. El resultado es una separación en forma de diana.



COLORES CONCÉNTRICOS Los anillos coloreados concéntricos de este cromatograma, consisten en una disposición de las sustancias componentes contenidas en un colorante para piel, los cuales se han ido separando durante su complicado paso a través de un pedazo de papel de filtro especial.



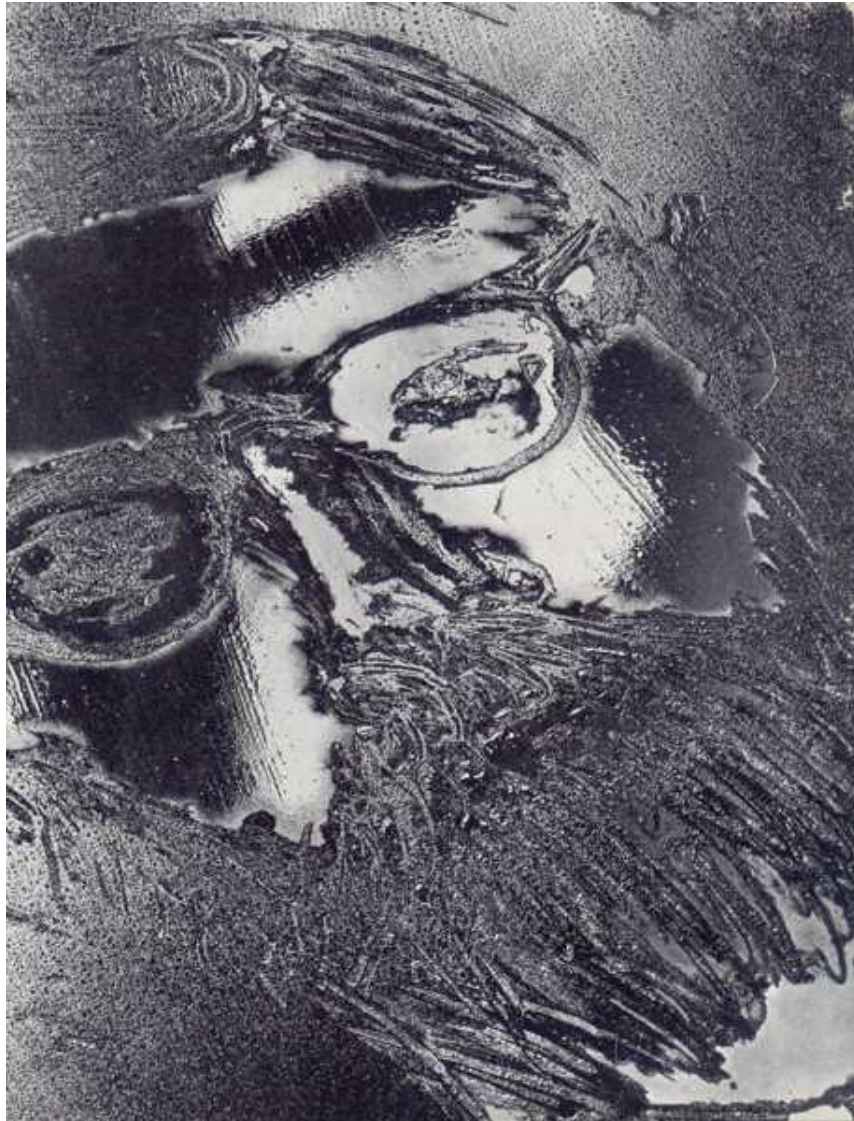
ALGUNOS DISCOS INDISCRETOS. Un técnico de los laboratorios Du Pont comprueba la fuerza de un colorante sintético junto a una poyata adornada con cromatogramas. Las franjas coloreadas de cada cromatograma son los matices característicos de cada uno de los compuestos de la disolución que se analiza. En definitiva, el color permite al cromatógrafo distinguir los componentes de una disolución. Los colorantes se prestan particularmente a la cromatografía, pero esta técnica puede también utilizarse con disoluciones incoloras (página siguiente). El proceso empezó en 1903, cuando un botánico ruso, M. S. Tswett, lo utilizó para estudiar pigmentos vegetales



ESCRUTINIO DE UNA DISOLUCIÓN. Un analista comprueba los resultados de un ensayo cromatográfico bajo el resplandor espectral de una lámpara ultravioleta. Esta técnica es esencial para el análisis de disoluciones incoloras o la luz ordinaria. En tales casos se utiliza luz ultravioleta, puesto que muchas sustancias adquieren un matiz característico bajo sus rayos. Muchos ensayos de cromatografía en papel se efectúan aplicando la disolución al centro del papel, desde donde los componentes se separan formando un diseño como de diana de tiro al blanco (lámina anterior). Pero en este caso la disolución se aplicó en cuatro puntos de una hoja de papel de filtro.

Beneficios de un antiguo caso de incompatibilidad

Las palabras “aceite y agua” inmediatamente evocan una imagen de incompatibilidad: pocas sustancias son más difíciles de mezclar.



RECEPCIÓN EN PIEDRA CALIZA. Una razón de que se utilice piedra caliza en litografía es porque proporciona una superficie que el agua humedece con facilidad, atracción que puede verse en la foto. Sobre la superficie grasa el agua forma gotas y una película brillante en las superficies desnudas. Al aplicar la tinta a la placa, se adhiere a la grasa, para reproducir la imagen.

Si bien se acostumbra a echar la culpa al aceite, la culpable suele ser el agua, la cual, debido a la intensa atracción entre sus moléculas, es casi narcisista con su amor por sí misma. Una aplicación práctica de este fenómeno — y prueba real de

que la enemistad entre el agua y el aceite puede dar sus frutos — se ve en el proceso litográfico que mostramos. Una imagen grasa dibujada sobre piedra se moja con agua, la cual se aparta de la grasa yendo a la piedra desnuda. Si se aplica una tinta grasa a la superficie humedecida, la tinta es repelida por el agua. La tinta se adhiere tan sólo a la imagen grasa, permitiendo entonces transferirla a un papel, para obtener una reproducción.



COMIENZO DE UN RETRATO. El artista Robert Parker, de Cormel, Nueva York, dibujó un retrato sobre piedra caliza, utilizando para ello un lápiz litográfico graso.



EL TRABAJO DE UN LITÓGRAFO. Terminado el dibujo, el litógrafo Arnold Singer aplica una disolución de goma arábica y ácido nítrico que aumenta la atracción por el agua.



UNA IMAGEN INVISIBLE. Se limpia la superficie con aguarrás para eliminar el exceso de grasa. Ahora la imagen está impregnado en lo superficie de lo piedra.



UNA APLICACIÓN DE AGUA. Singer humedece la superficie de la piedra caliza, con agua, la cual se retira de la imagen grasa pero sigue aferrada al resto de la piedra.



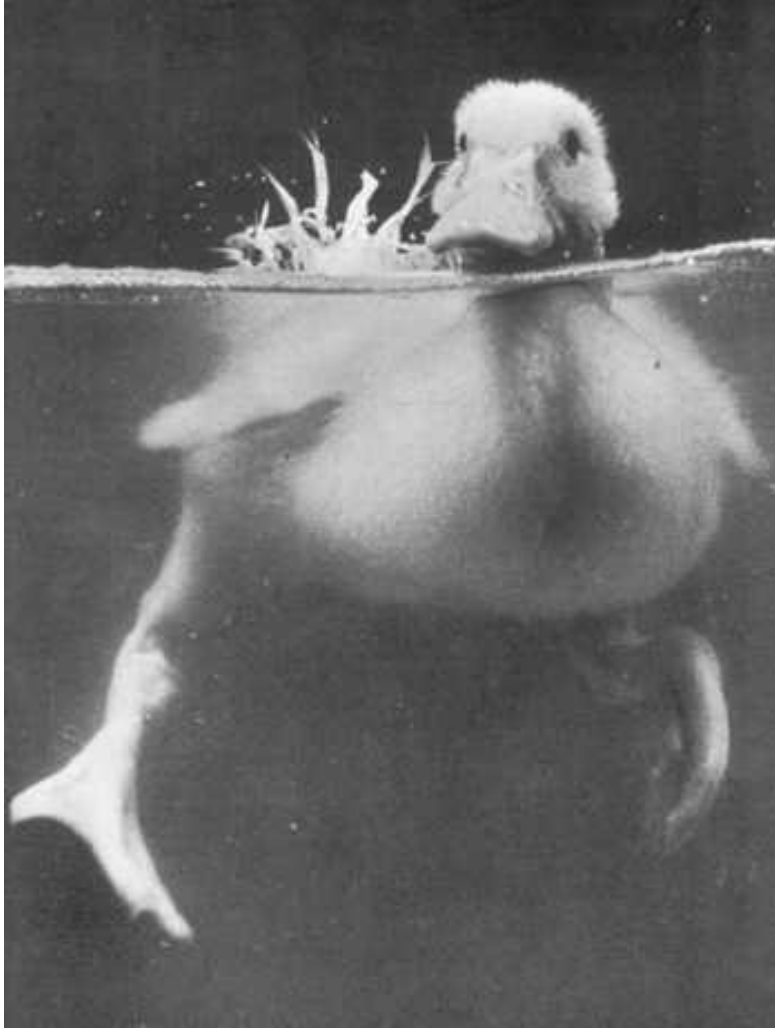
TINTA RECHAZADA. Se aplica tinta litográfica grasa sobre toda la piedra, pero la superficie húmeda rechaza la tinta, que solamente se adhiere al dibujo graso.



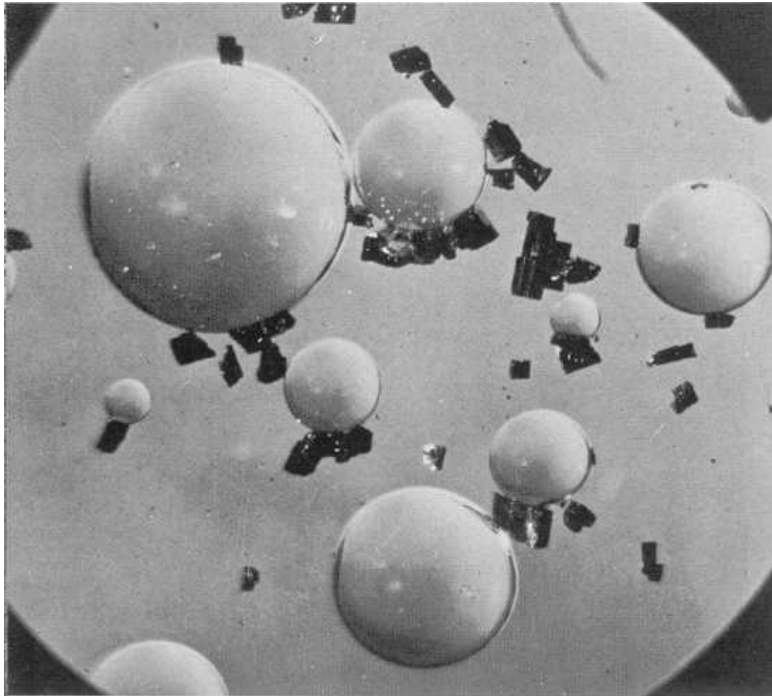
EL PRODUCTO TERMINADO. Singer despega el impreso terminado, un autorretrato del artista Parker. De la misma plancha pueden sacarse miles de copias. El papel que se utiliza está ligeramente humedecido, pero pronto se seca. Comercialmente se utilizan planchas metálicas, pero una técnica parecida.

Volubles y fluctuantes costumbres del agua

El agua posee una doble personalidad: tiene una inclinación innata para atraer ciertas sustancias y repeler otras. Es posible utilizar medios químicos para inducir a una sustancia para que invierta su reacción normal frente al agua. Las plumas grasas del pato de enfrente normalmente repelen al agua, y éste es el secreto que permite al pato mantenerse erguido. Pero la aplicación de un detergente permite que las plumas se “mojen”, y el pato se hunde. Los minerales metálicos generalmente aprecian al agua, pero este sentimiento varía cuando se mezcla un producto especial. Si se inyecta aire, el mineral sube rápidamente con las burbujas de aire hacia la superficie.



DILEMA DE PLUMAS. Este pato que rema furiosamente está aprendiendo lo que se siente al no poderse mantener a flote. El pato, que normalmente flota debido a que el aceite de sus plumas repele el agua, ha perdido esta protección gracias a un vulgar detergente.



SALVACIÓN EN BALSA. En esta fotomicrografía, que muestra el mecanismo del proceso de flotación de minerales, las partículas oscuras de galena, mineral del cual se extrae el plomo, están unidos a burbujas de aire. La galena normalmente se mojaría con el agua, pero si se añade xantato, una sal química, la galena pierde su tolerancia por el agua. Si entonces se introduce aire por el fondo del tanque de flotación, las partículas de galeno con el xantato suben a la superficie.



ESPUMA Y FLOTACIÓN. Un tren cargado de mineral de cobre (izquierda) sale de una mina dirigiéndose a la refinadora. Uno de los primeros tratamientos, después de haber molido el mineral, consiste en separarlo de las demás sustancias por medio de una célula de flotación (derecha). Aquí se separan de la superficie las burbujas espumosas, cubiertas de mineral. Para recuperar todo el cobre se necesitan de dos a más flotaciones.

Capítulo 5

Una apariencia engañosa de solidez

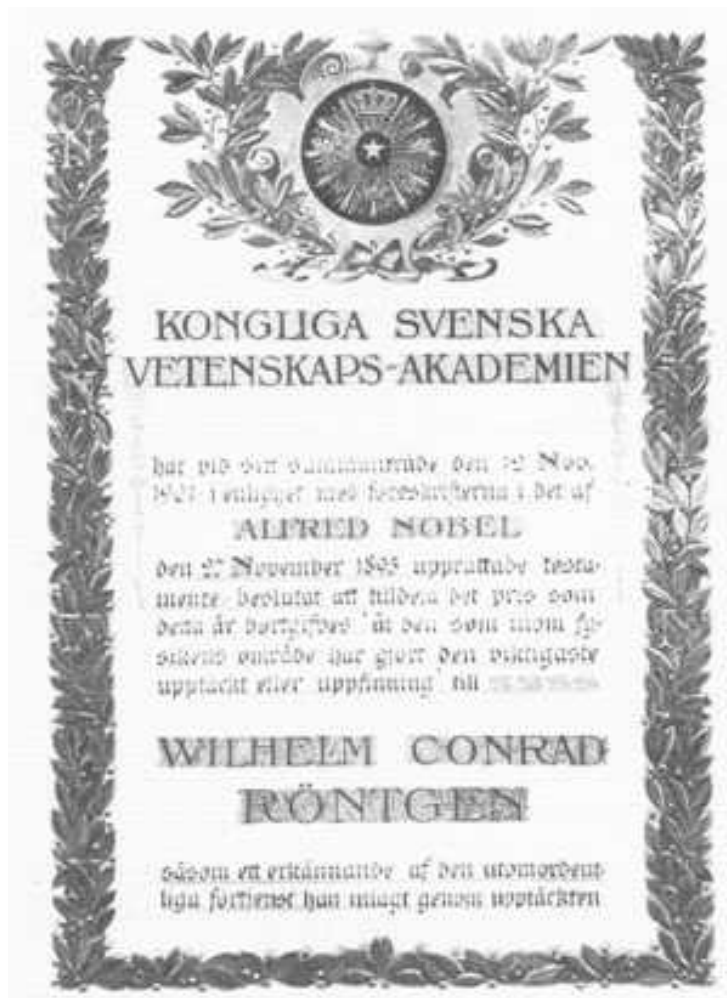


PAUTA PARA LA BELLEZA. El tallista de diamantes tiene que ser un experto en estructura cristalina, característica de la mayor parte de los sólidos. Las marcas en negro sobre el diamante Vargas de 726 quilates indican al tallista el grano de la gema, las líneas naturales de exfoliación, por donde debe ser cortado. Todos los diamantes tienen irregularidades que harían que se rompiese en manos inexpertas. El tallado de gemas es un trabajo muy científico.

Parece que la forma sólida de la materia debería haber sido para el hombre la más fácil de estudiar. A diferencia del gas, su presencia es obvia; a diferencia de los

líquidos, se la puede retener con facilidad. Estable, compacta, coherente, es con mucho la más satisfactoria para tratar. El inventario de los sólidos comenzó con la primera roca del primer hombre de las cavernas, y a través de los años la lista ha crecido sin cesar. Es, pues, sorprendente, que hasta hace 50 años no se confirmase la estructura real de los sólidos.

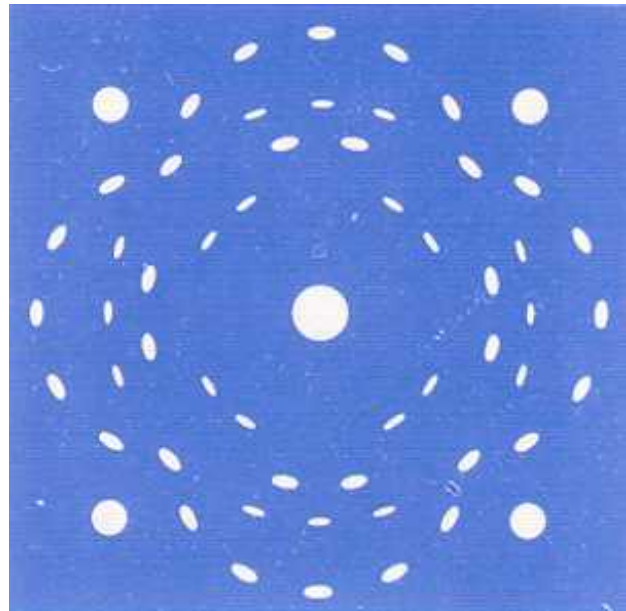
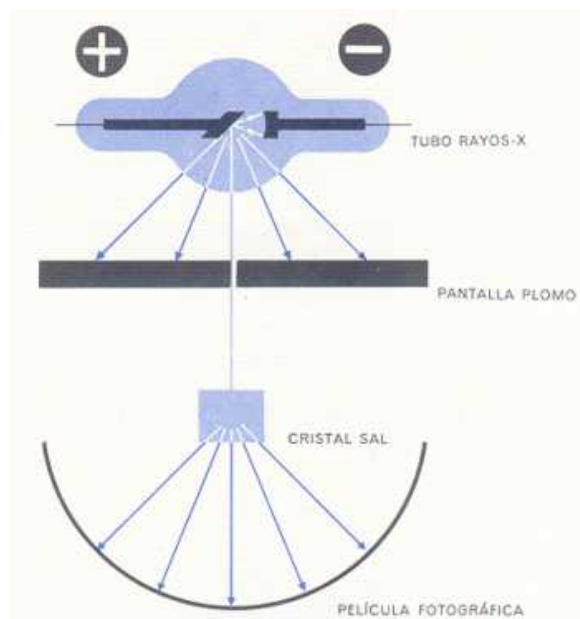
Hasta tal descubrimiento se creía que el contenido de un sólido era lo que determinaba sus características: lo que hacía duro al diamante, resistente a la piel, magnético al hierro y conductor al cobre. Variando el contenido se podía variar la sustancia, decían los químicos clásicos: añádase tal o cual cosa que corresponda, y se obtendrá una nueva sustancia diferente de la primitiva.



*RECOMPENSA POR UN
DESCUBRIMIENTO. Este
certificado de Premio Nobel,
junto con una medalla y 13.400
dólares, fueron concedidos al
científico alemán Wilhelm Conrad
Roentgen en Estocolmo, Suecia,
el 12 de noviembre de 1901, el
primer Premio Nobel de Física.
Se le otorgó por su
descubrimiento de los rayos-X
en 1895; los hospitales de Viena
comenzaron a utilizar la nueva
radiación para el examen
preoperatorio pocas semanas
después del sensacional
descubrimiento de Roentgen.*

Hoy sabemos que muchas de las propiedades de un sólido están determinadas por su estructura: por la forma en que los bloques estructurales básicos del material, los átomos, están ordenados, y por la manera de estar unidos. Sabemos también que lo que distingue un sólido de un líquido y de un gas, lo que hace que parezca rígido, es la disposición y la relativa proximidad de las agrupaciones de átomos: las moléculas.

Este desplazamiento del interés del contenido a la forma de un sólido, ha determinado un avance espectacular en la progresiva conquista humana del mundo físico. De ser alguien que solamente encontraba y juntaba materiales, se ha convertido en verdadero arquitecto de la materia.



LAS MANCHAS DEL ESQUELETO DE LA SAL. La fotografía moteada de la sal (abajo), es un resultado del proceso de difracción de rayos-X esquematizado (izquierda), que es el instrumento clásico del físico para el estudio de cristales. Los rayos del tubo de rayos-X son interceptados por la pantalla de plomo salvo donde un pequeño agujero permite que un haz de rayos caiga sobre el cristal de cloruro de sodio (sal común).

La radiación que penetra por el cristal y llega a la película fotográfica produce la imagen de la derecha. La gran mancha blanca central es el haz principal de rayos-X no dispersados. El tamaño y la disposición de las otras manchas es el resultado de los rebotes de los rayos en el enrejado de átomos de cloro y sodio. Cada sustancia ofrece una sola imagen de difracción. El cloruro de sodio produce siempre el mismo diseño.

Se ha metido en el laboratorio y ha fabricado diamantes con manteca de cacahuete, seda con carbón; ha llegado incluso a fabricar una bolsa de seda con las orejas de una cerda. Muchos de los laboratorios han adquirido un aspecto diferente, alejado de la idea del profano, que los imagina llenos de tubos de ensayo y de retortas. Para complementar la preocupación presente del científico con la estructura tridimensional de las cosas, sus talleres están llenos de modelos tridimensionales de alambre, madera y plástico, largos y retorcidos cilindros, hemisferios, artefactos de esquinas con protuberancias conectadas con varillas, muy semejantes a los juguetes de un niño. Estudiando esas formas, ideando modificaciones en ellas, los investigadores buscan una mejor comprensión intuitiva de cómo las propiedades de un material dependen de su estructura.

En el largo camino hacia la comprensión del sólido, hay ciertos hechos notables. El primero de ellos fue el darse cuenta, a fines del siglo XIX, que muchos sólidos, y no sólo los de la variedad traslúcida, están compuestos por cristales (excepciones: el alquitrán vegetal, el vidrio volcánico y el ópalo). El segundo fue la aparición, a fines de siglo, de la teoría atómica moderna, que demostró que el mismo cristal consistía en una disposición especial de los átomos. El tercero fue el tardío descubrimiento, en 1912, de que se podía escudriñar el interior de un sólido por medio de los rayos X, descubiertos 17 años antes. Los rayos X confirmaron la imagen del sólido como ordenado mosaico de pequeños cristales.

Los pioneros de la cristalografía se adelantaron al siglo XIX; muchas de sus más agudas observaciones que el contenido era la clave de las propiedades de los sólidos fueron hechas al mismo tiempo que las de los químicos de los siglos XVII y XVIII. Los primeros investigadores comenzaron con cristales que aun siguen evocando dicho nombre: las variedades transparentes, simétricas, que se ven en la sal de roca, los copos de nieve, los diamantes, el cuarzo y otros minerales.

Hacia 1660, Erasmo Bartholin, miembro de una notable familia de eruditos daneses, versado en matemáticas, física y medicina, recibió de Islandia unas muestras de cristales de calcita, mineral llamado hoy carbonato cálcico, y entonces espato de Islandia. Grandes cristales transparentes de minerales son bastante raros en la naturaleza, y el descubrimiento de la calcita despertó atención desusada. Al estudiar los cristales, Bartholin observó un «maravilloso y extraordinario fenómeno»: la

calcita tenía la propiedad de la doble refracción, es decir, los objetos observados a su través aparecían dobles, mientras que si se hubiesen mirado a través de otros cuerpos transparentes hubiesen aparecido como una sola imagen refractada. En 1699 otro danés, Nicolaus Steno, expuso lo que ahora se llama «primera ley de la cristalografía». Steno, que era médico, profesor de anatomía y clérigo (llegó a ser obispo luterano), al estudiar diferentes cristales de cuarzo descubrió que todos tenían ángulos idénticos entre sus caras correspondientes; se encontró luego que esta similitud existía también entre otros cristales.

Fragmentos de una rotura con suerte

René Just Haüy, profesor de humanidades en la Universidad de París, fue quien hizo la más brillante deducción intuitiva sobre la verdadera naturaleza de los cristales. Un accidente afortunado le abrió el camino: mientras examinaba unos cristales de calcita de la colección de un amigo, en 1781, se le cayó uno de los mayores. No solamente se rompió sino que lo hizo según planos distintos y rectos, despertando con ello enorme interés en Haüy.

Si bien los cortadores de gemas hacía tiempo que conocían este fenómeno de exfoliación, Haüy se puso a pensar activamente. Los «planos preferentes de exfoliación», según los cuales se partió el cristal, le condujeron a suponer que la forma externa regular de los cristales reflejaba cierta clase de regularidad interna, la cual se debería a cierta regularidad de disposición de los bloques constituyentes. En aquel tiempo la existencia de tales bloques, o átomos, era objeto de gran controversia. No obstante, Haüy dedujo que un cristal estaba formado por la agrupación de cierto tipo de bloques constituyentes, en capas paralelas. De ahí dedujo que los ángulos del cristal estarían determinados por las relaciones en números enteros según las cuales los bloques constituyentes indivisibles estaban dispuestos a lo largo de los distintos lados del cristal. Sobre esta base enunció la «ley de la racionalidad».

Con esta indicación prometedora de que en el interior de los sólidos existía cierta misteriosa arquitectura, la cristalografía se inició durante la primera parte del siglo XIX. Utilizando el análisis de los planos de exfoliación y microscopios, los investigadores llegaron paulatinamente a la sorprendente conclusión que, con

ciertas excepciones, la mayor parte de los sólidos son cristales. Dedujeron también que en todos los materiales sólidos de la naturaleza, existen sólo siete grupos principales de cristales, que se clasifican según sus simetrías geométricas:

	Grupo	Ejemplos
1	Cúbico	Diamante, alumbre, oro, hierro, plomo, cobre, plata
2	Tetragonal	Estaño, circonio, rutilo, scheelita
3	Rómbico	Topacio, azufre, yodo, nitrato de plata
4	Monoclínico	Bórax, azúcar de caña, yeso
5	Triclínico	Sulfato de cobre, ácido bórico
6	Trigonal	Arsénico, cuarzo, hielo, grafito
7	Hexagonal	Magnesio, cinc, berilio, cadmio, calcio

Dentro de estos siete «sistemas» principales hay 32 subcategorías determinadas por el número de maneras en que los agrupamientos simétricos de grupos de átomos pueden presentarse.

Los conocimientos acumulados por los primeros cristalógrafos se basaban en un razonamiento, a partir de apariencias externas, sobre cómo era en realidad el interior de los sólidos. Su trabajo podía haber quedado en poco más que conjetura, de no haber sido por una técnica que permite al hombre ver en el interior de los materiales sólidos y contemplar la ingeniosa disposición que presentan los átomos; esta técnica nació gracias a uno de los más importantes accidentes ocurridos en la historia de la ciencia.

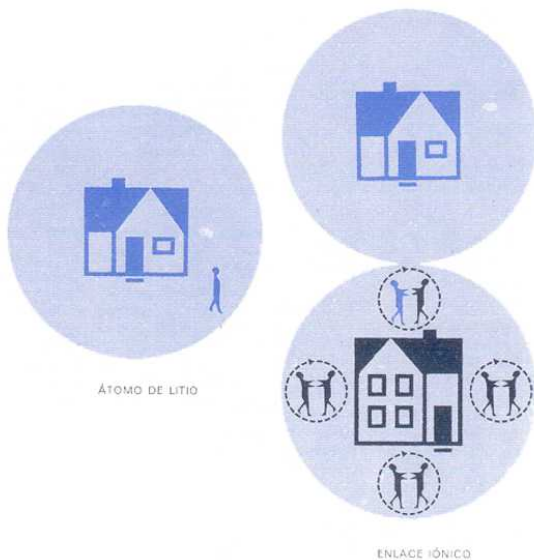
A fines de 1895, en su laboratorio de la Universidad de Würzburg, un físico alemán, alto y taciturno, llamado Wilhelm Conrad Roentgen, estudiaba el comportamiento de una curiosidad eléctrica contemporánea llamada «tubo de Crookes». En el curso de un experimento, cubrió el tubo con una envoltura de papel negro, resguardándolo de la luz, cerró luego la persiana de la ventana, y se aseguró que no salía luz ninguna del tubo. De repente, vio de reojo un resplandor verdoso procedente de una de las mesas de trabajo cercanas. Cuando apagó el tubo, el resplandor desapareció. Encendió una cerilla y miró hacia la mesa; había un trozo cuadrado de

cartón que Roentgen, en relación con un experimento completamente diferente, había cubierto con cristales de platinocianuro de bario, sustancia fluorescente.



AL COMPARTIR. Un átomo de carbono se une a otro átomo de carbono por medio de un enlace covalente, según se indica en los dibujos; la casa representa la parte interior del átomo, y los niños son los electrones externos. Un átomo de carbono tiene cuatro niños-electrones que juegan en diferentes esquinas de su patio (primer dibujo). El segundo dibujo muestra que uno ha encontrado un compañero en otro átomo de carbono. Ambos hogares están unidos por lo que se llama un enlace covalente.

Roentgen llegó a la conclusión que del tubo de Crookes salía algún rayo que pasaba a través de la envoltura de papel negro y llegaba hasta la mesa, haciendo fluorescer los cristales. Volvió a encender el tubo, tomó un libro, y lo interpuso entre el tubo y el cartón, y observó que los cristales continuaban resplandeciendo.

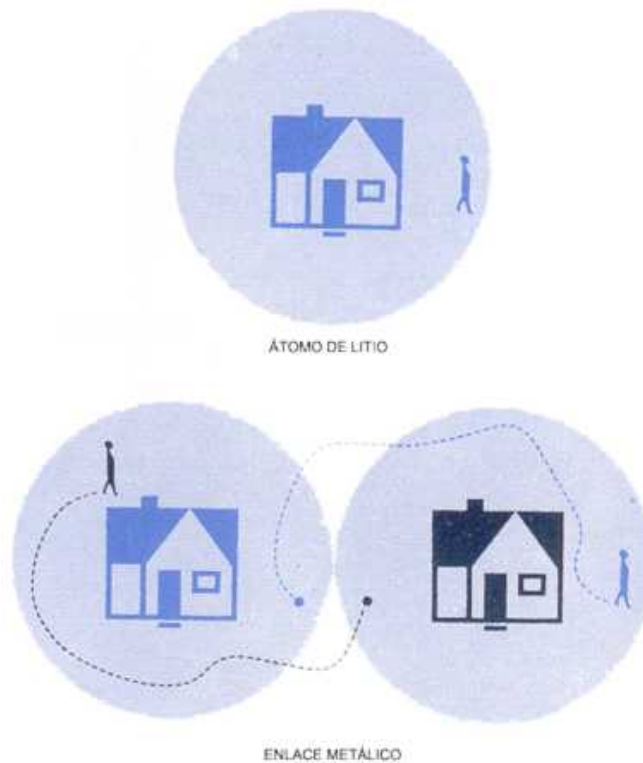


FUERZA AL CEDER. Un átomo de litio se une a un átomo de flúor por medio de un «enlace iónico», como muestran los dibujos. El átomo de litio cede su único, movedizo y nervioso electrón al hogar del flúor, activamente rapaz, que tiene tres pares de electrones más uno solitario que necesita un compañero de juegos. El niño del litio deja su átomo y pierde su identidad. Pero el átomo de litio, celoso de su perdido electrón, permanece cerca creando lo que en el lenguaje químico se llamo un enlace iónico.

Sin poder apenas contener su emoción, Roentgen se encerró en el laboratorio. Durante los siguientes días continuó ensayando otras sustancias en lugar del libro. Fuese lo que fuese lo que interponía entre el tubo y el cartón, madera, vidrio, ébano, goma dura, fluorita, los misteriosos rayos seguían pasando a su través. Lo mismo sucedía con la mayor parte de los metales; solamente el plomo y el platino obstruían el paso. Encontró también que la película fotográfica se impresionaba al situarla entre el tubo y el cartón.

Calmante para una esposa encolerizada

Al ir pasando el tiempo, la señora Roentgen exigió a su esposo una explicación de sus ausencias del hogar, y su reacción iba a tener repercusiones mayores de lo corriente. Roentgen llevó a su mujer al laboratorio, puso bajo su mano una película fotográfica envuelta en papel, la expuso al tubo, y creó una de las imágenes más famosas de la historia. Al ser revelada, mostró la estructura ósea de la mano de la señora Roentgen y la silueta de su alianza de oro. Incapaz de identificar los rayos que salían de su tubo, Roentgen los llamó rayos X.

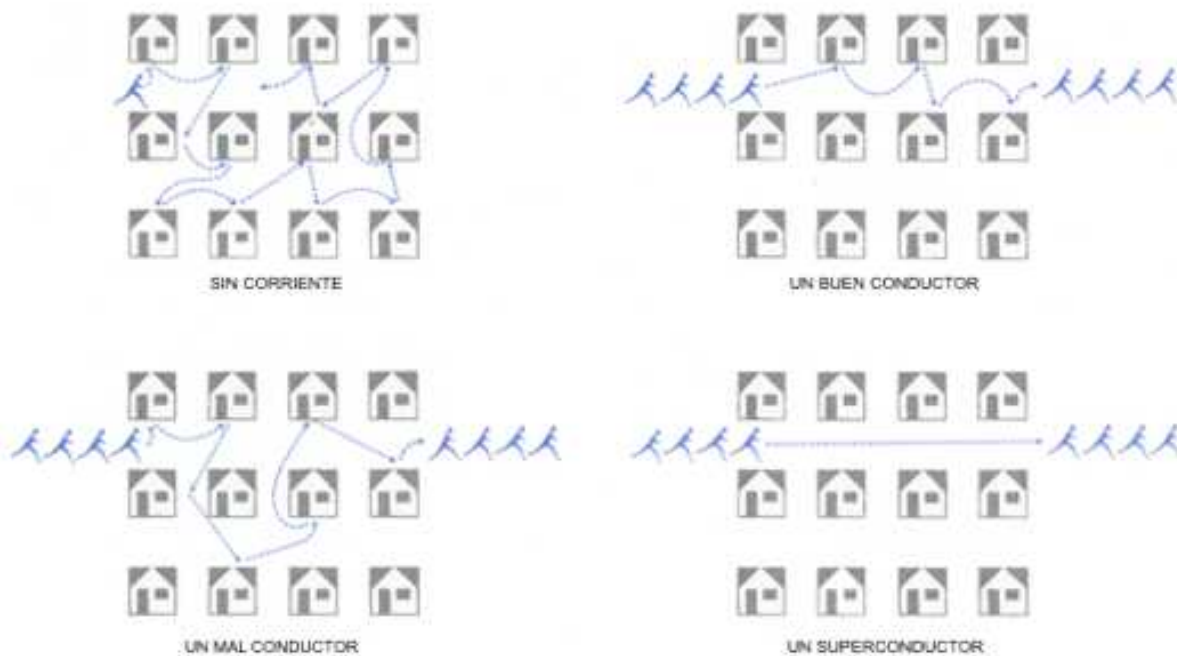


FUERZA AL VAGAR. Un átomo de litio se une a otro átomo de litio por medio de un «enlace metálico», según indican los dibujos. Un átomo de litio tiene un electrón muy libre e inquieto, tan inquieto que va de vecino en vecino, sin quedarse nunca en su propio patio. Los chicos de sus vecinos son también vagabundos. Todos estos niños errantes, igualmente compartidos por todos los hogares de la vecindad, son una fuente de fuerza física, pues crean un enlace metálico.

En un mundo de costumbres victorianas, sus imágenes de huesos humanos escandalizaron; se temía que se empleasen los rayos Roentgen para mirar a través de las ropas de la gente (los legisladores del Estado de Nueva Jersey intentaron resolver la situación al proponer una prohibición del uso de rayos X en los gemelos de teatro). Pero en el mundo de la ciencia, el anuncio del descubrimiento de Roentgen ocasionó una reacción diferente. Pronto empezaron a brillar tubos de Crookes en todos los laboratorios de Europa, y algunos de los más ilustres físicos del mundo intentaron explicar el extraño fenómeno de los rayos X. Al cabo de pocas semanas estos rayos se utilizaban para su noble función de investigar los huesos rotos en cuerpos humanos.

Pasaron 17 años antes que un joven profesor de Munich, Max von Laue, tuviese la idea de que los rayos X podrían tener otro uso de capital importancia: el examen de

la disposición de los átomos en el interior de un sólido. Von Laue pensaba que los rayos podrían difractarse por los cristales del interior de los sólidos, determinando un efecto semejante al que produce un prisma de cristal en un rayo de luz. Al encontrarse los rayos X con una estructura regular de átomos en un cristal, sería posible que las difracciones resultantes formasen imágenes con un sentido.



CARGA DE UNA BRIGADA DE ELECTRONES. Los cuatro diagramas indican cómo conducen los metales las corrientes eléctricas. Cuando no hay corriente, los electrones saltan al azar de átomo o átomo, sin dejar nunca la vecindad, como representa el niño que salta de casa en casa. Una corriente que se aplica a un mal conductor, como la espiral de un tostador, es como una banda de niños revoltosos alborotando varias casas antes de salir por el otro lado. En un buen conductor, tal como el alambre de cobre, pasan corriendo, y se detienen en pocas casas. Y en algunas sustancias, cuando la temperatura está cerca del cero absoluto (-273°C), los electrones dejan de hacer visitas: el metal se ha convertido en un superconductor.

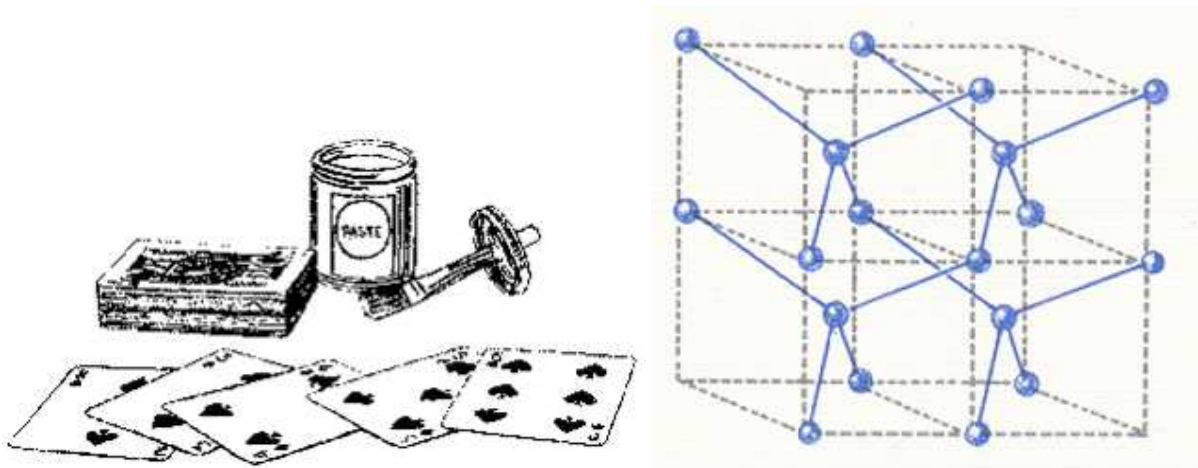
Bajo la dirección de von Laue, dos ayudantes apuntaron un fino haz de rayos X a un cristal de sulfato de cobre. Se dispuso una placa fotográfica a cierta distancia detrás del cristal, y se dejó actuar al haz de rayos X durante unas horas. Al revelar la placa se encontró una imagen simétrica de motas negras, cada una de las cuales

correspondía a una posición del interior del cristal, desde donde eran refractados los rayos X.

Este experimento representaba un gran avance. En primer lugar, mostraba que los rayos X eran como luz, pero de longitud de onda mucho más corta (algunos científicos habían pensado que podían ser pequeñas partículas); en segundo lugar, demostraba que la regularidad de las formas cristalinas se debía a una disposición armónica de sus unidades atómicas básicas.

LA DOBLE VIDA DEL CARBÓN

Los dibujos explican por qué el carbono en una de sus formas es un lubricante graso blando, llamado grafito, y en otra es la sustancia más dura del mundo, el diamante.



UNA BARAJA DE DIAMANTES: Una baraja son 52 planos resbaladizos que se separan con un dedo, esparciendo las cartas por toda la mesa. Pero si cada carta está encolada a la superior y a la inferior, la baraja es resistente a la presión. Como se explica a la derecha, el diamante se comporta como la baraja encolada, y el grafito, en cambio, como las cartas sin encolar. DUREZA EN ZIG-ZAG: La estructura del diamante puede verse en los cuatro cubos vacíos de la derecha. En el centro de cada uno de ellos hay un átomo de carbono unido por enlaces covalentes a otros cuatro átomos de carbono en diferentes esquinas del cubo. El resultado es una complicada estructura tridimensional en zig-zag, igualmente duro en todas direcciones.

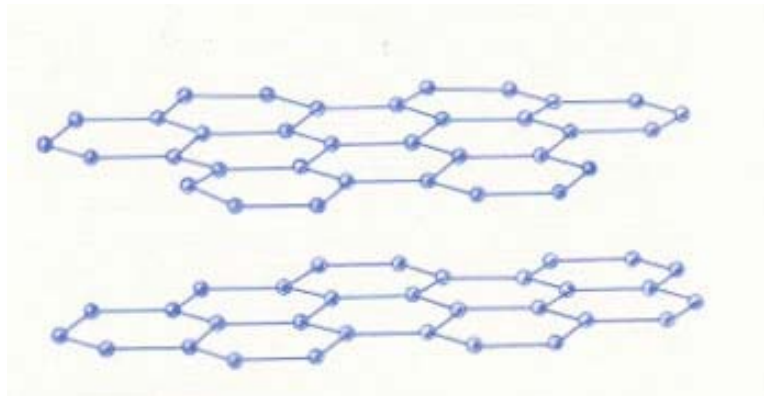
La técnica de difracción de rayos X ha demostrado ser el instrumento más valioso de que dispone el hombre para investigar estructuras, ya sea la estructura de cristales, o de las moléculas genéticas de su propio cuerpo. Ha arrancado a los sólidos secretos de los que emanaban deducciones aún solamente vislumbradas, pero

que ya han servido para que el hombre construyese aleaciones muchas veces más tenaces y más resistentes al calor que las anteriormente conocidas; le ha permitido crear un repertorio de productos sintéticos, cada uno con propiedades hechas a medida para su función; incluso ha hecho posible penetrar en uno de los secretos de la vida, la estructura de la molécula que controla la herencia de la humanidad.

Las fotografías de von Laue de 1912 sugieren claramente que los cristales están formados por planos, o capas, de átomos. En el interior del cristal éstos forman enrejados, como pequeñas estructuras de acero para rascacielos. Este hallazgo sedujo a un equipo de científicos ingleses padre e hijo, William Henry Bragg y su hijo de 22 años, William Lawrence. Los Bragg idearon una fórmula matemática para calcular cómo deberían reflejar los rayos X las estructuras cristalinas espaciadas con regularidad, es decir, cómo se pueden mezclar entre sí las diferentes ondas de rayos X, al salir de las diversas capas de átomos. Por medio de mediciones adecuadas de los puntos de luz y de oscuridad de las imágenes de difracción, resultaba posible determinar el espesor de cada una de las capas del interior del cristal y las distancias entre los átomos.

Inquilinos de unos enrejados

De la obra de los Bragg surgió un nuevo adelanto en la ciencia de la cristalografía y una nueva clase de especialistas que aumentó rápidamente, los físicos del estado sólido, así llamados porque se ocupaban con preferencia del comportamiento de la materia en su estado sólido. Estos hombres formaron progresivamente una imagen del sólido, representándolo como un conjunto de enrejados cristalinos de átomos, con cada átomo en su propio nicho rígido en el cual no podía moverse, salvo para vibrar un poco. Lo que une un átomo a otro es una fuerza de atracción eléctrica entre la carga positiva total de un átomo y los electrones de carga negativa del otro. En conjunto existen cuatro variedades de tal unión, y son las diferencias entre ellas lo que determina las propiedades particulares de las sustancias sólidas, su solubilidad, su conductibilidad, la facilidad 'con que se funden o hielan, etcétera.



BLANDURA GRASIENTA. Se puede imaginar la estructura del grafito como una serie de planos, en los cuales los átomos de carbono (puntos) están unidos formando un conjunto hexagonal bidimensional. Pero los planos horizontales, como las cartas de una baraja, están débilmente unidos, la cual hace que el grafito se pueda dividir en delgadas escamas y sea un buen lubricante.

En la unión «iónica», como la que existe en los cristales de la sal común, un átomo de sodio cede uno de sus electrones a un átomo de cloro, creando partículas cargadas, iones, que se atraen entre sí con tal fuerza, que la unión obtenida resulta extremadamente tenaz; por ejemplo, se necesitan elevadísimas temperaturas para fundir cristales de sal de mesa.

La vida privada de un diamante

En la unión «covalente», un átomo comparte uno o más electrones con otro átomo, unión que determina una gran dureza. Tanto el diamante como el grafito, dos formas de carbono puro químicamente idénticas, pero físicamente diferentes, son ejemplos de uniones covalentes. Mientras que el diamante es la sustancia más dura conocida, el grafito es lo bastante «blando» para ser usado como lubricante. No obstante, en ciertas direcciones, la unión entre los átomos de grafito es en realidad más fuerte que la unión entre los del diamante, porque en cada una de las capas del cristal de grafito los átomos se encuentran más próximos. Al mismo tiempo, las capas de un cristal de grafito se encuentran a tan gran distancia entre sí, que solamente existe una unión muy débil entre los átomos de diferentes capas. Esto permite que las capas resbalen libremente una sobre otra, y explica las propiedades lubricantes del grafito.

Los metales tienen un tipo especial de unión, «unión metálica», que determina su conductividad del calor y de la electricidad. En un cristal de metal los átomos se encuentran muy juntos y las fuerzas que los unen son muy semejantes a las fuerzas de unión covalentes, excepto que unos átomos determinados no comparten electrones determinados; los electrones existen en forma de una especie de nube errante, libre para moverse y engancharse entre dos átomos cualesquiera del enrejado. Esta nube es la que interviene en la corriente eléctrica y que se desplaza a través del cristal cuando se aplica un campo eléctrico. La misma nube conduce también calor. Al aplicar calor en un punto, los electrones libres adquieren velocidad en todas direcciones y, al chocar con otras partículas del cristal, comunican el calor a todo el material.

El cuarto tipo de unión en cristales sólidos lo proporcionan las fuerzas de Van der Waals que, como se dijo en el capítulo 4, mantienen juntas las moléculas de los líquidos. Estas fuerzas que unen moléculas más que átomos, son relativamente débiles. De vez en cuando algunas de las moléculas se separan de sus vecinas y saltan al espacio. Esto explica, por ejemplo, por qué el yodo se sublima con facilidad, es decir, se convierte directamente del estado sólido al gaseoso, sin pasar por el líquido.

En un mismo cristal pueden darse distintos enlaces. Además, si bien cada uno de los átomos ocupa una posición fija dentro del enrejado, no están absolutamente inmóviles; sus uniones son elásticas, y cada uno de los átomos vibra u oscila alrededor de su sitio en el armazón. Al elevarse la temperatura aumenta el movimiento, forzando las uniones hasta el punto de ruptura; el cristal entonces se funde y el sólido se convierte en líquido.

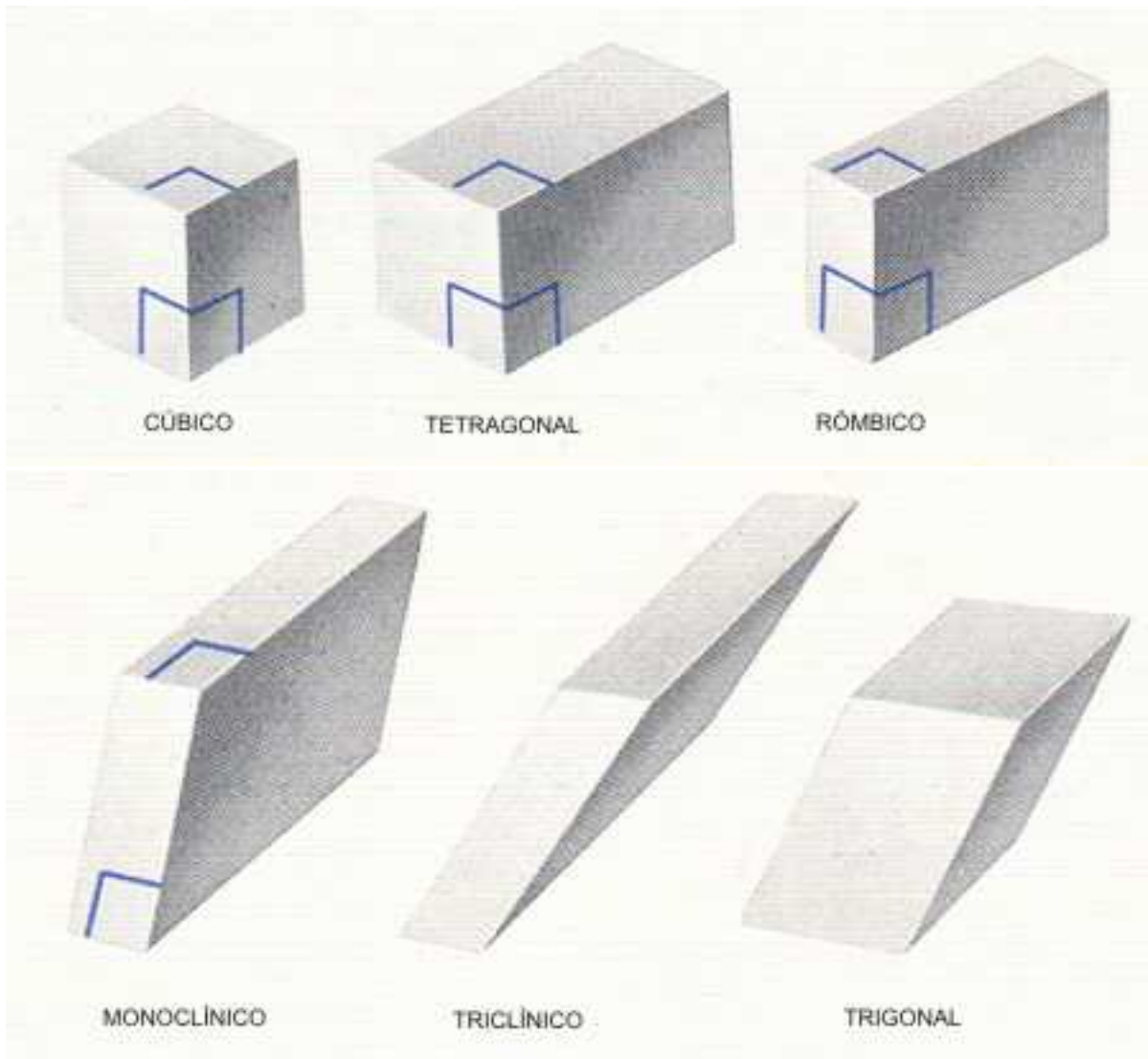
Incluso la estructura cristalina puede ser obligada a modificarse por medio de presión, hecho que ha dado origen a una industria. El primero que percibió este hecho fue un escocés, J. B. Hannay, quien en 1880 anunció que había conseguido tal transformación calentando y fundiendo parafina, aceite de huesos y litio metálico a presión extraordinariamente elevada y en tubos sellados. Actualmente el Museo Británico exhibe algunos pequeños diamantes de buena calidad regalados por él. Los científicos ponen en duda la afirmación de Hannay, porque no han conseguido repetir su experimento. Pero en 1955 un equipo de cinco hombres, en el Laboratorio

de la General Electric en Schenectady, Nueva York, sometieron grafito a una presión de entre 54.000 y 120.000 kilos por centímetro cuadrado, y a una temperatura de entre 1.200 y 2.400°C, añadieron un metal fundido como catalizador (materia que inicia una reacción química pero no participa en ella) y transformaron el grafito en pequeños diamantes. Estos diamantes de factura humana no tienen tamaño para joyas, pero se fabrican como fuente de diamantes industriales, indispensables para ciertas operaciones de corte, molienda y pulimento. Los investigadores de la General Electric han creado una partida de diamantes partiendo de manteca de cacahuete.

Ventajas de las impurezas

Del incremento del conocimiento de la estructura y propiedades de los cristales se han derivado consecuencias industriales ilimitadas. Un ejemplo lo da el campo de la electrónica. La radio de bolsillo y el computador electrónico de maleta deben su existencia a una invención de los Laboratorios Bell Telephone en 1948, llamada transistor, que ahora parece el más sencillo de nuestros artificios electrónicos. La mayor parte de la electrónica del estado sólido, incluso el transistor, se basa en las propiedades inherentes a las sustancias casi metálicas, tales como el germanio y el silicio. En forma muy pura, estos elementos son conductores eléctricos deficientes, «semiconductores», porque sus electrones están unidos con bastante fuerza por medio de uniones covalentes. Pero este defecto puede ser rectificado añadiendo un pequeño vestigio de una impureza, antimonio, arsénico o bismuto, por ejemplo, cuyos electrones «suelos» vagan como cargas eléctricas negativas haciendo ligeramente conductor al material.

La adición de otras impurezas, boro, aluminio o galio, que no tienen electrones suficientes para unirse uniformemente con los átomos primitivos de germanio y de silicio, deja la estructura con un «agujero» o déficit electrónico. Este «agujero» puede desplazarse por la estructura y convertirse en un portador de electricidad positiva, es decir, lo opuesto a un electrón.



GEOMETRÍA DE SÓLIDOS DE LA NATURALEZA. *Cualquier cristal hallado en la tierra, sea cual fuere su tamaño, pertenece a uno de los Siete tipos fundamentales, cuyos nombres se derivan de las propiedades de sus lados y ángulos. Todos los ángulos de los cristales cúbicos son rectos, y todos sus lados iguales. La familia tetragonal tiene todos sus ángulos rectos, y dos de sus tres lados iguales. El tipo rómbico tiene todos sus ángulos rectos, pero sus lados son de tres longitudes diferentes. Los cristales monoclínicos son como los rómbicos, pero aplastados en una dirección, de modo que ocho de sus ángulos no son rectos. Los triclínicos están aplastados en dos direcciones; carecen de ángulos rectos y tienen tres lados desiguales. El trigonal es como el triclínico, pero con lados iguales. El hexagonal es como el tetragonal, pero con dos caras con seis lados iguales.*

La mayor parte de los efectos electrónicos del estado sólido, tales como la amplificación y la conmutación de señales, se consiguen cuando un semiconductor

con una clase de impureza se pone en contacto con otro semiconductor con otra clase de impureza. Los físicos del estado sólido han preparado pequeñísimos cristales que contienen una mezcla adecuada de impurezas, y confían que éstos serán los bloques monolíticos definitivos de una nueva «microelectrónica». Los ingenieros actualmente están ideando radios no mayores que una uña, formados por solamente dos o tres de estos bloques.

Contradicción para coleccionistas

Entusiasmados por lo que se infiere de tales adelantos, los especialistas en cristalografía no lo están menos sobre las posibilidades que ha abierto un descubrimiento accidental realizado en 1955. Conseguir dominar los cristales existentes es una cosa; producir un cristal donde antes no existía, es otra.

Entre las escasas sustancias de apariencia sólida que no son de estructura cristalina se encuentra, a pesar de su aspecto, el vidrio; la palabra que designa a los finos «cristales» apreciados por los coleccionistas, es errónea. El vidrio es una materia difícil de clasificar. A semejanza de un sólido, conserva una forma definida, pero la masa fundida de compuestos de sílice que lo constituyen se solidifica tan rápidamente que sus moléculas no tienen tiempo de formar una estructura cristalina. En los laboratorios de Corning Glass Works, del Estado de Nueva York, el doctor S. Donald Stookey experimentaba con un nuevo tipo de vidrio, una variedad fotosensible en la que se podían grabar complicados dibujos por medios fotográficos. Tenía una partida en un horno, y por descuido la dejó toda la noche. Cuando sacó el vidrio sobrecalentado, se le escurrió de las pinzas y cayó al suelo. Pero en vez de romperse, rebotó. El análisis demostró que se había convertido en un material cerámico. Por primera vez se había fabricado un vidrio con estructura molecular cristalina regular semejante a la de un metal. Este material nuevo, de una resistencia mecánica de 1.000 a 2.500 kilos por centímetro cuadrado, y resistente al calor hasta los 700°C, sirve ahora para la fabricación de conos para puntas de proyectiles.

Los maravillosos productos de la manipulación del sencillo cristal de un sólido pueden parecer, al asombrado hombre de la calle, casi un exceso de riquezas. Pero la historia de los sólidos no termina con los cristales.

La visión interna del corazón del hierro y del cobre, que los rayos X de Roentgen hicieron posible, ha descubierto la estructura del carbón y de la madera, y de otros compuestos orgánicos. Las técnicas de difracción de rayos X revelaron que aquellos materiales consistían en agrupaciones de moléculas gigantes, ahora llamadas «polímeros»; la brillante imitación de este trabajo de la naturaleza ha producido, como puede verse en las páginas siguientes, un nuevo mundo de sólidos completamente fabricados por el hombre; un asombroso desfile de sustancias sintéticas en el cual el nylon y la goma artificial no son más que dos de las que forman la fila de vanguardia.

La celulosa constituye un buen ejemplo. Durante el siglo XIX el estudio de sus reacciones químicas con el ácido nítrico había producido, primero la muy explosiva nitrocelulosa, o algodón pólvora, y luego un líquido viscoso y pegajoso que se convirtió en la base de la primera fibra fabricada por el hombre, el rayón. Pero la naturaleza física de la celulosa no fue comprendida hasta 1920. Gracias al análisis por rayos X, dos químicos alemanes, Kurt Meyer y Herman Mark, probaron que la celulosa consiste sencillamente en largas cadenas paralelas de moléculas de azúcar, unidas en forma regular y repetida, de una longitud de 50 a 150 unidades, y que estas moléculas eran características de las moléculas de algodón, lana, seda y demás fibras naturales. La goma resultó estar constituida de modo muy diferente; sus moléculas gigantes de isopreno, aunque unidas en forma de cadena, no estaban en hilera, sino arrolladas como una masa de pequeños muelles, lo que les proporcionaba elasticidad.

Analizando las diferencias entre las características de la celulosa, la goma y otras sustancias orgánicas, los científicos aprendieron que las propiedades de un material dependen de la estructura de sus moléculas. La creación en el laboratorio de una molécula sencilla cuyas propiedades se asemejasen a las de su prototipo natural fue relativamente sencilla; la dificultad consistió en unir las moléculas para que formasen las cadenas de polímeros que comunican a cada sustancia su carácter peculiar.

Camino de un «Ábrete Sésamo»

Aquí el gran avance, que abrió toda la industria de los polímeros sintéticos, fue llevado a cabo por un brillante joven americano, Wallace Hume Carothers, en 1929, dedicado a la obtención de un sustituto de la goma natural que pudiese ser utilizado en caso de guerra. Cuatro años antes, un equipo de investigación de los laboratorios Du Pont había creado algo muy parecido al isopreno, la molécula de la goma natural; esta nueva molécula fue llamada cloropreno, por el cloro que contenía en lugar de hidrógeno del isopreno. Pero seguía en pie la cuestión de cómo enganchar una molécula de cloropreno a otra para imitar la gigantesca cadena arrollada de las moléculas de isopreno natural. Carothers, que había ido a Du Pont para dirigir una investigación fundamental acerca de la estructura de las moléculas gigantes, había puesto a punto la técnica que se llama «polimerización».

Para su trabajo de soldadura molecular, Carothers utilizó como principales instrumentos el calor, la presión y numerosos catalizadores. Sometidas a esta campaña intensa de persuasión, las moléculas de cloropreno se unieron entre sí, con lo que la goma sintética comenzó su carrera. Desde diversos puntos de vista ha demostrado ser superior a la goma natural, ya que los átomos de cloro la hacen resistente a la grasa, a la intemperie y a la luz del sol.

En 1930 los químicos estaban construyendo nuevos polímeros por todos lados, combinando pacientemente materiales orgánicos básicos; así el nylon se podía fabricar como fibra, para obtener la suavidad de unas medias, o se podía producir compacto, para conseguir dureza suficiente para reemplazar los cojinetes de acero. Es evidente que el futuro de los Sintéticos es ilimitado, pues casi todos sus componentes orgánicos abundan en la naturaleza: tanto en el carbón como en la madera, en el petróleo y en el gas natural.



BURBUJA PROTECTORA. Las« casas de aire» semejantes a hongos traslúcidos, son artículos totalmente sintéticos de tela de nylon recubierta de plástico de vinilo, combinación cuatro veces más fuerte que la lona impermeabilizada, y un 40 % más ligero. Cuando se amarran o lastran, y se hinchan, estas estructuras proporcionan protección eficaz y espacio para almacenamiento.

A medida que el hombre amolda la naturaleza a sus propios diseños, se evidencia que las tradicionales divisiones de la materia en sólida, líquida y gaseosa, sólo son distinciones de clase. Son de importancia en la vida cotidiana; pero desaparecen ante la importancia de la molécula básica de todas ellas, y de lo aún más básico, el átomo.

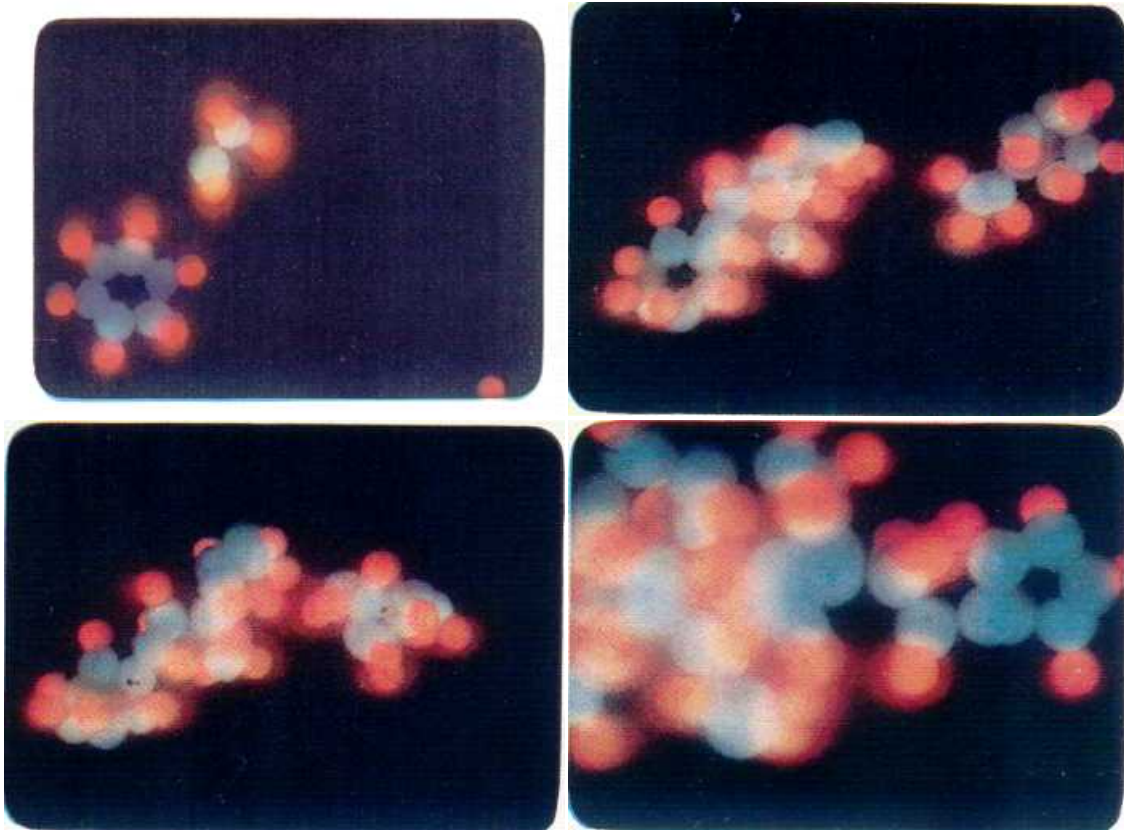
EN LOS PRODUCTOS SINTÉTICOS, EL GORDO DE LA LOTERÍA

De vez en cuando la investigación científica de las complejidades de la materia acierta el premio grande de la lotería. Eso es lo que sucedió cuando el hombre llegó a aprender a hacer equilibrios con los materiales básicos de construcción de la naturaleza, y adaptar la materia a sus designios.



LA MAGIA DE LA CUERDA DE NYLON. Algo mágico sucede en el vaso al unirse dos capas de productos químicos. La organización molecular de los líquidos es tal, que se polimerizan al mezclarse, formando una película de nylon, bastante fuerte para poderla sacar y arrollarla formando una cuerda. El proceso continúa hasta que se han consumido los líquidos.

A fines del siglo XIX un plástico parcialmente sintético llamado celuloide fue convertido en bolas de billar y en película cinematográfica.



Una molécula de benceno, anillo de seis lados de hidrógeno (rojo) y carbono (azul), encuentra una molécula de etileno y se polimeriza formando las moléculas gigantes de poliestireno.

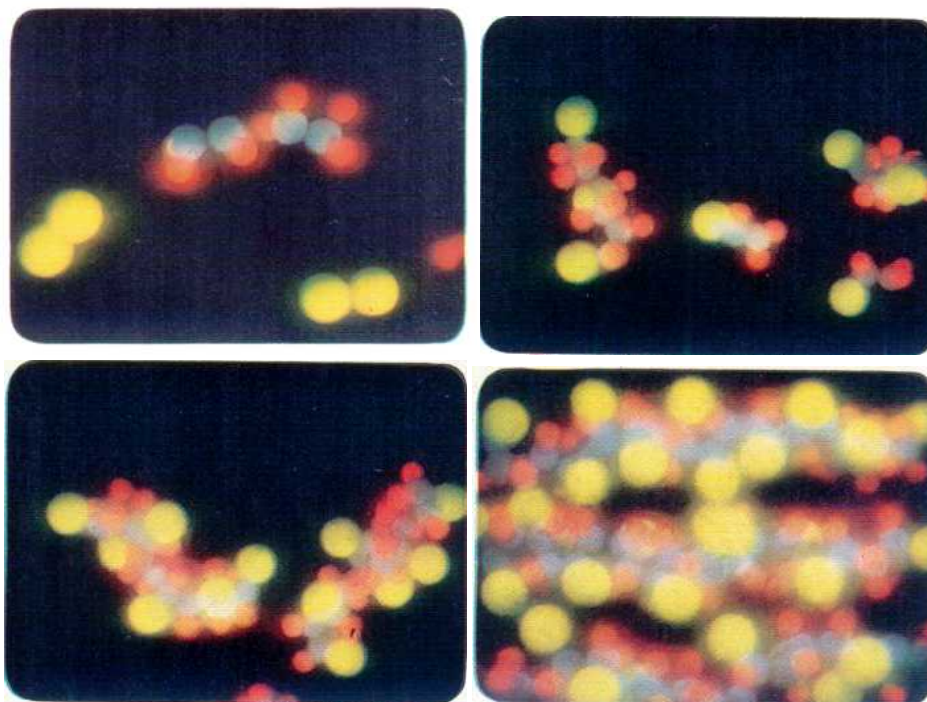
En 1909 fue patentada la bakelita, el primer plástico totalmente sintético. Después de la segunda Guerra Mundial, técnicas mejores y una demanda ,insaciable crearon repentinamente una industria de primer orden cuyo valor actual es de 12 mil millones de dólares, y que inunda los Estados Unidos con abundancia de nuevas formas y productos, como las brillantes casas de nylon.

La producción, en aumento, se divide en tres categorías principales: plásticos, goma sintética y textiles sintéticos.



CÓMO SE HACE CLORURO DE POLIVINILO

En la fórmula de la derecha, una molécula de hidrocarburo (etileno) encuentra cloro (Cl rojo), el cual desplaza a un átomo de hidrógeno, (H roja) formando cloruro de vinilo y cloruro de hidrógeno (HCl rojo). Los átomos de carbono unidos por doble enlace (C roja) se unen en una molécula gigante de enlaces sencillos, polímero, de cloruro de polivinilo.

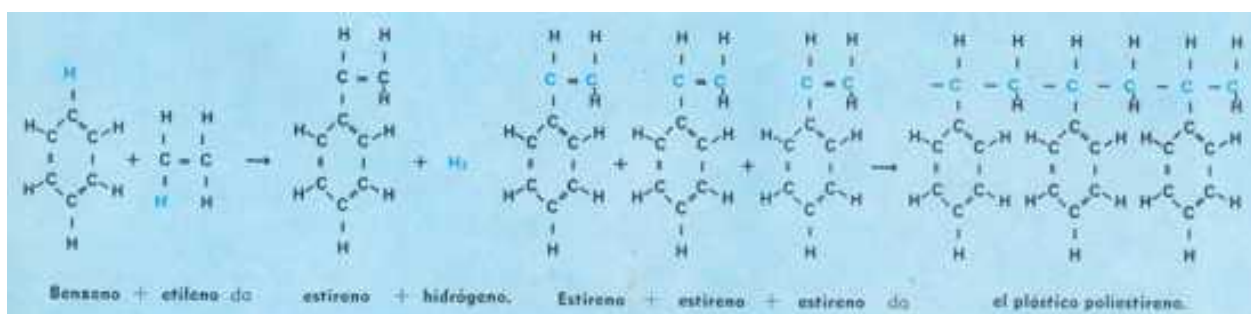


Aquí se representa la fórmula de clorovinilo: moléculas amarillas (cloro) encuentran moléculas de etileno, formadas por hidrógeno (rojo) y carbono (azul) y se unen formando un plástico.

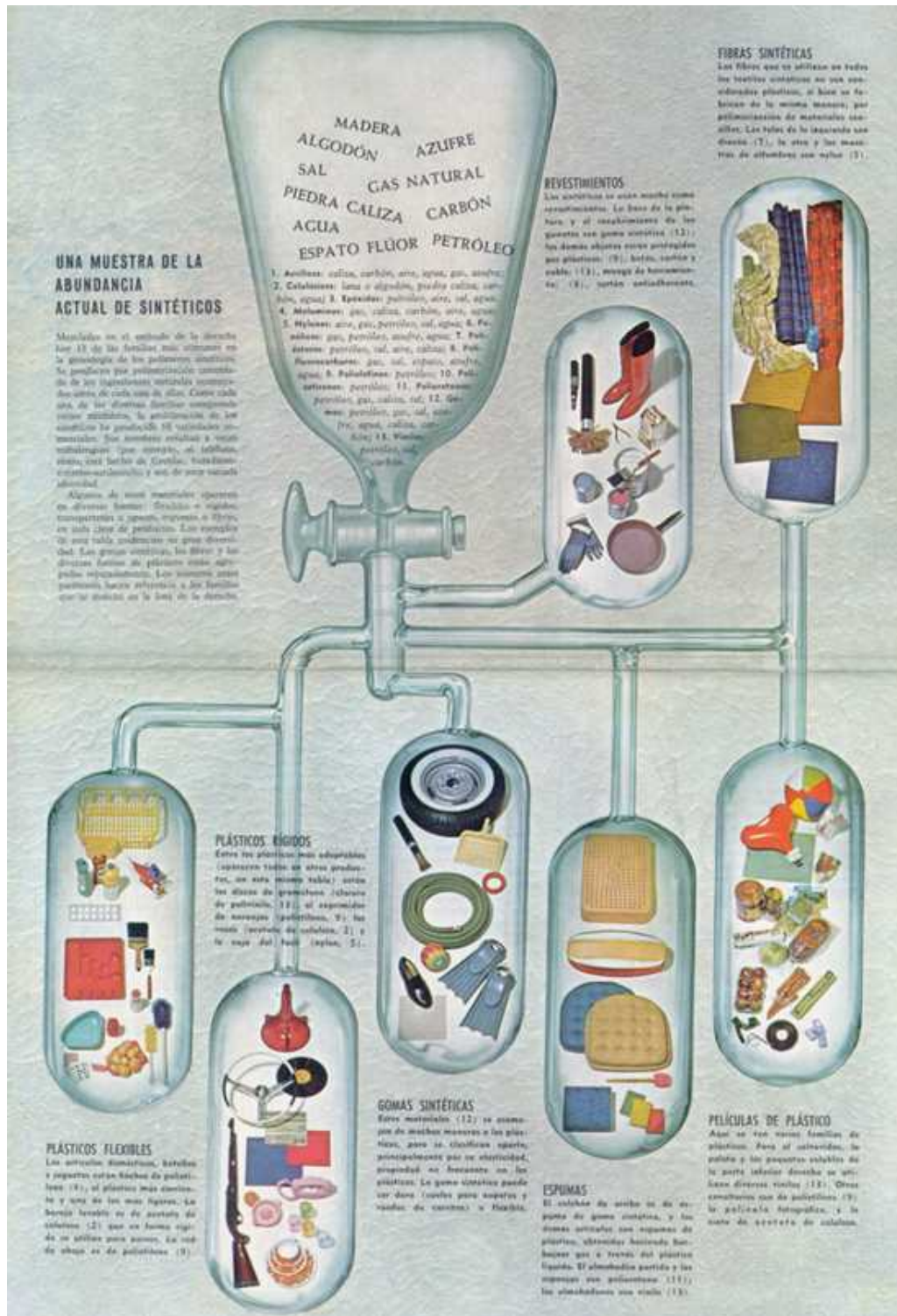
Primer paso de los sintéticos: encuentro de moléculas

Los burros de carga en la formación de sintéticos son las moléculas de hidrocarburos. Proporcionadas en abundancia por la naturaleza en forma de carbón, petróleo y gas natural, estas alianzas de átomos de carbono y de hidrógeno

aparecen en toda clase de formas y tamaños. Tienen una habilidad especial para engancharse entre sí y con otras moléculas, formando las moléculas gigantes llamadas polímeros. Éstos pueden también unirse formando una diversidad casi infinita de tipos de cadenas. Cuando éstas se unen en cantidades suficientes, se convierten en un sólido. Este proceso se llama polimerización. Algo semejante ocurre en la naturaleza cuando se forman sustancias como la goma y la madera. En los laboratorios la polimerización es la base de las gomas y plásticos sintéticos, tales como el nylon.

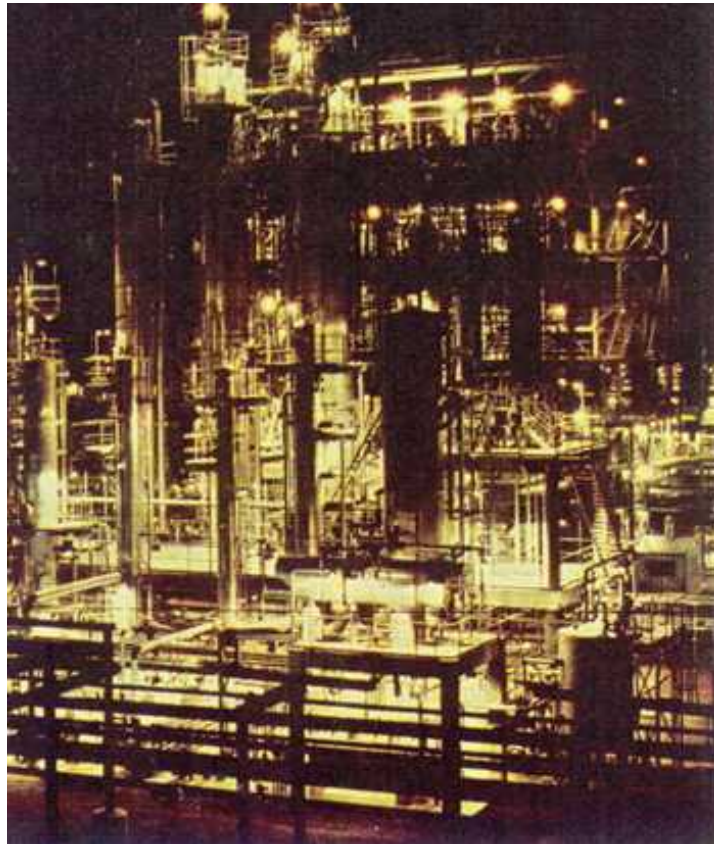


CÓMO SE HACE EL POLIESTIRENO. Una molécula de etileno encuentra una de benceno, llamada anillo de benceno. Se pierden dos átomos de hidrógeno (H azules), y se forma estireno que se polimeriza formando poliestireno. Los átomos de carbono (C azules) de cada uno de las moléculas se unen formando una columna vertebral de carbono para cada polímero. Este proceso se llama polimerización por adición, es decir, que las moléculas se juntan bajo presión y calor, en autoclaves. El proceso de formación del nylon, se llama polimerización por condensación: los moléculas se estrujan entre sí.



El creciente apetito de un joven coloso

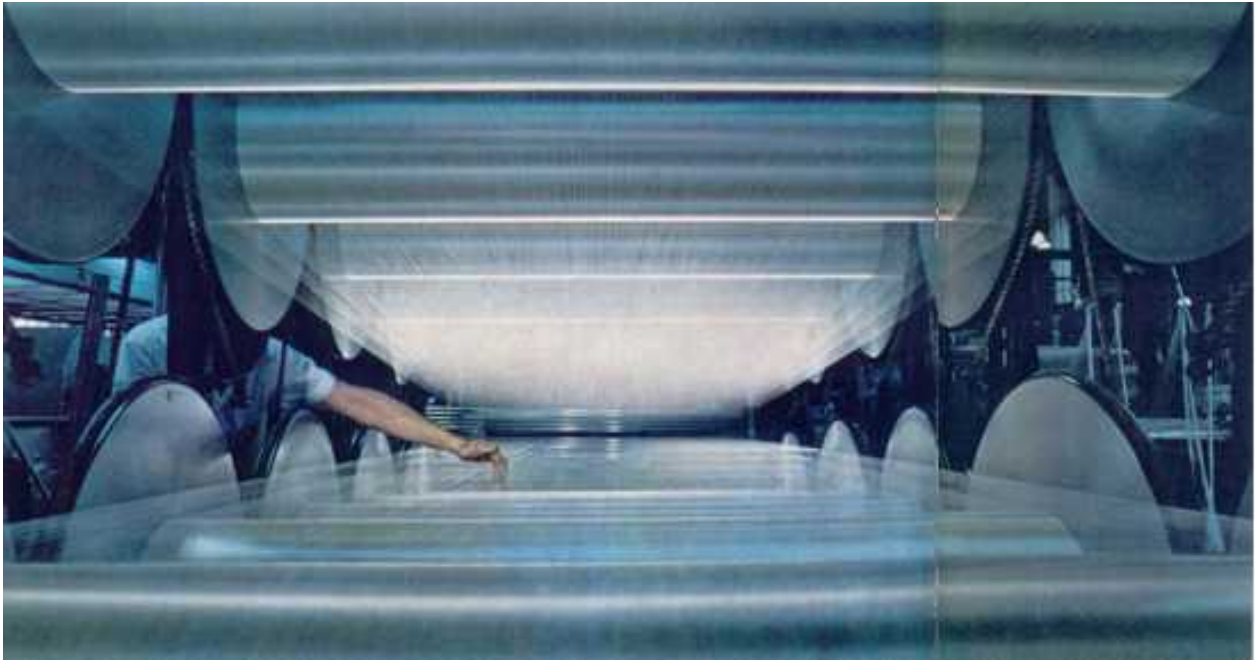
Como industria de primer orden, la de los polímeros sintéticos tiene menos de dos décadas, pero en la actualidad cuenta en los EE. UU., con cerca de 8.000 firmas. Cada año desarrolla nuevos materiales, métodos y máquinas para hilar, extruir y moldear la creciente lista de artículos.



De noche en una fábrica de nylon Chemstrand.

Para este negocio es fundamental la complicada preparación de los centenares de productos químicos que se utilizan en la polimerización, los cuales se combinan formando material sintético en bruto, generalmente en forma de líquido siruposo, polvo o gránulos como guisantes. En las plantas de elaboración de plásticos, la materia prima se trata con calor, y se estira, comprime e hincha en innumerables formas. La mayor parte de los plásticos se comprimen, insuflan o inyectan directamente en moldes para formar una serie de productos, desde carrocerías de automóviles hasta ensaladeras. Otros plásticos forman por extrusión planchas, tubos y películas continuas. Pequeñas fibras sintéticas se hilan y luego sirven para tejer. Las llantas y otros artículos elásticos se moldean con goma sintética, la cual

representa las tres cuartas partes del consumo total de goma de los EE. UU. Un total de unos 5 mil millones de kilos de sintéticos en bruto alimentan las insaciables máquinas.



CARRERA DE VELOCIDAD EN HILADOS. En una de las etapas antes de comenzar el tejido, los brillantes hilados sintéticos pasan a gran velocidad a través de un baño de encolada, en una de las plantas textiles de la J. P. Stevens Company. El encolado es un tratamiento químico que evita que las fibras se deshilachen y rompan. Las fibras sintéticas se han convertido en potente factor en el negocio textil. Pero para compensar su falta de absorción, se combinan con fibras naturales.



MANGA ESTIRADA EN DOS DIRECCIONES. En la compañía Du Pont se extruye una película transparente. A medida que la manga va saliendo de la máquina, se insufla aire, el cual la estira horizontalmente al mismo tiempo que se estira en dirección vertical. Esto hace que sus largas moléculas se orienten en dos direcciones, aumentando la resistencia. La película extruída se arrolla en carretes, y se corta para formar envases. También se fabrica película comprimiendo plástico entre rodillos.

Multitud de usos y promesa de muchos más

La gran diferencia de tamaño y función de los objetos de estas páginas, válvulas artificiales para el corazón y el globo, alto como 13 pisos, para el espacio son un ejemplo de la diversidad de usos de los sintéticos. Han demostrado proporcionar materiales para los usos menos corrientes. Por ejemplo, las máquinas barredoras que tratan de mantener limpio Nueva York, gastaban sus cepillos cada 180 kilómetros, hasta que fueron provistos de cerdas de nylon: ahora un cepillo barre 4.000 kilómetros de calles. Uno de los plásticos más adaptables es el fluorocarburo, tan resistente que pueden confeccionarse trajes protectores para resistir fogonazos de una temperatura de 1600° C. Al propio tiempo, es resbaladizo y se utiliza en rodamientos sin lubricante de automóviles y aviones. Los plásticos se utilizan también en la exploración espacial. Las puntas de los conos de los cohetes son con frecuencia de plástico; todos los astronautas llevan trajes de goma sintética y nylon aluminizado. Pasar de la carrera espacial a la carrera de botes es cosa fácil para los sintéticos: para la confección de velas se utilizan cada año un millón de metros de tela de fibras artificiales y 20 millones de kilos de plástico en la construcción de botes. Menos deportivas, pero más vitales, son las contribuciones de los plásticos a

las comunicaciones, desde la televisión, a los teléfonos y Telestar. Cuando el hombre llegue a la luna, los sintéticos llegarán con él.



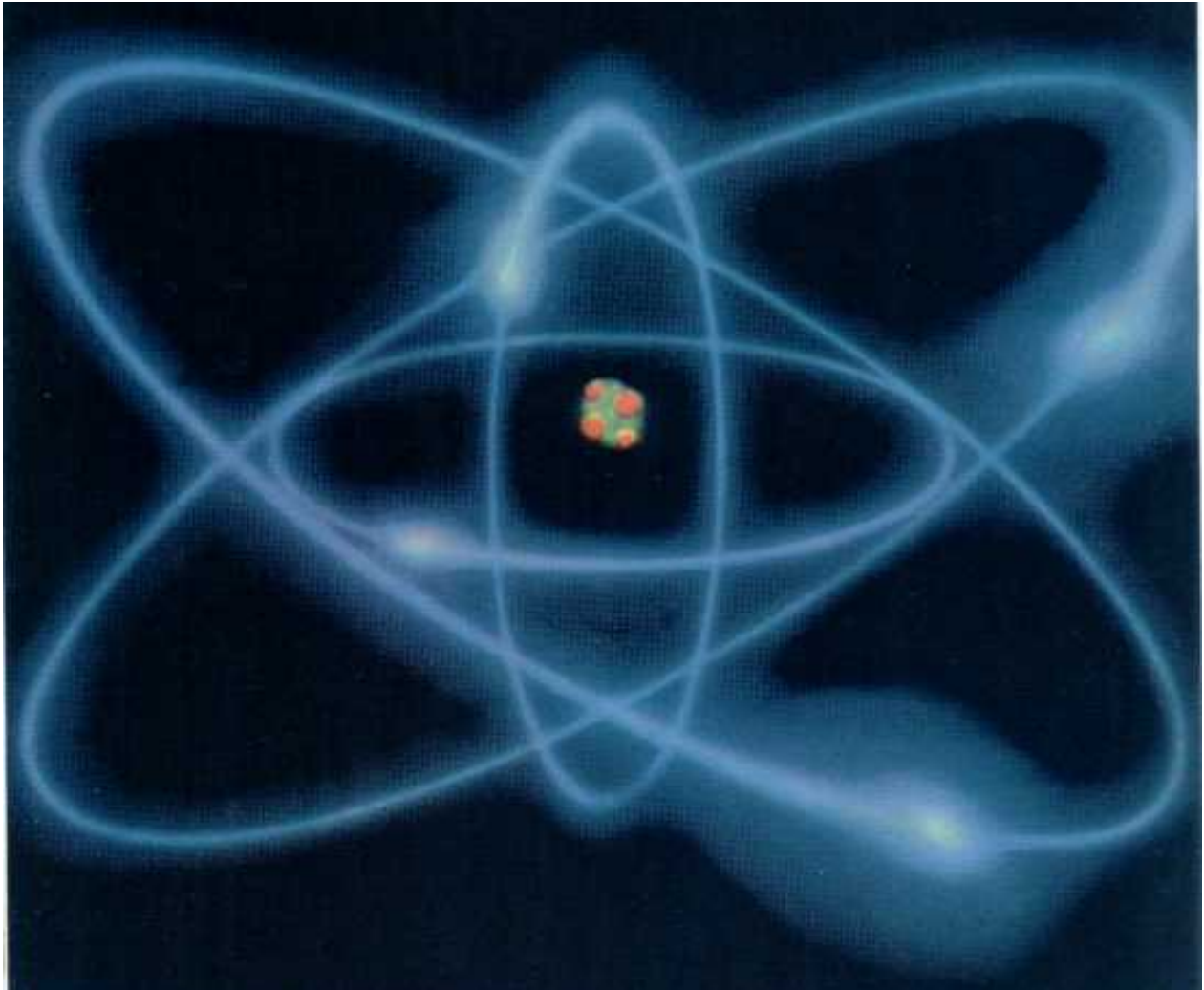
UN SITIO EN EL CORAZÓN. Los extrañas formas de encima de la mesa son trozos de plástico confeccionados como ensayos poro encontrar sustitución al corazón humano, Si bien no se ha podido conseguir todavía cosa ton sensacional, se están utilizando otros órganos artificiales en una disciplina médica nueva, En cirugía se utilizan arterias plásticas, suturas y «cota para huesos».



EN EL ESPACIO LO MISMO QUE EN CASA. He aquí al Eco II, un satélite pasivo de comunicaciones, en un hangar para dirigibles de Weeksville, Carolina del Norte. Esta esfera hinchable de 40 metros, formada por un sándwich de 0,00135 cm de espesor, de aluminio y película plástica, la prueban los ingenieros de la National Aeronautics and Space Administration (NASA). Pesa 200 kilos y se dobla ocupando 1 m.

Capítulo 6

Trazando el mapa del territorio del átomo



REPRESENTACIÓN DE UN ÁTOMO. El modelo de un átomo de berilio muestra cómo las partículas atómicas están relacionadas en el espacio. Los cuatro electrones del átomo (azules) giran alrededor de un núcleo compuesto por cinco neutrones (verdes) y cuatro protones (rojos). Para que el modelo fuese proporcionado, sería necesario colocar los electrones interiores a casi 23 metros del núcleo.

Hay pocos sitios en el mundo donde no sea conocido el airoso remolino del símbolo que utilizamos para representar al átomo, un núcleo resplandeciente en forma de racimo de uvas, encerrado en la red de los lazos entrecruzados de los electrones en órbita. Es el verdadero símbolo de nuestra época. Pero ¿qué realidad existe tras el símbolo? ¿Se ha hecho el retrato del átomo?

La verdad es que nadie ha visto nunca un átomo, pues es demasiado pequeño para poder verse. Incluso si se pudiesen construir lentes de aumento suficientemente potentes, las ondas luminosas son tan gruesas que el átomo seguiría escapando al examen visual; sería como intentar palpar la contextura y los ángulos de un grano de arena con manos cubiertas de guantes de boxeo.

No obstante, poco a poco, se ha conseguido trazar el terreno del átomo, partiendo de una evidencia que es de lo más circunstancial imaginable. Pero, en conjunto, esta evidencia nos ha proporcionado una imagen del átomo de utilidad comprobada, como lo demuestran el arma nuclear y el reactor de energía. La acumulación de indicaciones ha sido uno de los trabajos de detección científica más intensos, largos y perseverantes de nuestro siglo.

El hombre comenzó a especular sobre los átomos mucho antes que la ciencia llegase a ser actividad organizada. A los antiguos griegos les pareció lógico suponer que debía haber algunos bloques finales de materia. Muchos siglos después, Isaac Newton llegó a la conclusión que la materia estaba formada por «... partículas móviles, sólidas, macizas, duras e impenetrables...», o sea, que el átomo era como una bola de billar. La idea de Newton era pura especulación. El primer hombre que razonó la existencia del átomo por deducción intelectual fue John Dalton, a principios del siglo XIX. Según se observó en el capítulo 2, Dalton desarrolló una teoría de los pesos atómicos relativos de los elementos. Se sintió fascinado por el hecho que cuando éstos se combinan entre sí formando nuevos compuestos, lo hacen siempre en proporciones expresadas con números enteros. Tales números se presentan tan raramente en la naturaleza física, que se les considera indicación de algún significado oculto. Dalton llegó a una conclusión que ahora sabemos era del todo correcta: cada uno de los elementos debe estar compuesto de unidades fundamentales o «partículas finales», características de aquel preciso elemento y de ningún otro.

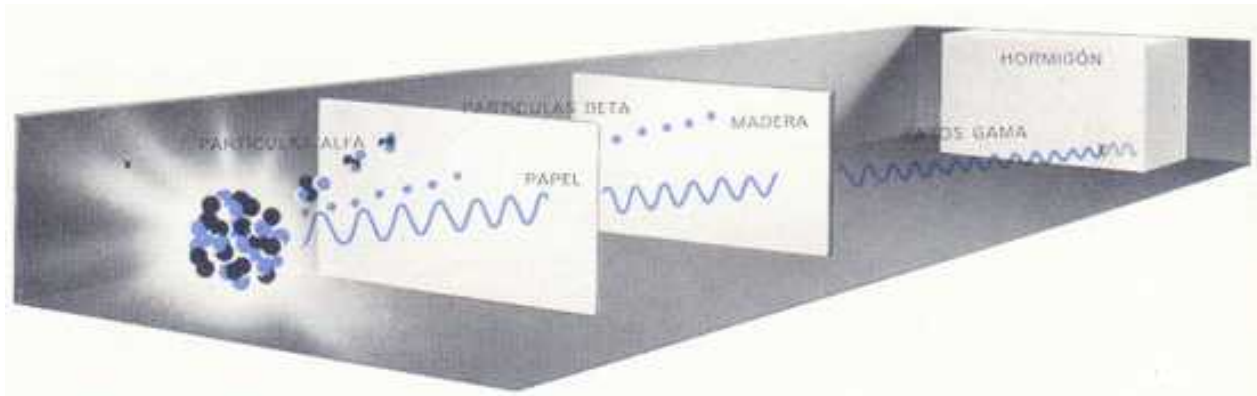
Esta explicación de la materia bastó para satisfacer a los químicos. No sintieron la necesidad de ahondar más, puesto que las reacciones químicas se producían sólo al borde externo de los átomos. Al final resultó que la brecha en el átomo la abrió un juguete de los físicos: la electricidad. A fines del siglo estaban ordenando sus descripciones matemáticas de los fenómenos eléctricos y buscaban nuevos campos

que conquistar. En el curso de la exploración de las propiedades de la electricidad, los físicos montaron una técnica experimental e idearon algunos aparatos de notable sensibilidad.

Cierta pieza especial de laboratorio abrió un nuevo curso a la investigación del átomo. El tubo de rayos catódicos, llamado tubo de Crookes, descubierto por el inglés William Crookes. Era un tubo de vidrio con unos alambres sellados a ambos extremos, un cátodo, o terminal negativo, y un ánodo o terminal positivo. Cuando se extraía el aire del tubo y se conectaban los alambres a una fuente de electricidad de elevado voltaje, aparecía un resplandor fluorescente en la pared de vidrio del tubo. Crookes demostró que se debía a un rayo emitido por el cátodo. Todo lo que en aquel tiempo se sabía acerca de los rayos catódicos era que se movían en línea recta. Pero el fenómeno causó enorme sensación. La exploración de las propiedades de un tubo de Crookes condujo a Wilhelm Roentgen a su descubrimiento de los rayos X en 1895, según se narra en el capítulo 5. Este trascendental accidente condujo a otro, que aumentó la curiosidad científica sobre el átomo.

Historia de un día sin sol

Henri Becquerel se encontraba trabajando en Francia con sulfato de potasio y uranilo, un compuesto del elemento uranio, para ver si generaba rayos X bajo la acción de la luz solar. Un día en que el sol no lucía, Becquerel puso por casualidad el compuesto sobre una placa fotográfica envuelta, y la dejó en un cajón. Más tarde se le ocurrió revelar la placa, y con gran sorpresa halló en ella una imagen negra, la silueta del trozo de sal de uranio. Algo del compuesto, alguna forma de energía radiante, debió atravesar la envoltura de la placa, impresionándola al igual que lo hace la luz del sol. Dos meses después del descubrimiento de los rayos X, esta potente energía que al parecer emanaba del corazón de un material sólido, presentaba nuevos problemas. ¿De dónde procedía la energía? ¿Del frío uranio?



LOS POTENTES DESCENDIENTES DEL FALLOUT. En los primeros experimentos con mineral de uranio, Henri Becquerel y Marie Curie descubrieron tres tipos principales de radiación de diverso poder penetrante. Se trata de las mismas emanaciones producidas por el «fallout» de la bomba atómica, y su peligro para la vida humana es proporcional a su poder para atravesar la protección. El diagrama representa la radiación de una muestra de un elemento inestable, el polonio. Las partículas alfa emitidas por la muestra son la radiación más débil que no puede penetrar una hoja de papel corriente. Las partículas beta, o electrones, son más enérgicas, pero puede detenerlas una capa de madera de 2 cm. Los más penetrantes son los rayos gamma, uno especie de potentes rayos-X, para protegerse de los cuales se necesita una capa de hormigón.

Becquerel propuso a sus amigos Pierre Curie, y a su mujer, Marie, que indagasen más a fondo el misterio. Comenzaron por investigar las propiedades del mineral de uranio, llamado pechblenda, y pronto descubrieron que además del uranio había en el mineral otra sustancia que emitía radiación con mucha mayor intensidad que el uranio. Empezaron la separación de tal sustancia, y al cabo de dos años de arduos trabajos en un mísero barracón, los Curie consiguieron revelar al mundo no uno, sino dos elementos completamente nuevos que emitían una extraña energía. Uno, como todo el mundo sabe, era el radio; el otro recibió el nombre de polonio, en honor del país natal de Mme. Curie.

Entretanto, las consecuencias intelectuales del descubrimiento de los rayos X cruzaron el Canal de la Mancha. En el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge desencadenó un estallido de actividad productora que dio fama mundial al laboratorio. Dos hombres que llegaron a convertirse en los principales exploradores del interior del átomo, se dedicaron a experimentar con los efectos de los rayos X sobre los gases. El de más edad era el director del Cavendish, Joseph

John Thomson, a quien llamaban «J. J.». El más joven era un neozelandés de 24 años, Ernest Rutherford, que acababa de llegar a Inglaterra con una beca, y que se había convertido en ayudante de Thomson. A Rutherford, que era un hombre desaliñado y cordial, le encantaba el mundo de la cacharrería experimental, y sus llamaradas de inspiración, basadas en lo que sus aparatos le comunicaban, eran fenomenales.

Thomson y Rutherford estudiaron lo que ocurría con un gas cuando se convertía en conductor de la electricidad bajo la influencia de los rayos X. Thomson suponía que tal conductividad era consecuencia de algunas partículas invisibles cargadas positiva y negativamente, generadas en el gas por los rayos X, fenómeno llamado ionización. Propuso la teoría que incluso podrían ser parte del legendario átomo, idea herética, dado el concepto aún aceptado entonces generalmente del átomo como bola de billar indivisible.

Thomson dirigió su atención a las partículas cargadas negativamente, pues sospechaba que era una andanada de aquellas partículas lo que constituía los rayos catódicos que atravesaban el tubo de Crookes. Otros experimentos habían demostrado que los rayos del tubo de Crookes pueden ser desviados acercando un imán al tubo. Thomson, utilizando campos eléctricos y magnéticos, midió la desviación, determinando la relación de la carga eléctrica de cada partícula a su masa. También determinó la velocidad de las partículas. La técnica que utilizó fue semejante a la de determinar el peso de una bala de acero disparándola cerca de un imán de fuerza conocida, y observando en cuánto se desvía la trayectoria de la bala. En 1923, el físico americano Robert A. Millikan ganó un Premio Nobel por su medición de la carga real de la partícula, permitiendo determinar con exactitud su masa. Los cálculos establecieron que la partícula negativa pesaba $1/1,840$ del peso de un átomo de hidrógeno entero.

Un pastel de pasas peculiar

La partícula que Thomson descubrió se llamó electrón, y aquél procedió a encajarla en una nueva imagen del átomo. Imaginó una esfera de electricidad positiva en la cual sus electrones estaban incrustados como pasas en un pastel. Cada elemento

tenía en sus átomos un número diferente de electrones, y éstos estaban siempre dispuestos de una manera especial y regular.

Thomson encargó a Rutherford averiguar todo lo posible sobre la naturaleza de las partículas positivas y negativas, con qué rapidez se formaban, cuánto tiempo duraban, con qué velocidad se desplazaban a su polo opuesto, positivo o negativo. Rutherford y otros descubrieron que el uranio y otras sustancias emitían por lo menos tres clases de rayos diferentes.

Cuando, por ejemplo, se ponía material radiactivo en un recipiente de plomo, los rayos que emanaban de un agujero podían separarse en tres haces divergentes aproximando un potente imán. Uno se inclinaba ligeramente en una dirección, el segundo se torcía pronunciadamente en la dirección opuesta, y el tercero no se inclinaba en absoluto.

El primero de estos haces era atraído por un terminal negativo, y no era muy penetrante; casi todo era detenido por una hoja de papel o unos cuantos centímetros de aire. Rutherford llamó a este haz rayos alfa. El segundo haz, al que llamó rayos beta, era atraído por un polo eléctrico positivo y era bastante más penetrante que los rayos alfa. Además, se parecía por otras propiedades al haz de rápidas partículas del tubo de Crookes, las mismas partículas que Thomson identificara como electrones.



OBSERVADOR DE UN MUNDO

MINÚSCULO. Si bien sir William Crookes produjo diamantes artificiales y descubrió el elemento talio, es más conocido por sus experimentos con haces de electrones, efectuados en tubos de vacío primitivos, parecidos al que aparece en esta caricatura de «Vanity Fair». Las investigaciones de William Crookes proporcionaron técnicas que más tarde fueron utilizadas para determinar la estructura atómica.

El último haz de rayos, los que no se desviaban, eran los más penetrantes y se asemejaban mucho a los rayos X. Su descubridor, Paul Villard, los llamó rayos gamma.

En 1898 Rutherford dejó el laboratorio Cavendish para ocupar una cátedra en la Universidad McGill en Canadá, posición lucrativa que le permitió casarse con la muchacha que dejara en Nueva Zelanda. En McGill, Rutherford y sus colaboradores publicaron una serie de comunicaciones demostrando que los átomos de radio se transmutan en átomos de otros elementos, en una serie de desintegraciones radiactivas. Demostró además que el rayo alfa debe ser una partícula pesada cargada, probablemente el ión positivo del gas helio. Fue esta partícula alfa la que eligió para su exploración subsiguiente del corazón del átomo.

Prólogo a un hábil artificio

En 1907 Rutherford volvió a Inglaterra como profesor de física de la Universidad de Manchester. Tomó de ayudante a Hans Geiger, joven físico alemán cuyo nombre se ha convertido en una palabra de uso familiar en la era atómica. Juntos, desarrollaron o adaptaron diversos artificios para contar individualmente las partículas alfa, antepasados del contador Geiger. Uno de ellos era el contador de destellos, un disco recubierto de sulfuro de cinc. El impacto de una partícula alfa sobre la pantalla produce un pequeño destello, visible con un microscopio.



A la izquierda, átomo de Thomson (1898), cargas negativas en esfera positiva; al centro, átomo de Lenard (1903), pares cargas positivas y negativas; a la derecha, átomo de Nagaoka (1904), anillo electrones con centro positivo

Cuando un joven estudiante de Manchester llamado Ernest Marsden se unió a ellos como ayudante de laboratorio, Rutherford pidió a Geiger que le orientase en un experimento a fin de proporcionarle experiencia. Dicho experimento estaba destinado a consecuencias profundas. Durante el mismo debía verse qué ocurría cuando se disparaban partículas alfa contra una hoja delgada de metal. Rutherford estaba casi seguro que las partículas la atravesarían desviándose apenas de sus trayectorias. Si el modelo relleno de electrones de Thomson era correcto, el átomo no tenía en su interior ni partículas ni concentraciones de fuerzas lo suficientemente grandes para desviar la pesada partícula alfa.

Geiger y Marsden dispusieron una fuente radiactiva de partículas alfa, un blanco formado por la hoja metálica y, a un lado, una pantalla detectora de sulfuro de cinc, separada de la fuente, pero no del blanco, por un bloque de plomo. Luego enfocaron un microscopio sobre la pantalla del detector. Cuando sus ojos se acostumbraron a la luz, observaron algunos destellos en la pantalla, que anunciaban la llegada de partículas alfa. Como la pantalla estaba separada de la fuente radiactiva, aquellas partículas no podían proceder sino de la hoja metálica, y de ser así habían literalmente rebotado de dicho blanco. Los dos jóvenes científicos contaron su hallazgo a «Papá», que era como llamaban a su jefe, dejándolo atónito. Como Rutherford dijo más tarde, «era tan verosímil como si se hubiese disparado un proyectil de 15 pulgadas contra una hoja de papel de seda, hubiese rebotado y nos hubiera alcanzado».

Misterio de un rebote

Rutherford fue al fondo de la cuestión; ¿cómo era posible que una veloz partícula que pesaba miles de veces más que un electrón, rebotase en un grupo de átomos que (según la descripción de Thomson), eran poco más que bolas de pelusa tachonadas de electrones? La única conclusión a que llegó Rutherford fue que se trataba de una fuerza eléctrica la que desviaba aquellas partículas relativamente pesadas, fuerza inmensamente poderosa que debía estar concentrada en un pequeño volumen, puesto que solamente unas pocas partículas fueron desviadas en forma muy pronunciada. La mayor parte de ellas pasarían por fuera de aquella

región, o, a lo más por sus cercanías, siendo poquísimas las que incidirían directamente sobre ella.

Partiendo de esta hipótesis, Rutherford concibió una imagen completamente distinta del átomo: se trataba de un átomo increíblemente tenue, un espacio vacío en casi su totalidad. Su parte central o «núcleo» era pequeña, pero enormemente pesada y densa, con una envoltura de electrones en rápida rotación alrededor suyo, como planetas alrededor del sol. El núcleo, con su potente carga eléctrica positiva, era la sede de la fuerza que había desviado las partículas alfa en el experimento de Geiger-Marsden.

Después de dos años más de estudios, Rutherford, en febrero de 1911, publicó un trabajo titulado «*Sobre la dispersión por la materia de las partículas alfa y beta, y la estructura del átomo*». Considerada actualmente una de las obras fundamentales de la investigación científica, en su día casi pasó inadvertida de la comunidad científica de la época. Para el mundo exterior al laboratorio de Rutherford, el átomo seguía siendo una bola de billar, o un pastel de pasas.



Izquierda, Átomo de Rutherford (1911), Electrones bullendo en torno al núcleo; derecha, Átomo hidrogeno de Bohr (1913), electrón en torno al núcleo.

HISTORIA INTERIOR DEL ÁTOMO

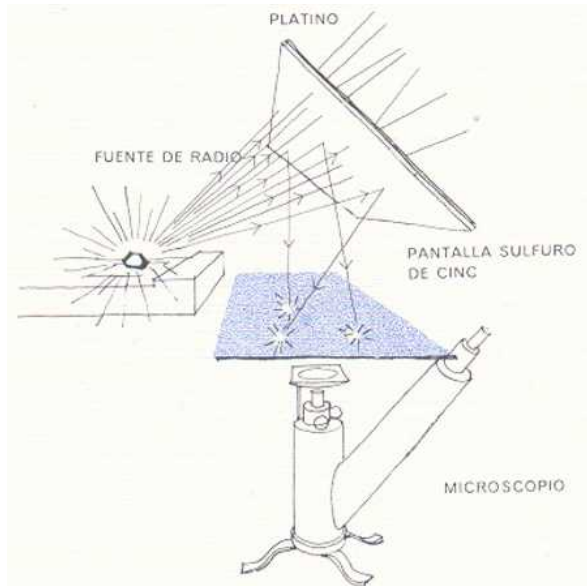
La idea del átomo como partícula compacta e indivisible permaneció indiscutida desde 400 a. de J. hasta casi 1900. Pero una vez se puso en duda, se tardaron sólo 15 años para que los científicos postulasen el átomo moderno. En los dibujos de arriba que ilustran este ciclo, las partículas de carga negativa se indican en azul, y las positivas en gris.

- El primero que diseñó el mecanismo interior del átomo fue el inglés J. J. Thomson. En 1898 mantuvo que gran número de electrones cargados negativamente (que llamó corpúsculos) estaban contenidos en el interior de

un campo positivo en forma de bola. En 1903, Philipp Lenard, físico de la Universidad de Heidelberg, propuso un modelo atómico compuesto de «diamidas» — pares de cargas positivas y negativas que flotaban.

- Al año siguiente, Hantaro Nagaoka, del Japón, publicó una descripción muy moderna; el átomo era un anillo de electrones alrededor de un centro pesado. Comparó el átomo al planeta Saturno con su anillo, que permanece estable porque el núcleo es bastante pesado para mantener los anillos en sus órbitas.
- En 1911, el neozelandés Ernest Rutherford llegó a la conclusión de que la carga positiva del átomo estaba concentrada en su centro, mientras los electrones bullían a su alrededor.
- Dos años más tarde el físico danés Niels Bohr modificó esta idea con su teoría de que todos los electrones se mueven en capas esféricas distintas. En su átomo de hidrógeno, el único electrón se mueve alrededor del núcleo en una órbita circular específica.

No obstante, hubo un físico que se interesó por el átomo de Rutherford, un joven danés, Niels Bohr, que llegaría a ser uno de los gigantes de la física nuclear, y un enlace personal entre el trabajo de vanguardia de Rutherford y la bomba atómica. Bohr atacó cierto problema teórico relativo a los electrones del átomo de Rutherford, semejante al sistema solar, problema que el mismo Rutherford ya conocía. Era muy posible imaginarse que los electrones se mantenían en correctas órbitas girando rápidamente alrededor de un «centro» de potente atracción, pero, según las leyes clásicas de la física, una carga eléctrica en tales condiciones irradiaría luz, u otra clase de energía, al igual que se producen rayos X en el tubo de Crookes. Y, además, irradiaría toda su energía, y pronto caería en espiral sobre el núcleo.



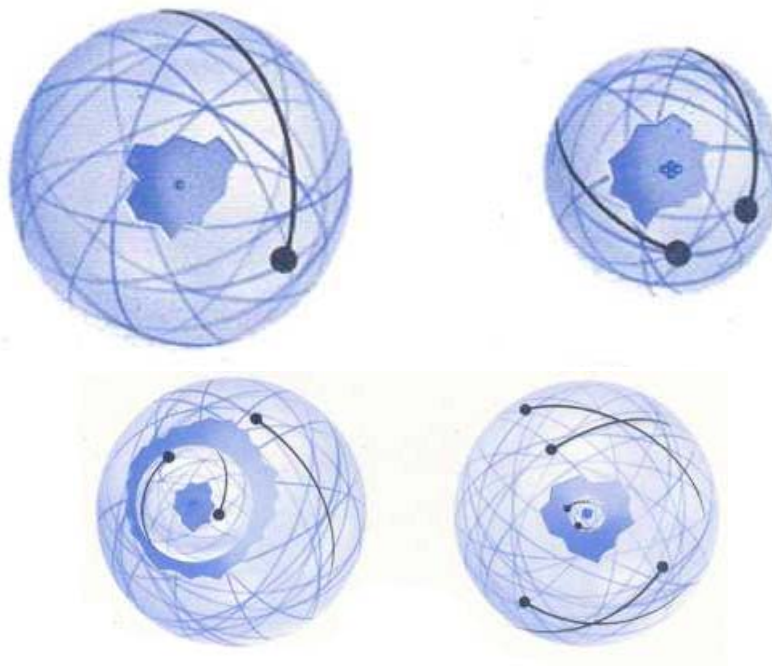
UN ESPEJO PARA EL ÁTOMO El dispositivo que aquí representamos proporcionó a los físicos Hans Geiger y Ernest Marsden datos que más tarde demostraron que el núcleo atómico era de estructura densísima. Cerca de una pequeña cantidad de radio se dispuso una delgada hoja de platino; con gran sorpresa de los experimentadores, una de cada 8.000 partículas alfa rebotó hacia atrás desde el platino, produciendo un pequeño destello en lo cercano pantalla detectora de sulfuro de cinc, que podía ser observada a través de un microscopio. Geiger y Marsden dedujeron que sólo la presencia de núcleos densos en los átomos de platino producía tan fuerte reflexión

Bohr solventó con audacia esta dificultad: afirmó que el electrón no disiparía su energía. En apoyo de esta hipótesis le fue de utilidad una nueva especulación teórica, que evolucionaría hasta llegar a ser la teoría cuántica, propuesta por un alemán, Max Planck, en 1900. Tras las ecuaciones cuánticas de Planck se encontraba un concepto revolucionario: que la radiación (luz, o cualquier otra forma de energía radiante) no era nunca emitida en forma continua, sino en forma de pequeños paquetes discretos llamados «cuantos» (del latín *quantum*, o cuanto).

Energía escalonada

Aplicando esta idea, Bohr dio por sentado que, al revés de lo que enseñaba la física clásica, un electrón podía girar alrededor de su núcleo indefinidamente sin irradiar su energía, pero no le estaba permitido hacerlo en cualquier círculo. Bohr limitó la libertad del electrón, restringiéndola a ciertas órbitas. En una órbita determinada el

electrón tenía una energía específica; podía pasar a otra órbita, pero tenía que hacerlo de un salto. Y era solamente al cambiar de órbita que emitía o absorbía energía. Era como si cada electrón estuviese descansando en una escalera; para subir un peldaño tenía que recibir un paquete de energía, y cuando lo bajaba, entregaba otro. Por ejemplo, en un tubo de Crookes lleno de gas hidrógeno, cada átomo de hidrógeno recibe energía en forma de electricidad de elevado voltaje, ascendiendo así su único electrón a una órbita superior. Al cabo de algún tiempo el electrón puede volver a descender a su órbita inferior, y cuando lo hace, puede emitir un cuanto de energía, que aparece en el espectro en forma de un rojo brillante, el color característico del hidrógeno.

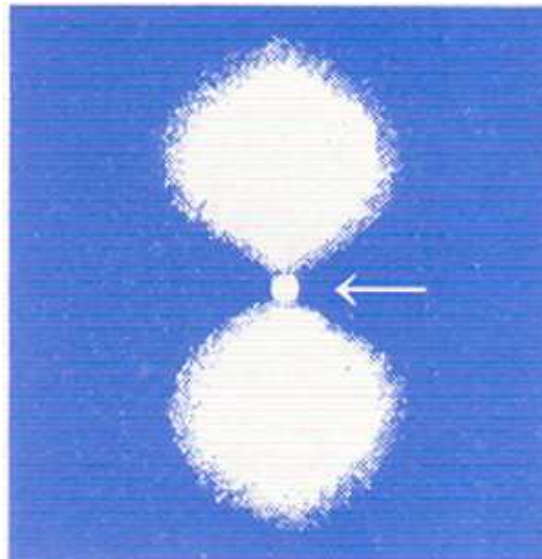


EL JUEGO DE LA CÁSCARA ATÓMICA.

La clásica imagen del átomo es un denso núcleo de protones y neutrones (azul oscuro), rodeados de electrones (puntos negros) que giran en capas esféricas. A medida que aumenta el tamaño y la carga de los núcleos, los electrones son más atraídos, y las capas se hacen más pequeñas. El diámetro de la capa interior del carbono, en cuyo núcleo hay seis protones y seis neutrones (inferior derecha) tiene un cuarto del diámetro del hidrógeno (superior izquierda), de sólo un protón. Arriba derecha, el helio y abajo izquierda, el litio

Al principio, Bohr elaboró sobre el hidrógeno su teoría del comportamiento de los electrones y supuso que aquél tenía sólo un electrón en su átomo. Cuando otros científicos estudiaron una representación más general de los elementos, se encontraron con un problema. ¿Cómo iban a saber cuántos electrones había en los átomos de los diversos elementos? Quizás la respuesta se hallase en la Tabla Periódica de los Elementos de Mendeleiev, que atribuía un número atómico a cada elemento, desde el 1 para el hidrógeno al 92 para el uranio. Según vimos en el capítulo 2, cuando Mendeleiev compuso su tabla se desconocía el verdadero significado de los números atómicos.

En 1913, antes de partir para morir en la primera Guerra Mundial, el físico inglés de 26 años Henry Moseley, demostró que el número de electrones de los átomos de cada elemento era igual a su número atómico. Doce años más tarde el austriaco Wolfgang Pauli, fijó el número de electrones que ocupaban cada una de las capas concéntricas de los átomos, explicando que las propiedades químicas se derivan del número de electrones de la capa exterior.



NUBE DE INCERTIDUMBRE. Más que pensar en la órbita de un electrón como si fuese una trayectoria circular específica, los científicos generalmente hacen referencia a una nube de probabilidad en cuyo interior es probable que se encuentre un electrón. Cuando un átomo de hidrógeno se encuentra a la temperatura ambiente, esta nube es esférica, pero a mayores niveles de energía el electrón del hidrógeno se encontraría en el interior de una nube de forma de pesa de gimnasia, alrededor del núcleo (punto blanco).

El mapa del átomo trazado partiendo de la teoría original de Rutherford fue obteniendo aceptación. Pequeñísima entidad de sólo cinco mil millonésimas de centímetro de diámetro, es un complejo sistema arquitectónico que contiene hasta cien electrones que giran en incesantes círculos alrededor de un núcleo pequeñísimo. Si se ampliase el núcleo de un átomo de hidrógeno al tamaño de una pelota de golf, su único electrón describiría su órbita a un kilómetro y medio de distancia. Y este electrón gira a tal velocidad que cada segundo da cien mil billones de vueltas. Es esta propiedad del electrón en órbita, de estar en todas partes al mismo tiempo, lo que da solidez y rigidez a la estructura del átomo.

Pero por muy clara y satisfactoria que sea, la imagen del átomo de Bohr no es el fin de esta historia. Se basaba en una idea de la materia como compuesta por partículas discretas. En realidad existe evidencia de que toda materia tiene propiedades de onda.

Desde los tiempos de Newton ha existido controversia sobre si un haz de luz se compone de pequeñas partículas separadas, o de ondas. Durante algún tiempo los científicos estuvieron convencidos que la luz consistía en ondas, porque averiguaron que los diferentes colores corresponden a diferentes frecuencias de tales ondas, y que podían influirse entre sí, produciendo «pulsaciones», lo mismo que ocurre en el aire con ondas sonoras de frecuencias diferentes. Pero en 1905, Albert Einstein, en su trabajo de 17 páginas sobre el «efecto fotoeléctrico», que le valió el Premio Nobel, explicó por qué la luz parecía incidir sobre un blanco y desprender electrones sueltos de la manera esporádica que lo harían partículas independientes, y no en la forma suave y continua que cabría esperar de unas ondas. En definitiva, Einstein decía que la luz consistía en partículas.

Meditaciones de un príncipe

En el mismo año, aquel joven reservado procedió a revolucionar la física en campos más amplios con su Teoría de la Relatividad, la cual, entre otras cosas, igualaba la materia y la energía. Muchas inteligencias de esta época de la ciencia cayeron bajo el influjo de Einstein. Una de ellas fue el príncipe Louis de Broglie, miembro de una noble familia francesa. Aceptando como cierta la posibilidad que la luz pudiera estar

simultáneamente compuesta de partículas, y ser semejante a ondas, De Broglie, en 1923, razonó que quizás toda la materia estuviese constituida de manera semejante. Si la luz era energía, y los electrones eran materia, y si, según Einstein, las dos eran variedades de la misma cosa, pudiera ser que tuviesen otras cualidades en común. Nadie entendía cómo tal cosa podía ser posible, ni siquiera cómo podía uno imaginarse tal electrón onda y partícula, pero aquéllos eran tiempos de audacia.

El físico vienés Erwin Schrödinger, al estudiar las especulaciones de Einstein y de De Broglie, presentó una ecuación matemática que servía de base a todos los fenómenos ondulatorios de aquella clase. Eso ocurría en 1926. Un año más tarde la especulación abstracta de De Broglie de que los electrones eran partículas ondulatorias, se convirtió en algo más que especulación. Dos americanos, C. J. Davisson y L. H. Germer, trabajando en los Laboratorios de Bell Telephone, descubrieron que los electrones eran difractados por una superficie cristalina del mismo modo que lo hacían los rayos X, y de la misma manera que una rejilla de difracción refracta la luz.

Estos son algunos de los adelantos complejos y paradójicos de aquella época trascendental para la física.

Según se verá en el capítulo siguiente, una técnica matemática, la mecánica cuántica u ondulatoria, modificó aún más la imagen del átomo.

LA TERRENAL Y ELEGANTE COMUNIDAD DE LOS ELEMENTOS

La inmensa cantidad de objetos del mundo que nos rodea tiene su origen en un puñado de elementos. No se sabe cuántos existían originalmente, pues algunos elementos radiactivos pueden haberse desintegrado desde hace mucho tiempo; otros están desapareciendo. Compensando esta disminución de riqueza, el hombre está produciendo en masa elementos artificiales, y encuentra usos para elementos naturales antes desdeñados. El plutonio fabricado por el hombre, que durante la segunda Guerra Mundial se obtuvo por microgramos, se almacena ahora por toneladas. El germanio, de poco interés hace diez años, es ahora el alma de la industria de transistores. Los 103 elementos conocidos actualmente están retratados en grupos de familia en las páginas siguientes. Cada familia aparece

sobre un fondo del mismo color que en la tabla periódica de enfrente; cada elemento es examinado según su situación en la jerarquía de la materia.

LOS METALES ALCALINOS

Elementos blandos con tendencias violentas

Desde los tiempos prehistóricos los metales han sido estimados por el hombre. Pero por familiares que sean, existen seis blancos como la plata, litio, sodio, potasio, rubidio, cesio y francio, que la mayoría no reconocerían. A decir verdad, el francio no ha sido jamás visto.

Esta media docena de elementos blandos y ligeros funden a baja temperatura, ocasionan quemaduras al tocarlos, se desintegran al aire, y no se encuentran libres en la naturaleza. Los seis son llamados elementos alcalinos por su reacción explosiva con el agua formando un "álcali", o base (opuesta a un ácido).

Por extrañas que sean estas propiedades, estos elementos son metales. La razón se encuentra en la personalidad de los átomos metálicos y no metálicos. La mayor parte de los metales tienen pocos electrones, uno o dos, en sus órbitas externas, en contraste con los no metales, que tienen de cuatro a siete. Más importante aún, el átomo del metal es generalmente mucho mayor que el átomo del no metal; es decir, la distancia del núcleo a la capa externa de electrones es mayor. Así, los pocos electrones que giran en la capa más externa del átomo de metal son débilmente atraídos, y por lo tanto fácilmente perdidos, por el lejano núcleo, mientras los núcleos de los no metales sujetan con fuerza a sus familias.

UNA TABLA DE LOS ELEMENTOS

The table is organized into several families and groups, labeled with Roman numerals and letters A and B. The elements are color-coded by family: alkali metals (yellow), alkaline earth metals (orange), transition metals (red, green, blue, and purple), and noble gases (grey). The table includes the following elements:

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	H																	
2		He																
3			Li	Be	B	C	N	O	F	Ne								
4			Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar								
5			K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
6			Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
7			Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
8			Fr	Ra	Ac													

UNA TABLA BIEN ORDENADA. La tabla periódica de enfrente comprende los 103 elementos conocidos. A las hileras horizontales se las llama familias o grupos y van numeradas en cifras romanas, de I a VIII, con pequeños subdivisiones marcadas A y B. En las columnas verticales se inscriben los elementos según su peso creciente. El hidrógeno, que tiene propiedades únicas, se inscribe aparte. Encima del símbolo de cada elemento está el número atómico, igual al número de protones en el núcleo. Debajo está el peso atómico, que es el peso de un átomo comparado con el de un átomo de carbono que se fija exactamente como 12. Cuando el número está en paréntesis, el elemento es inestable, y tiene un núcleo constante. Los números a la izquierda representan el número de electrones. La línea del boro (B) al astato (At) separa los metales de arriba de los no metales.

Entre los metales alcalinos, de átomos muy grandes, el solitario electrón, a la menor oportunidad, se desprende para combinarse con otros elementos, lo que explica la violenta naturaleza de la familia.



SACANDO SAL DEL MAR. En Hambantota, en la costa sudeste de Ceilán, los indígenas utilizan las manos para recoger sal común, inofensivo compuesto formado por la explosiva unión del corrosivo sodio y del venenoso gas cloro. Aquí la sal se obtiene dejando que el agua del mar se evapore en lagunas marinos. En los océanos se halla disuelta lo asombrosa cantidad de 50 mil billones de toneladas de sal, los cuales contienen 20 mil billones de toneladas de sodio.



3
Li
6.939

LITIO, de «lithos», piedra; descubierto en 1817; es el más ligero de los elementos sólidos. Se le representa sumergido en un aceite inerte, y forma un óxido negro (parte superior) cuando se expone al aire. Se usa en cerámica, aleaciones, en la bomba-H y en el tratamiento de la gota.



11
Na
22.990

SODIO, de soda; símbolo Na, nombre latino, «natrium»; descubierto en 1807; sexto elemento en orden de abundancia. El sodio metálico es demasiado violento para la mayor parte de usos cotidianos. Entre sus compuestos figuran la sal de mesa, la levadura en polvo, el bórax y la lejía.



19
K
39.102

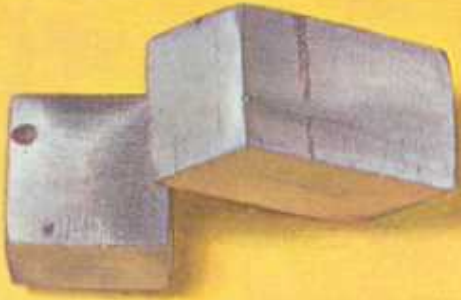
POTASIO, de potasa, forma impura de carbonato potásico conocida de los antiguos; símbolo K, del nombre latino «kalium»; descubierto en 1807. Séptimo elemento en orden de abundancia. Su radiactividad, aunque escasa, puede ser una de las causas naturales de la mutación genética.



37
Rb
85.47

RUBIDIO, de «rubidus», o rojo, (color que sus sales comunican a la llama); descubierto en 1861. El rubidio, que se utiliza en las células fotoeléctricas, es un combustible espacial en potencia. Como el potasio, es también algo radiactivo, y se utiliza para localizar los tumores cerebrales.





2
8
8
2

20
Ca
40.08

CALCIO, de «calx», o cal — un óxido de calcio; descubierto en 1808; quinto en orden de abundancia en la corteza terrestre. Su presencia en nuestro cuerpo es esencial. El adulto posee aproximadamente un kilo, principalmente en los huesos y dientes. El calcio regula los latidos del corazón.



2
8
18
8
2

38
Sr
87.62

ESTRONCIO, de Strontian, Escocia; descubierto en 1790; metal raro que es una especie de gemelo pernicioso del benéfico calcio. El estroncio 90 radiactivo se encuentra presente en el «fallout», y es absorbido por los tejidos óseos; en gran cantidad destruye la medula y produce cáncer.



2
8
18
18
8
2

56
Ba
137.34

BARIO, de «barys», pesado o denso; descubierto en 1808; para reducir al mínimo la oxidación, esta muestra fue fotografiada en argón. El sulfato se toma en medicina, para hacer visibles el estómago y los intestinos con los rayos-X. El nitrato de bario da color verde a los fuegos artificiales.



2
8
18
32
18
8
2

88
Ra
(226)

RADIO, de «radius», o rayo; descubierto en 1898 por Pierre y Marie Curie; sexto de los elementos en orden de rareza. Mostramos bromuro de bario con sulfuro de cinc — para esferas luminosas de relojes. El radio emite peligrosas radiaciones que hacen resplandecer el sulfuro de cinc.



CENOTAFIO DE CALCIO. El monumento a Washington, de mármol, atestigua la función estructural del calcio, cuyas compuestos sirven de «vigas de acero para la vida», en los esqueletos y conchas de muchos animales.

LAS TIERRAS ALCALINAS Y LOS PRIMEROS METALES DE TRANSICIÓN

Familia apegada a la tierra, y sus vecinos voladores

Las tierras alcalinas son los parientes tranquilos de los tumultuosos metales alcalinos. Así llamadas porque se aislaron por vez primera de sus óxidos térreos, las tierras alcalinas entran en la composición de las rocas corrientes. La razón de su relativa estabilidad es su estructura atómica. El radio de sus átomos es menor que el de los metales alcalinos, y sus dos electrones externos que determinan la reactividad química, están fuertemente sujetos.

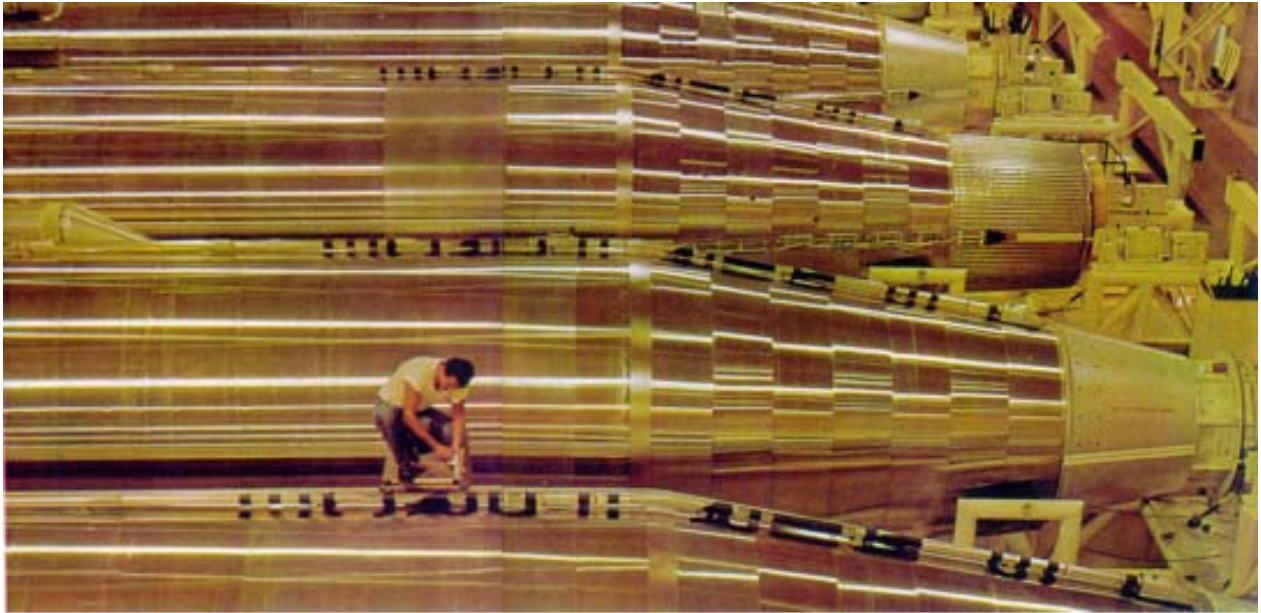
De los seis elementos de la familia, el magnesio es el más conocido. Su peso es sólo la mitad del aluminio, y forma aleaciones de aluminio y magnesio de gran ligereza que se usan mucho en la aviación. El berilio es un metal importante en aleaciones, y si bien no es particularmente duro, comunica dureza a otros elementos. Esta propiedad de endurecer prosigue en el grupo de metales de transición

representados más abajo, y en las páginas siguientes. El cromo, el vanadio y el tungsteno comunican tenacidad al acero.

Este primer “grupo de transición” da principio a la transición de los metales a los no metales. Sus miembros tienden a ser duros y quebradizos, con elevados puntos de fusión. Su carácter de transición se debe a una peculiaridad de su estructura electrónica. En el caso de elementos “típicos”, el número de electrones de la órbita externa aumenta al aumentar el número atómico. En los metales de transición, un aumento en número atómico también indica un aumento en electrones, pero no en la órbita exterior. Los metales de transición conservan a lo sumo dos electrones en ella mientras que la interior se “llena” de electrones.







Estos proyectiles Atlas en una planta en California, están siendo recubiertos en acero inoxidable laminado en frío, el cual, debido a su contenido de cromo y níquel, tiene una resistencia a la tracción de 14.000 kg/cm^2





SEGUNDOS METALES DE TRANSICIÓN

Tres familias de elementos que se mezclan bien

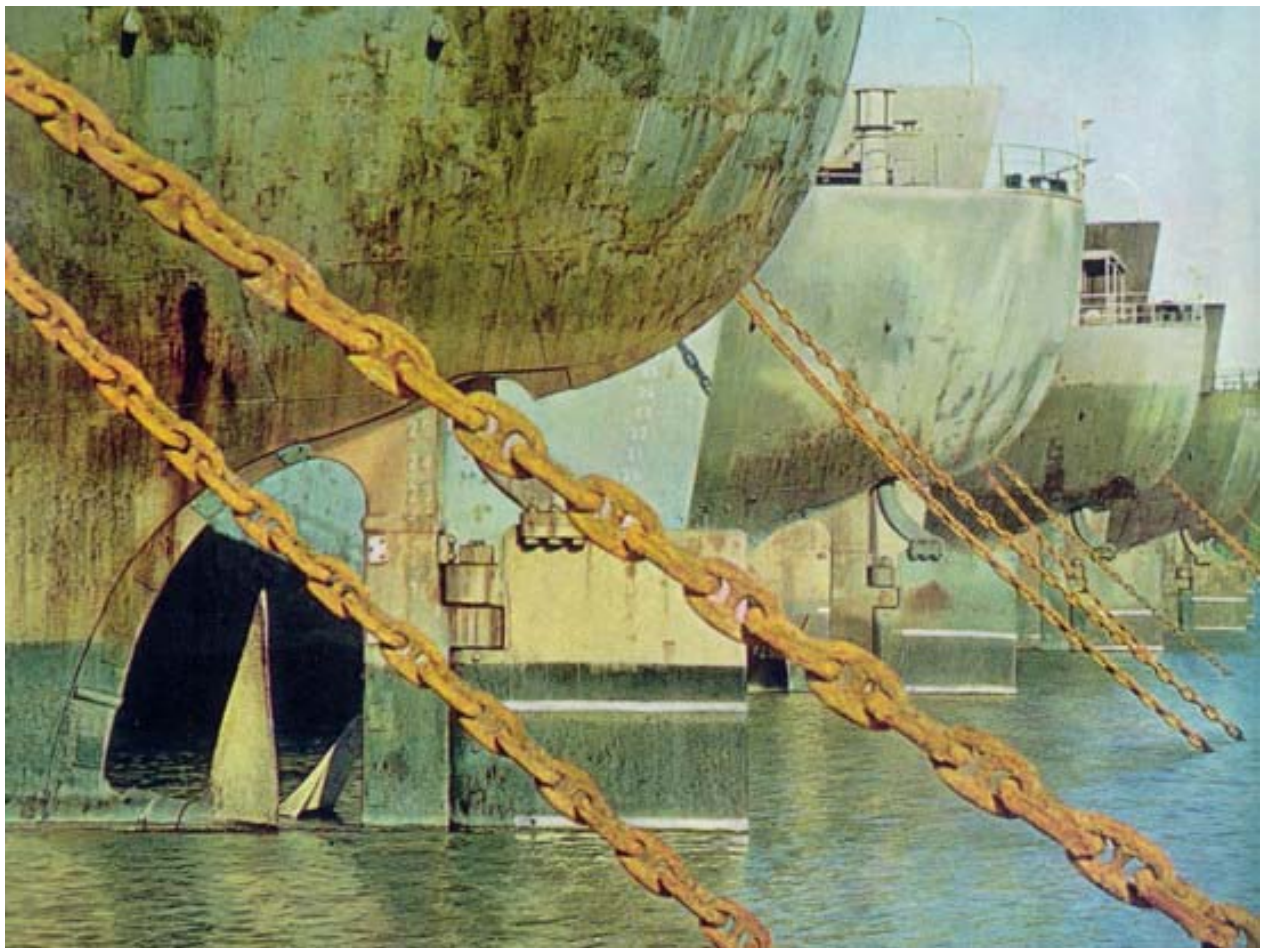
Los nueve metales de transición, lustrosos y de un gris blancuzco, son conocidos con el nombre de las tríadas, porque forman grupos de tres. Los de la primera tríada, hierro, cobalto y níquel, son fuertemente magnéticos. Se mezclan con facilidad, y una aleación de los tres, más aluminio y cobre, produce un metal llamado *alnico* que se utiliza en la fabricación de un imán, 12 veces más potente que su semejante en acero.

Las dos tríadas siguientes, llamadas de los platinos ligeros y pesados, también se mezclan bien. Las aleaciones de los seis, hay docenas de fórmulas, se utilizan en joyería e instrumentos de precisión.

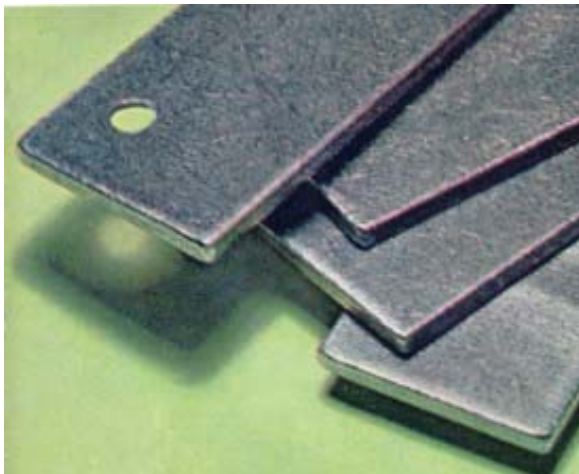
El hierro, el níquel y el cobalto se encuentran en forma pura en la naturaleza, y se encuentran juntos. Pero en tal estado pertenecen a otro mundo. Las masas donde se encuentran, que pesan varias toneladas, son meteoritos. El hombre primitivo probablemente utilizó este metal antes de que beneficiase el hierro.

Tanto el platino como el paladio se encuentran en forma de pepitas puras, que forman parte del patrimonio de la tierra. Pero estos metales se desgastan tan poco con el tiempo, que una importante fuente de suministro son los antiguos objetos de platino y paladio, fundidos.

Entre los elementos familiares, pocos son de estructuras electrónicas tan semejantes como el hierro, el cobalto y el níquel: tienen dos electrones en su órbita externa, y 14, 15 y 16 electrones respectivamente en su capa interior. Las dos tríadas del platino están relacionadas casi igual.



En el «cementerio de barcos» del Hudson, Nuevo York, se advierte la reacción del hierro con el oxígeno al formar óxido de hierro.



2
8
14
2

26
Fe
55.847

HIERRO, del latín, «ferrum»; utilizado ya por el hombre prehistórico. Es el cuarto elemento en orden de abundancia, y el metal más barato, y constituye el ingrediente básico de todos los aceros. Formando parte del compuesto hemoglobina, acarrea el oxígeno en la corriente sanguínea.



2
8
15
2

27
Co
58.933

COBALTO, de «kobold», o espíritu maligno (sus tóxicos minerales eran peligrosos); descubierto en 1735. Desde hace siglos las sales de cobalto sirven para colorear porcelanas, azulejos y esmaltes. Sus aleaciones se usan en motores de propulsión a chorro, y un isótopo contra el cáncer.



2
8
16
2

28
Ni
58.71

NIQUEL, del alemán «kupfer-nickel», o falso cobre, mineral rojizo que contiene níquel, pero no cobre; descubierto en 1751. Sus características de dureza y duración hacen que se utilice mucho para monedas —la moneda de los EE. UU. de cinco centavos es un 25 por ciento níquel y el resto cobre.



2
8
18
15
1

44
Ru
101.07

RUTENIO, de «Rutenia», Rusia en latín; descubierto en 1844. El ruthenio puro es demasiado duro y quebradizo para trabajarlo. Pero constituye un buen «endurecedor» cuando se le liga con platino. Utilizado en más del 15 % los metales son demasiado duros para poder ser trabajados.





TERCEROS METALES DE TRANSICIÓN

Dos clanes: uno rico, otro mundano

Tres de los metales de transición, cobre, plata y oro, son de propiedades casi opuestas a las de los metales alcalinos. En vez de ser ligeros, blandos y reactivos, son pesados, duros e inertes. Mientras que los metales alcalinos no se encuentran nunca libres en la naturaleza, estos elementos de transición aparecen como pepitas puras. Sin embargo, ambos grupos tienen un solo electrón en la órbita externa de sus átomos, y deberían presentar propiedades semejantes.

La razón de sus diferencias se encuentra en la penúltima órbita electrónica. La mayor parte de los metales alcalinos tienen ocho electrones en dicha capa. Y ocho es un número mágico en los círculos electrónicos. Es la disposición más estable que puede tener la órbita externa de un átomo. Por esto los metales alcalinos reaccionan violentamente para librarse de su incómodo electrón externo y alcanzar una especie de nirvana atómico. Pero el cobre, el oro y la plata tienen, no 8, sino 18 electrones en su penúltima capa. Incluso cuando pierden su electrón externo están

lejos de la estabilidad de los ocho. Por esto no reaccionan, lo que explica su presencia en la naturaleza en forma pura.

Mientras una aureola seductora ha rodeado siempre al oro, la plata y el cobre por su uso en monedas y joyería, la segunda familia, cinc, cadmio y mercurio, es más prosaica. Las aleaciones de cadmio son corrientes en los rodamientos de gran velocidad. El cinc está en el cubo doméstico “galvanizado”. El mercurio es un metal líquido y se solidifica a 39°C.



UN ANTIGUO EMBLEMA DE ORO. Este ciervo de oro del siglo V, adornaba el escudo de hierro de un guerrero nómada de los que lucharon en las estepas del Asia Central durante los siete siglos anteriores a Cristo. El oro es el elemento 16 en orden de rareza; la producción de oro desde 1493 hasta la fecha, de unos 70.875.000.000 de dólares, fundido ocuparía un cubo de 15 metros de lado. Es un metal duradero; hoy día existe oro que sin duda formó parte de algún tesoro egipcio.



2
8
18
1

29
Cu
63.54

COBRE, de «cuprum», derivado del nombre antiguo de Chipre, famoso por sus minas de oro; conocido por el hombre primitivo. Este metal y el oro, son los únicos coloreados. Se alea con el oro y la plata en joyería; al mezclarlo con el cinc forma latón, y junto con el estaño, bronce.



2
8
18
2

30
Zn
65.37

CINC, probablemente de «zin», alemán para estaño; descubierto por el alquimista Paracelso en el siglo xvi, si bien la aleación cinc-cobre era conocida de los antiguos. Aunque no tiene color, presenta un reflejo azulado. Es excelente para recubrimientos y para forrar pilas eléctricas.



2
8
18
1

47
Ag
107.87

PLATA, del bajo latín «plata»; símbolo Ag, del latín «argentum»; prehistórico; es el mejor conductor del calor y de la electricidad. Sus sales son fundamentales en fotografía; cuando se expone a la luz el bromuro de plata, experimenta un cambio químico que el revelador hace visible.



2
8
18
2

48
Cd
112.40

CADMIO, de «kadmia», o tierra; descubierto en 1817. El cadmio se presenta en la naturaleza con el cinc. Sus barras absorben neutrones y sirven para retardar reacciones atómicas en cadena; también se usa en pilas de níquel y cadmio. Su brillante sulfuro es el amarillo de cadmio.



FAMILIAS DEL BORO Y DEL CARBONO

La estrecha frontera entre los metales y los no metales

Las familias del boro y del carbono forman un grupo abigarrado: negro, pardo, blanco, blando, duro, metálico y no metálico. Ningún otro grupo de elementos es tan variado. Probablemente es así porque se encuentran cerca del punto medio de la tabla periódica; con tres o cuatro electrones en su capa exterior, se encuentran entre los súper metales alcalinos y los súper no-metales, que son los halógenos.

Desde esta tierra de nadie sale el hombre mismo, y en realidad, toda la vida. Como el carbono puede a veces comportarse como metal y a veces como no metal, le es posible combinarse en una fantástica diversidad de maneras. Existen más de dos millones de compuestos de carbono, una vez y media el número formado por todos los demás elementos. En algún lugar entre esta hueste de sustancias de carbono, y aún por identificar, se encuentran las moléculas vivientes que han proliferado produciendo todas las formas de vida. Los científicos que buscan algún otro elemento que pueda también servir como base de la vida, encuentran sólo uno, el silicio, pariente cercano del carbono.



DE LA NEGRURA, BELLEZA. Los diamantes, fundamentalmente no son diferentes del grafito de un lápiz, ambos son carbono. Varían solamente por la manera en que sus átomos están dispuestos en cristales. El famoso «Ojo del ídolo», fue desenterrado hacia 1600, y en su accidentada carrera ha llegado a valer US\$ 675.000.



2
3
5
B
10.811

BORO, de bórax; descubierto en 1808. El boro, que es un no metal, es principalmente conocido en el bórax (borato sódico) y en el ácido bórico — el único ácido que es bueno para los ojos. La industria utiliza cada año alrededor de un millón de toneladas de boro. Se emplea en agricultura.



2
8
3
13
Al
26.982

ALUMINIO, de «alumen», o alumbre; descubierto en 1827; es el metal más abundante, y el tercer elemento en orden de abundancia; sus usos van desde los tubos para pasta dentífrica, hasta alas de aviones. Las primeras muestras costaron \$1.200 kilo; actualmente vale 33 centavos.





FAMILIAS DEL NITRÓGENO Y DEL OXIGENO

Dos grupos de personalidades polifacéticas

Salvo por el nitrógeno, los elementos sólidos y gaseosos de estas, existen en la naturaleza en más de una forma. Estas diversas formas, llamadas alotrópicas, varían en estructura, color y comportamiento químico, según el número de átomos de la molécula del gas, o de la forma en que los átomos están dispuestos en el sólido. El ejemplo más conocido es el del oxígeno, O_2 , que existe también como ozono, O_3 .

Los cinco elementos de la familia del nitrógeno tienen cinco electrones en su órbita exterior. No obstante, desde el más ligero (nitrógeno) al más pesado (bismuto), sus propiedades pasan de no metálicas a metálicas. En los miembros más pesados los electrones externos están mis lejos del núcleo, y por lo tanto se pierden con más facilidad. Los cinco elementos de la familia del oxígeno tienen seis electrones en la órbita externa. Desde el más ligero (oxígeno), al más pesado (polonio) tienden a un comportamiento metálico.





2
8
16
32
64

33
As
74.922

ARSENICO, de «arsenikos», o macho (los griegos creían que los metales diferían de sexo); descubierta hacia 1250. Mejor clasificada como no metal con algunas características metálicas, es famosa como veneno; pero algunos de sus compuestos son medicinales. Al calentarlo se «sublima».



2
8
16
32
64

51
Sb
121.75

ANTIMONIO, de «antimonios», «apuesto a la soledad» (generalmente se encuentra mezclado con otros metales); símbolo Sb, de «stibium», o marca (fue utilizado como lápiz para cejas); descubierta hacia 1450. Se mezcla con plomo en las baterías, y entra en los metales para tipos.



2
8
16
32
64

83
Bi
208.98

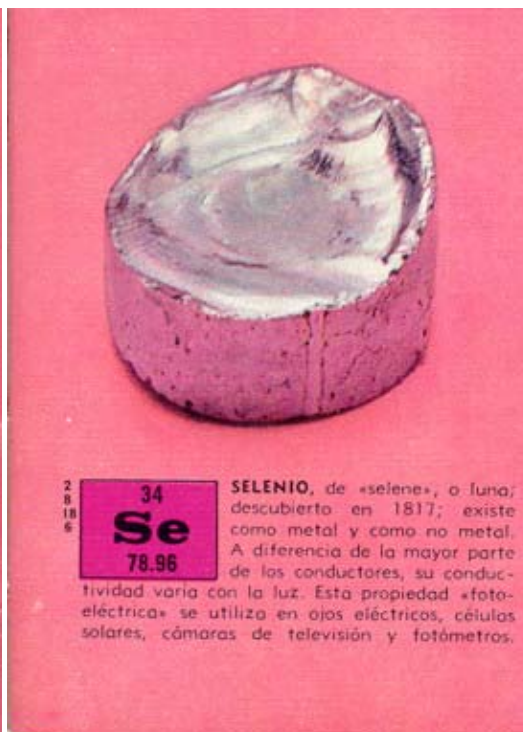
BISMUTO, del alemán «wismuth», o masa blanca; descrito en 1450. Es el miembro más metálico de su familia y funde a 271° C pero forma aleaciones que funden a 47° C, las cuales se utilizan para fabricar fusibles, soldaduras y sistemas automáticos de extinción de fuegos.



2
4
8
16
32
64

8
O
15.999

OXIGENO, de «oxys» y gen, o que forma ácidos; descubierta en 1774; es el elemento más abundante, y constituye algo así como la mitad de todo lo que existe en la tierra, el 21 % de la atmósfera y dos tercios del cuerpo humano. Se absorbe al respirar, y las plantas lo reponen.





LA POTENCIA COLOSAL DEL NITRÓGENO. En 1958, en Seymour Norrows, Columbia Británica, se utilizó el potencial explosivo del nitrógeno para terminar con un peligro para la navegación, un pico montañoso submarino. En esta explosión, la mayor no nuclear de la Historia, estallaron 1.375 toneladas de nitratos.

EL HIDROGENO Y LOS HALÓGENOS

Un lobo solitario, y una familia de agresores

El hidrógeno es único entre todos los elementos. Su núcleo consiste en un solo protón, alrededor del cual gira un solitario electrón. Se le agrupa a veces con los metales alcalinos, pero existe igual razón para situarlo entre los halógenos; lo mismo que el hidrógeno, cada halógeno precede a un gas inerte en la tabla periódica. Es un gas activo, “diatómico”, es decir, las moléculas de hidrógeno consisten en dos átomos unidos. A elevadas temperaturas los núcleos de dos átomos se “unen por fusión”, desprendiendo inmensas cantidades de energía (como la bomba-H).

El grupo de los elementos llamados halógenos son a su manera tan activos como el hidrógeno. Todos ellos tienen siete electrones en su órbita externa: por esta razón se apoderan fácilmente de un electrón de otros átomos, formando “iones” con carga eléctrica.

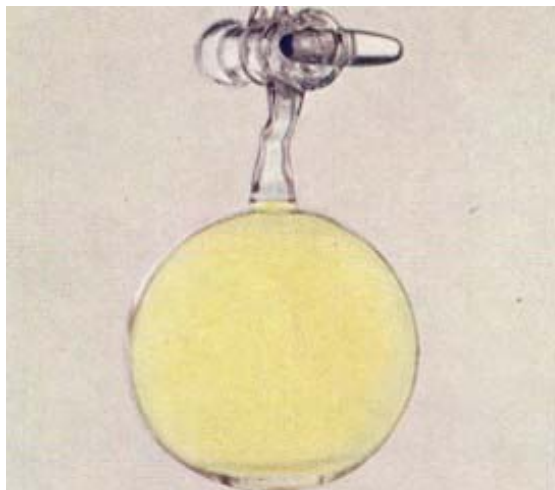


CLORACIÓN DEL AGUA. Un nadador australiano da una vuelta mientras se entrena en una piscina cubierta. Las piscinas, así como la mayor parte de los suministros importantes de agua al público, se desinfectan añadiendo una parte de cloro por cada millón de partes de agua. El cloro no mata las bacterias sino los átomos de oxígeno del H_2O , liberados por reacción química del cloro con el agua. Si bien el oxígeno es necesario para mantener la vida, un exceso es mortal.

En realidad, el nombre halógeno procede de la palabra griega *hais*, sal, y el sufijo *gen* “que produce” o “que forma”. Estos elementos son claramente no metálicos: sus electrones más externos están retenidos con tanta fuerza que rara vez establecen reacciones. Los halógenos se encuentran en los tres estados físicos

familiares. El flúor y el cloro son gases; el bromo es el único elemento, además del mercurio, que es líquido a la temperatura ambiente; el yodo y el astato son sólidos. Los halógenos son venenosos, corrosivos y poderosos bactericidas. La tintura de yodo es un buen antiséptico; el fluoruro de sodio reduce la caries dental ocasionada por algunas bacterias.

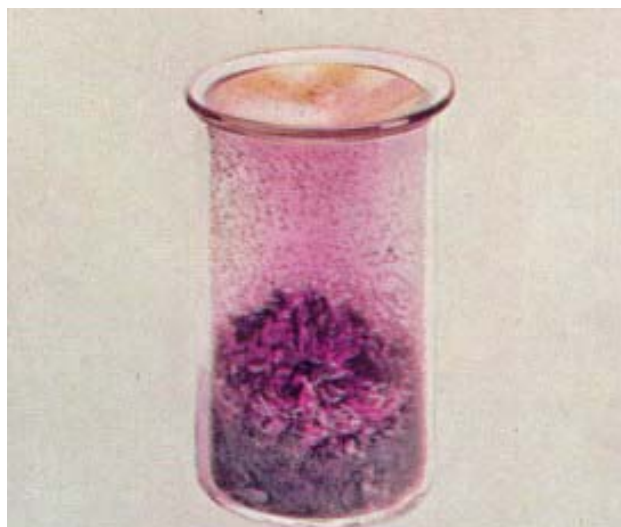


2
8
18
717
Cl
35.453

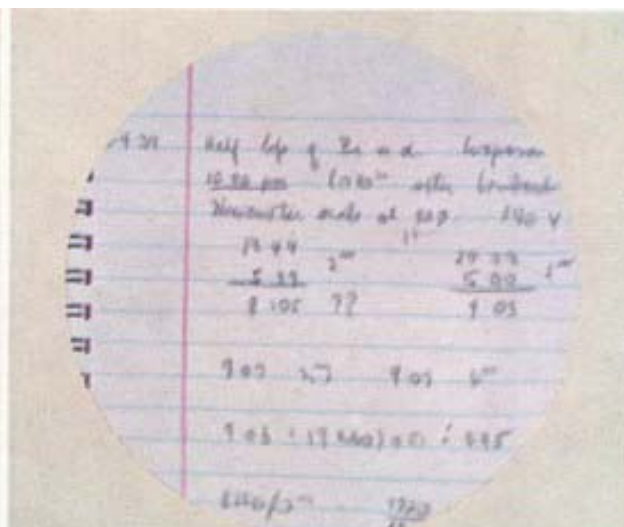
CLORO, de «chloros», o amarillo verdoso; descubierto en 1774. Se combina con casi tantos elementos como el flúor; es menos corrosivo, pero lo bastante enérgico para ser utilizado como lejía blanqueadora, desinfectante y gas asfixiante. El cloro puro se extrae de la sal común (NaCl).

2
8
18
735
Br
79.909

BROMO, de «bromos», hedor; descubierto en 1826; es un líquido humeante, rojo y cáustico, de olor repugnante. El bromo es un desinfectante eficaz. Entre sus compuestos se encuentran los bromuros, que se utilizan como sedantes nerviosos y en la gasolina como antidetonantes.

2
8
18
753
I
126.90

YODO, de «ioeides», violeta; descubierto en 1811; es un sólido negro azulado que al ser calentado se convierte en un vapor violáceo. Se preparaba antes a partir de las algas marinas, y actualmente de las salmueras de los pozos petrolíferos. La carencia de yodo causa perturbaciones.

2
8
18
785
At
(210)

ASTATO, de «astatos», inestable; descubierto en 1940. El astato, que se obtiene bombardeando átomos de bismuto con núcleos de helio, es radiactivo y tiene un período de semidesintegración máxima de 8,3 horas. Su detección quedó registrada por el físico americano D. R. Carson.

LOS GASES INERTES

Una familia que vive brillantemente

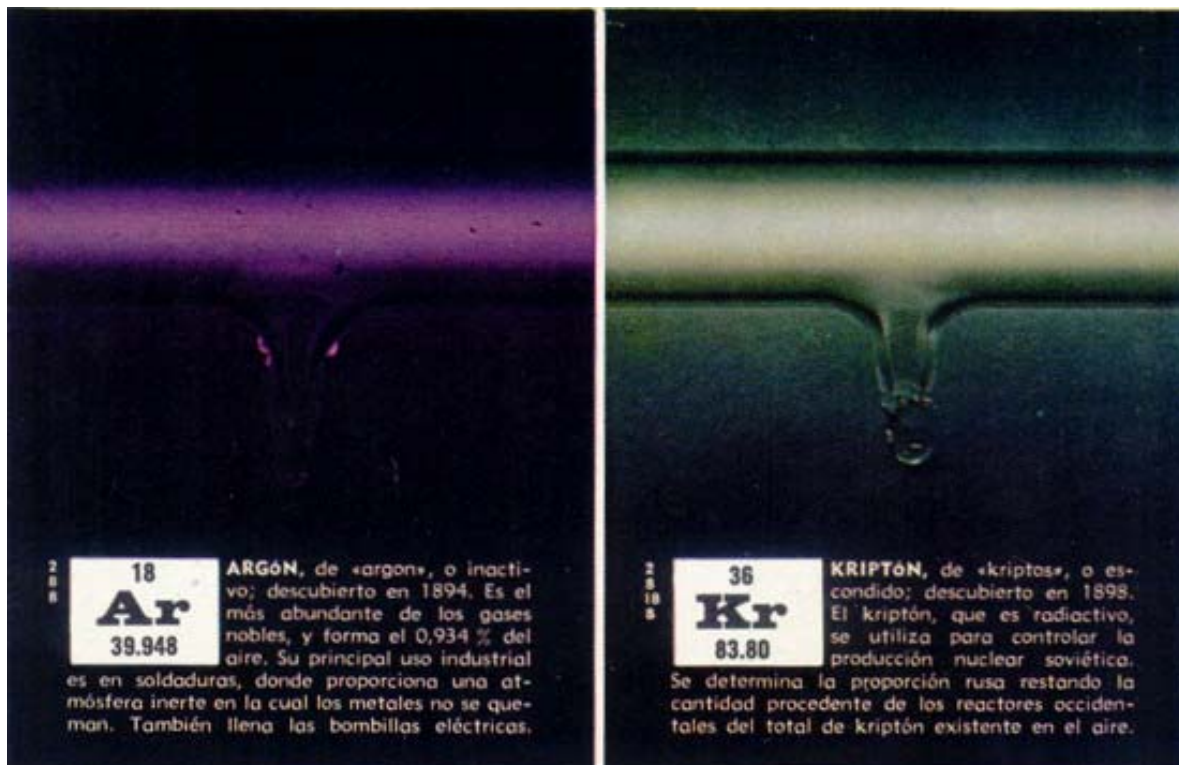
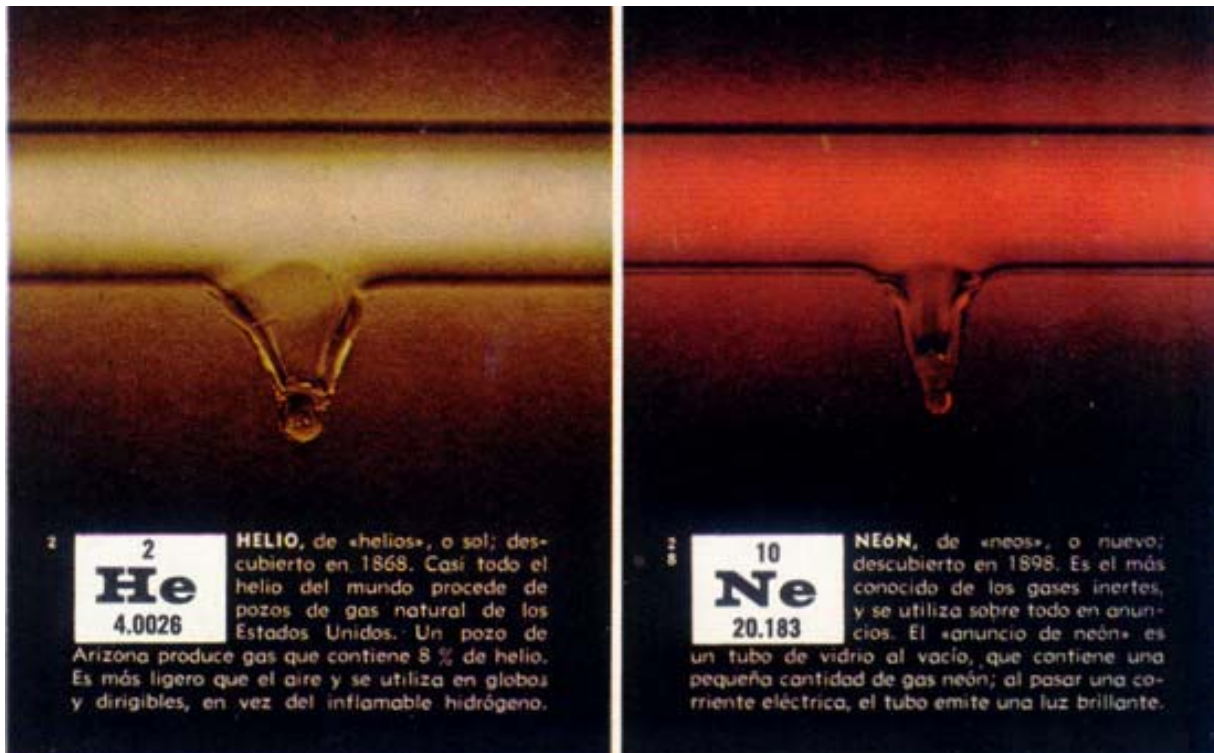
Los gases conocidos con los nombres de inertes, nobles y raros, apenas forman compuestos con otros elementos. Y, de hecho, los átomos de un mismo gas inerte no se unen entre sí: todos los demás gases existen en forma de moléculas de dos átomos, por ejemplo O_2 , H_2 y Cl_2 . Estos elementos inertes son de los más raros conocidos; el neón, el criptón y el xenón son séptimo, quinto, y cuarto en orden de escasez, entre los elementos naturales. Si bien el helio puede ser extraído del gas natural, y el radón se obtiene como producto de la desintegración del radio, los demás solamente se obtienen del aire. Constituyen menos del 1 % de la atmósfera, y se obtienen comercialmente por delicado fraccionamiento del aire líquido.

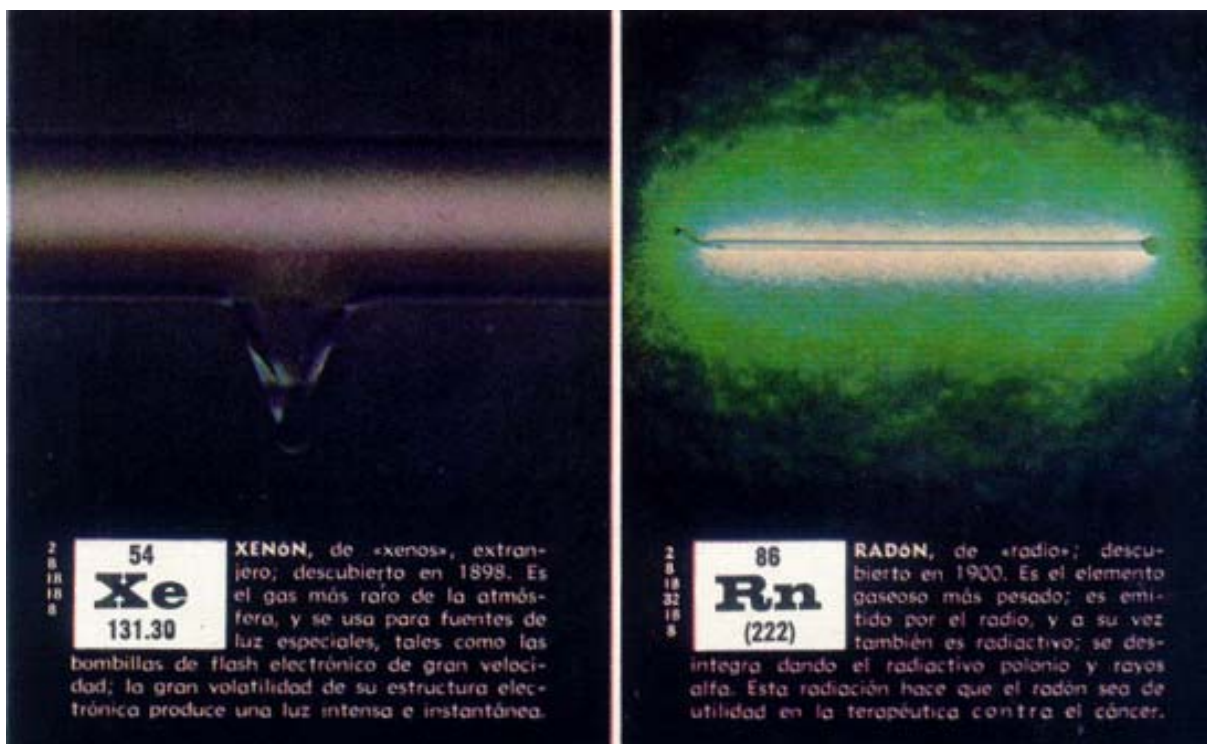
La escasa sociabilidad y extrema estabilidad de los gases inertes se debe a su estructura electrónica. Como su órbita externa está completamente llena de electrones, estos átomos casi no tienen incentivo para perder o ganar electrones en presencia de otros átomos. Hace sólo poco tiempo, como gran éxito de la química moderna, se ha conseguido persuadir a algunos de estos perezosos elementos para que se combinaran con el gas flúor.

Todos los gases inertes de estas páginas, excepto el radón, fueron sellados en tubos de vidrio y fotografiados mientras se hacía pasar una carga eléctrica a través del tubo, la cual hacía que los gases resplandeciesen con sus colores característicos. El radón radiactivo fue colocado frente a un fondo de sulfuro de cinc, el cual resplandeció con luz amarillo-verdosa.



ESPLENDOR DE RAROS VAPORES. La iluminación multicolor que da a Tokio su famoso resplandor nocturno, se debe a una mezcla de neón y gases semejantes. En la parte superior, un anuncio propaga una máquina de coser. En la inferior se anuncian chocolates con leche y caramelos.





LAS TIERRAS RARAS

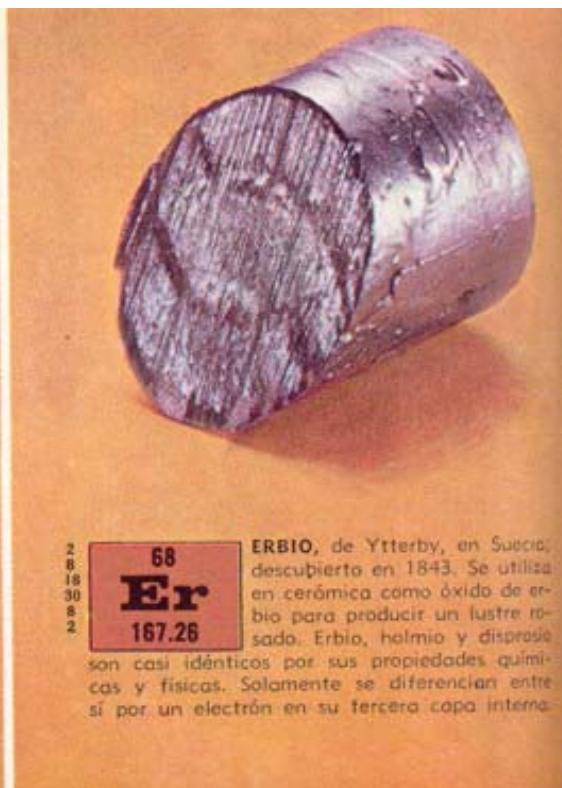
Un apodo, y una afición a estar juntos

Los elementos generalmente conocidos como “tierras raras”, ni son raras ni son tierras. Son metales blandos y maleables, y no escasean. El cerio, que es el más abundante, existe en mayor cantidad que el estaño o el plomo, y el tulio, que es el más escaso, es sólo algo más raro que el yodo. La confusión se debe a que al principio se tomaron los óxidos por los elementos mismos.

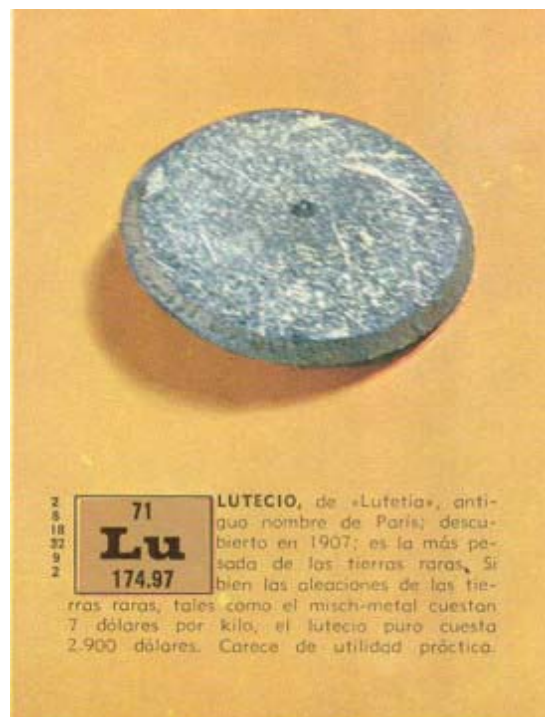
Todas las 15 tierras raras tienen dos electrones externos y ocho o nueve en la segunda capa interna. Difieren por los electrones de la tercera capa interna. Pero en los átomos las diferencias de tercera capa son realmente muy pequeñas. No es pues sorprendente que las tierras raras sean una familia muy unida. Un mineral que contiene una de ellas contiene todas las demás; los elementos separados no pudieron ser obtenidos en cantidades comerciales hasta finales de 1950. No obstante, la familia ha sido utilizada industrialmente desde principios del siglo actual (XX), en forma de mezclas. Se utiliza medio millón de kilos por año en una aleación llamada “misch metal”, metal mixto. Combinado con hierro, el misch metal produce las piedras para encendedores, pero su uso principal es en la fabricación de hierro y

de acero, donde absorbe impurezas, mejora la textura y facilita el trabajo. Una mezcla de tierras raras combinada con carbono produce las luces de arco. Y muchos compuestos de tierras raras entran en el cristal de gran calidad, haciéndolo completamente incoloro, o bien comunicando intensas coloraciones.

 2 8 18 22 8 2 60 Nd 144.24 NEODIMIO, de «neos didymos», o nuevo gemelo; descubierta en 1885. En forma pura produce el único cristal de color de púrpura brillante. En bruto se le utiliza para decolorar el cristal, y para fabricar uno que transmite los rayos bronceados del sol, pero no los infrarrojos caloríficos.	 2 8 18 23 8 2 61 Pm (147) PROMETIO, de «Prometeo»; descubierta en 1947; es la única tierra rara que no ha sido nunca hallada en la naturaleza. El prometio, que es radiactivo y se obtiene en reactores nucleares, utilizada en una «batería atómica» proporciona energía a instrumentos de proyectiles dirigidos.
 2 8 18 24 8 2 62 Sm 150.35 SAMARIO, del mineral samarsquita, así llamado en honor de un funcionario de minas ruso, Coronel V. E. Samarsky; descubierta en 1879. Cristales de cloruro de calcio con samario se han usado en los lasers —ingenios que producen rayos de luz para quemar metales o rebotar en la luna.	 2 8 18 28 8 2 66 Dy 162.50 DISPROSIO, de «dysprositos», o difícil de alcanzar; descubierta en 1886. El principal uso práctico del disprosio es en los reactores nucleares, donde sirve de «veneno» nuclear —es decir, material devorador de neutrones para evitar que la reacción atómica en cadena gane la mano.



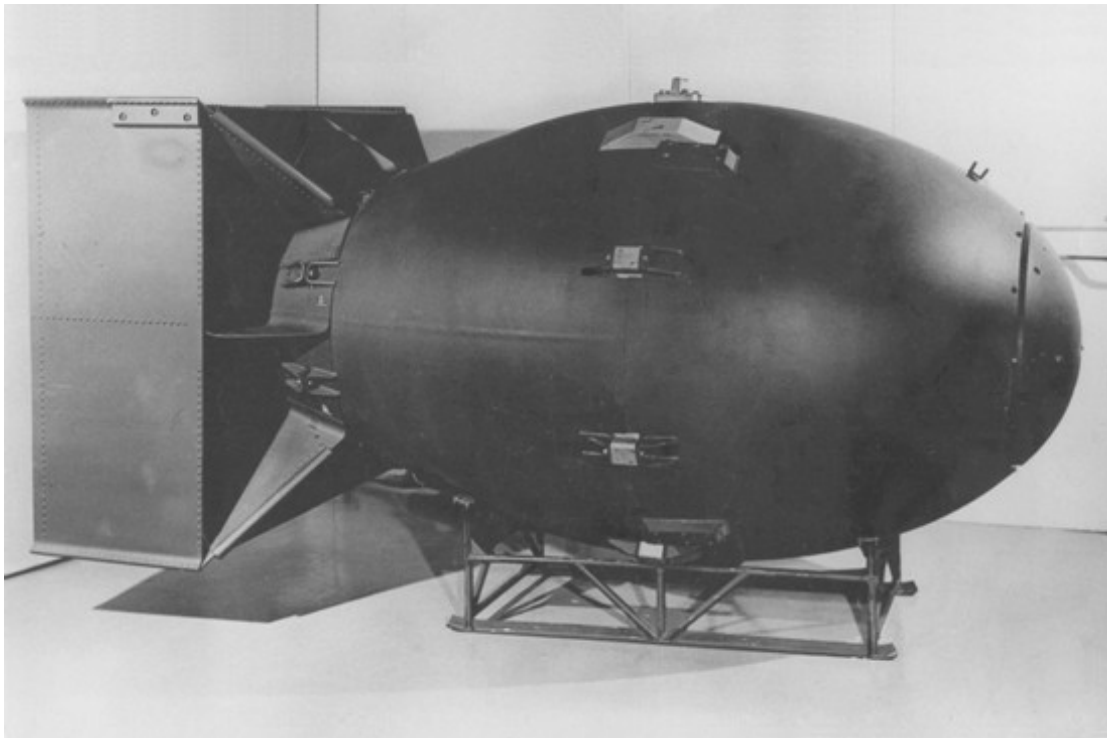




LOS ACTÍNIDOS

Elementos que se desintegran y finalmente desaparecen

Los metales actínidos, que comprenden los átomos más pesados de entre todos los elementos, terminan la tabla periódica. Llamados segunda serie de tierras raras, todos ellos tienen estructuras electrónicas y propiedades semejantes. Son todos radiactivos; su desintegración puede durar instantes o millones de años. Todos los que tienen números atómicos por encima del 92, uranio, son ahora fabricados por el hombre en rompe-átomos. Probablemente existieron un día en la naturaleza, pero han desaparecido. En 1940, al bombardear átomos de uranio con neutrones, se vio que el uranio los absorbía y se transformaba en otros elementos, llamados “transuranianos” o “artificiales”. Los 11 elementos artificiales completan la serie de los actínidos, pero quizás se encuentren otros que formen una tercera serie. Aquí se representan 10 de los actínidos; los 5 últimos no existen en cantidades visibles.



PRELUDIO A UN HOLOCAUSTO. Una de las primeras bombas atómicas que se hizo detonar, la «Hombre Gordo», se basaba en la escisión del plutonio. De un metro y medio de ancho, y unos tres y medio de largo, cayó sobre Nagasaki con una potencia de 20.000 toneladas de TNT. Esta fotografía es una de las dos únicas que han sido publicadas.



2
8
18
32
18
9
2

89
Ac
(227)

ACTINIO, de «aktinos», o rayo; descubierto en 1899. Segundo en rareza entre los elementos. Se encuentra en la pechblenda. De un período de semidesintegración de 22 años, el actinio da francio y helio. El óxido de actinio que mostramos, está encerrado en una ampolla de cuarzo.



2
8
18
32
18
10
2

90
Th
232.04

TORIO, de Thor, dios de la guerra escandinava; descubierto en 1828. El torio puede ser utilizado en lugar del escaso uranio como combustible para reactores. Abunda casi como el plomo, y la cantidad que hay en la tierra contiene más energía que todo el uranio, petróleo y carbón juntos.



2
8
18
32
20
9
2

91
Pa
(231)

PROTACTINIO, de «protos», o primero; es el progenitor del actinio, que se forma en su desintegración radiactiva; descubierto en 1917. Es el tercer elemento en orden de rareza, y puede ser preparado con las técnicas químicas modernas costando unos 15.000 dólares por gramo.

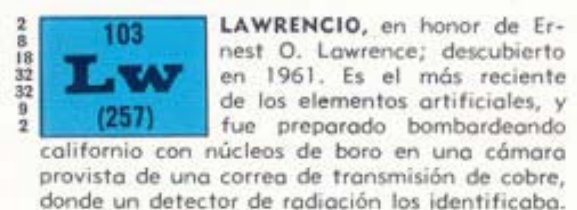
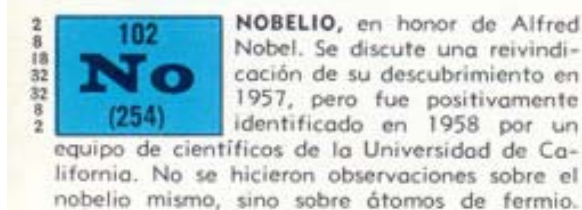
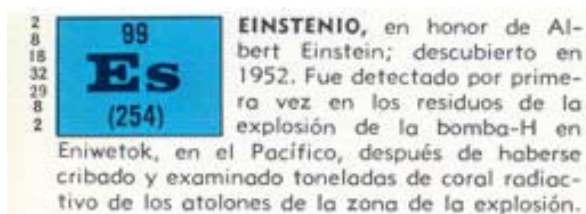


2
8
18
32
21
9
2

92
U
238.03

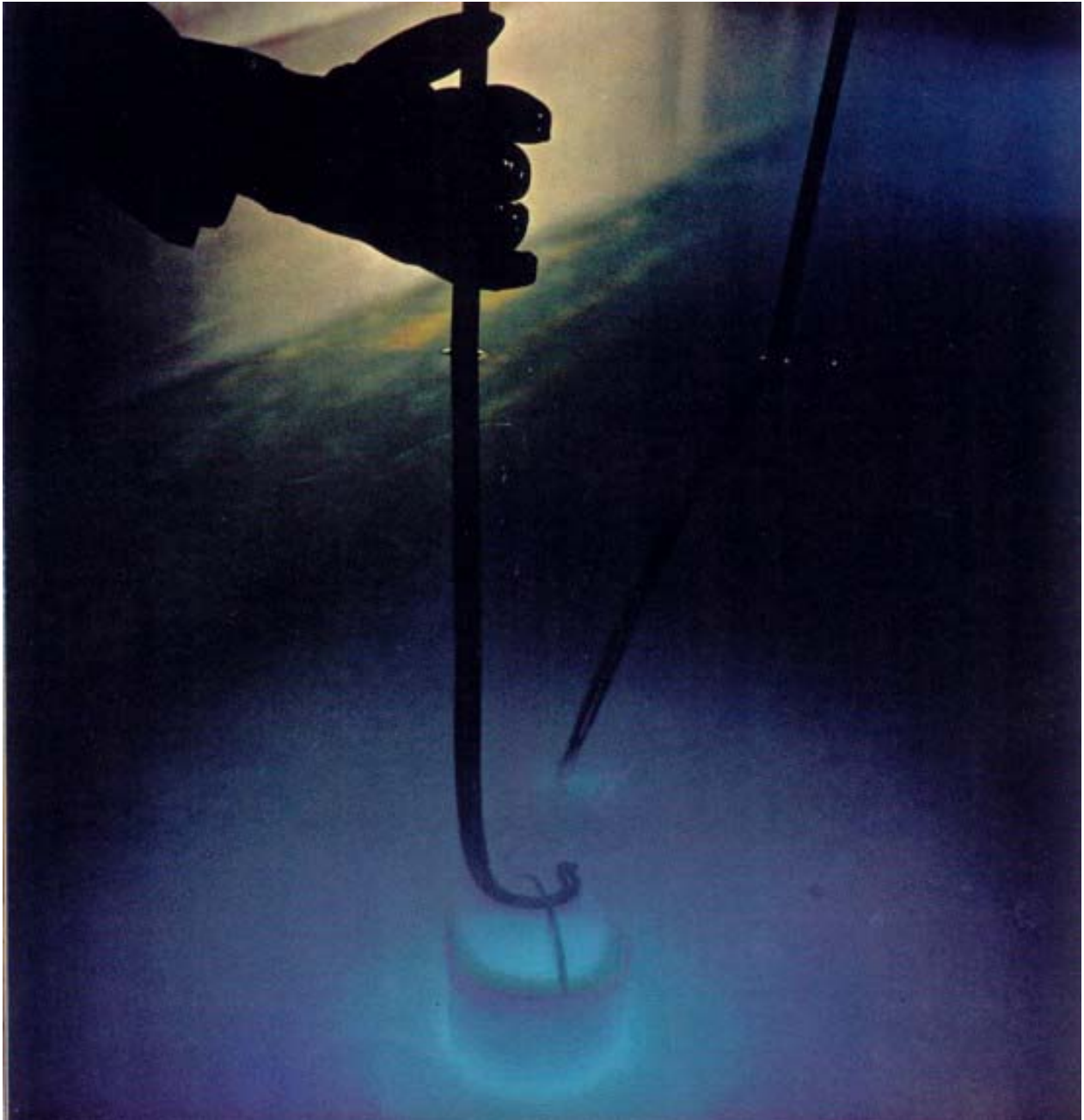
URANIO, así llamado por el planeta Urano; descubierto en 1789; es el átomo más pesado de entre los elementos naturales. Su forma más común tiene un período de semidesintegración de 4.500 millones de años. El uranio de arriba tiene forma de bala para insertarlo en un reactor nuclear.





Capítulo 7

El núcleo: corazón enigmático de la materia



BENEVOLENCIA EN EL AZUL. El resplandor azul de la fotografía emana del isótopo radiactivo cobalto 60, al ser sacado del agua, la cual disipa el color engendrado por su radiación. Es un producto del bombardeo nuclear, y sus rayos se utilizan para matar las células cancerosas.

Hacia fines de la primera Guerra Mundial, la ciencia lanzó su ataque en gran escala contra el núcleo, el reducto más recóndito del átomo. Que se realizaría tal intento, había sido cada vez más inevitable. Muchos problemas sobre el átomo clamaban por soluciones, incluso mientras la comunidad científica se felicitaba por el buen trabajo realizado al desarrollar el nuevo y apasionante concepto del átomo propuesto por Niels Bohr.

Bohr, según hemos visto en el capítulo 6, había representado al átomo como un minúsculo sistema solar en el cual los electrones giraban alrededor de un núcleo. Pero si bien este modelo explicaba muchos fenómenos atómicos, quedaban muchos problemas. Por ejemplo, ¿cómo se explica la transmutación de ciertos elementos en otros, por desintegración radiactiva? ¿Qué es lo que mantenía juntas las partículas que constituyen el núcleo? ¿Qué les impedía que se separasen violentamente al impulso de sus cargas positivas y que el átomo y toda la materia estallase y se hiciese pedazos?

Ernest Rutherford y algunos de sus contemporáneos intentaron responder a éstas y otras preguntas con nuevas exploraciones en profundidad. Estudios anteriores de Rutherford ya habían indicado que el núcleo era pequeñísimo. Si, por ejemplo, se imaginaba al átomo del tamaño de una casa, entonces el núcleo sería solamente del tamaño de una cabeza de alfiler. Pero todo el peso del átomo debe estar concentrado en él, mientras que los electrones pesan relativamente poco. Un núcleo imaginario del tamaño de una cabeza de alfiler debería pesar cinco millones de kilos.

Para su ataque inicial al corazón del núcleo, Rutherford escogió como arma las bien probadas partículas alfa de gran velocidad, que ya le habían revelado la existencia misma del núcleo. A un extremo de un largo tubo dispuso una fuente radiactiva de estas partículas; al otro extremo puso una pantalla, un pequeño disco de vidrio recubierto de cristales de sulfuro de cinc, que brillan al impacto de las partículas alfa. Al inyectar diversos gases en el tubo, encontró que cuando daba entrada a nitrógeno gaseoso la pantalla aparecía punteada de aquellas significativas ráfagas de luz que anuncian la llegada de partículas cargadas, partículas de mayor alcance que las partículas alfa.

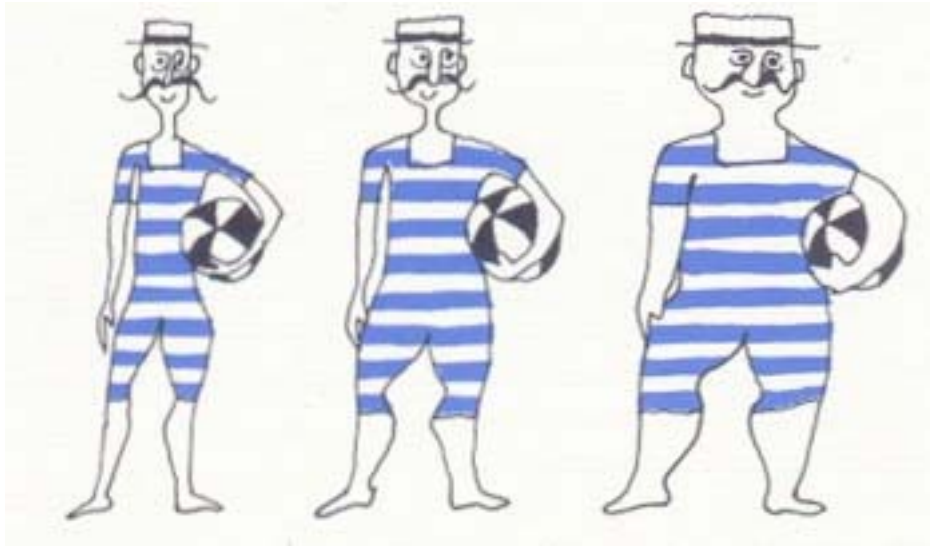
Rutherford dedujo que los átomos de nitrógeno se habían desintegrado y que lo que había llegado a la pantalla eran fragmentos de la catástrofe. Llegó a la conclusión que había quebrantado el núcleo del átomo de nitrógeno y que los pedazos que habían saltado eran probablemente los núcleos de los átomos de hidrógeno llamados protones, que existen en todos los átomos. En pocas palabras; había realizado el antiguo sueño de los alquimistas, la transmutación artificial de un elemento en otro.

Cuando en 1919 se publicó el trabajo de Rutherford sobre este asunto, la mayor parte de los físicos tenía que fiarse de su palabra en la interpretación de la plétora de hechos desconocidos que podían suceder en el núcleo del átomo. Los investigadores reclamaban más evidencia gráfica que las invisibles partículas se estaban realmente destrozando unas a otras, Tal evidencia podría ser obtenida si dispusiesen de alguna especie de aparato, de algún artefacto donde se pudiese ver actuar a las partículas.

La historia de la física moderna es, en gran parte, una historia de aparatos. Los aceleradores gigantescos actuales, que son ellos mismos verdaderas instituciones, tienen como antecedentes los artilugios de laboratorio del siglo XIX, del tamaño de una caja de zapatos y en madera, vidrio o latón pulido. En esta línea evolutiva se encontraba el aparato que proporcionaba el escenario para los destrozos nucleares.

Una curiosa hilera de perlas

Se trataba de la cámara de niebla, un recipiente de vidrio del tamaño de un vaso de medio litro, que había sido inventado en 1911 por un físico escocés, C. T. R. Wilson. Le había venido la idea al admirar formaciones de nubes en las montañas; masas de aire húmedo que subían por las laderas, y al alcanzar el tenue y frío aire de las grandes alturas, se transformaban de repente en masas de nubes blancas y algodonasas. En su casa, Wilson trató de reproducir el fenómeno reduciendo súbitamente la presión de aire húmedo encerrado en un pequeño recipiente.



CUESTIÓN DE PESO. Lo mismo que los tres bigotudos, los isótopos atómicos son formas de un mismo elemento que difieren sólo por su peso. En los isótopos todo es igual, salvo el número de neutrones de sus núcleos. Todos ellos tienen el mismo número de protones y de electrones, y propiedades químicas prácticamente idénticas: así, por ejemplo, todos los isótopos del hidrógeno reaccionan con el oxígeno formando agua. Las estructuras de los isótopos del hidrógeno se muestran más adelante.

Y, en efecto, aparecieron pequeñas nubes. Cuando ionizó el aire, rompiendo los átomos en partículas con carga eléctrica, la nube se condensó en gotitas alrededor de cada partícula. Se podía realmente ver una pequeña línea recta de gotitas, como una hilera de perlas, que señalaba la trayectoria de cada partícula que pasaba.

La cámara de niebla hace, por lo tanto, posible presenciar la colisión de partículas cargadas. Huellas parecidas a rastros de humo de pequeños aviones surgían de la fuente radiactiva, y luego se dividían en ramilletes de otras trazas visibles al chocar entre sí las invisibles partículas. La dificultad en el uso de la mayor parte de las cámaras de niebla reside en que las huellas de las colisiones solamente pueden ser vistas durante una fracción de segundo, al reducir la presión del aire.

No fue sino en 1925, seis años después del experimento de quebrantamiento de núcleos de Rutherford, que el físico británico P. M. S. Blackett obtuvo evidencia fotográfica de lo que ocurría en una cámara de niebla. Al tomar 23.000 fotografías, solamente captó ocho veces al núcleo en el momento de romperse. Pero la evidencia resultó tan convincente como podría ser una foto flash de unos ladrones en la escena del crimen.

Lo que Blackett vio fue el conocido ramillete en forma de abanico formado por las partículas alfa al entrar en la cámara, la mayor parte de las cuales terminaban abruptamente después de haber atravesado su característica corta trayectoria. Pero la huella de una de las partículas se bifurcaba de repente, formando una gruesa y densa huella que terminaba muy pronto, y otra huella delgada y larga, que seguía hasta el extremo de la cámara. El estudio convenció a Blackett que esta larga trayectoria había sido producida por un protón, una sola partícula de carga positiva que había salido del núcleo de un átomo. La huella corta y gruesa pertenecía al resto del núcleo, que rebotaba bajo el impacto de la partícula alfa.

Incluso hoy en día un descendiente de la cámara de niebla desempeña un papel en la investigación nuclear. Una tarde de 1951, Donald Glaser, joven físico de la Universidad de Michigan, estaba meditando ante un vaso de cerveza cuando se le ocurrió que quizás las burbujas que ascendían en éste podían estar relacionadas con las gotitas que se formaban en las cámaras de niebla. Puso un líquido a presión (éter) y luego, periódicamente, redujo la presión. Con exaltada satisfacción vio las huellas familiares de las partículas nucleares dibujadas en burbujas, en su curso a través del líquido. En efecto, Glaser había creado lo inverso de la cámara de niebla, burbujas de gas en un líquido, en vez de gotitas líquidas en un gas. La gran ventaja de utilizar líquidos es que hay más átomos en la trayectoria de las partículas. Ahora los científicos sumergen estas «cámaras de burbujas» en poderosos campos magnéticos que hacen que las partículas cargadas se curven de forma determinada, según su carga, masa y velocidad.

La cámara de burbujas sirvió finalmente para resolver el problema de los pesos atómicos, los cuales, a diferencia de los números atómicos, son rara vez números enteros. Como se creía que los núcleos de todos los elementos consistían en protones, cabía esperar que todos los pesos atómicos fuesen múltiplos del peso de un protón y, por ello, números enteros.

La solución había sido vislumbrada por J. J. Thomson, descubridor del electrón, ya en 1912. Estaba estudiando partículas de carga positiva en una especie de tubo de Crookes, utilizando el gas neón. Al aplicar campos eléctricos y magnéticos para desviar el haz de aquellas partículas, como había hecho para medir el electrón, obtuvo, no un solo haz desviado, sino dos; un haz pronunciado, y a su lado otro

más débil, no tan desviado. Thomson llegó a la conclusión que «el neón no es un solo gas, sino una mezcla de dos gases, uno de los cuales tiene un peso atómico de unos 20, y el otro de unos 22». Quizás fuera el peso medio de los dos gases lo que explica el peso atómico no entero de 20,2.

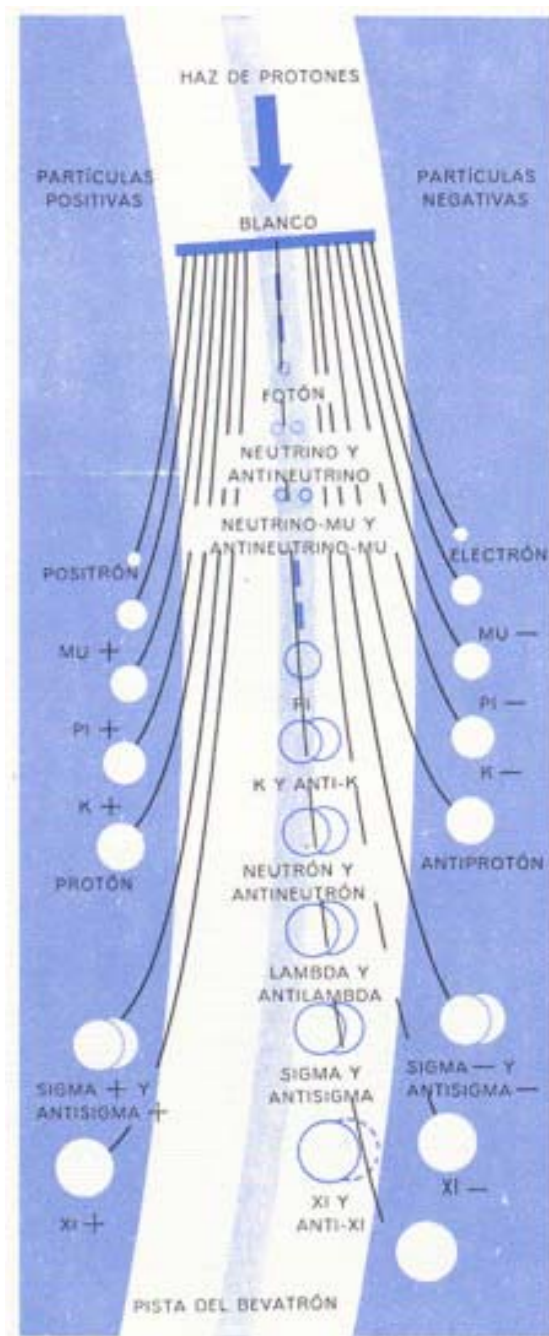
Aparece el isótopo

Más tarde, el protegido de Thomson, F. W. Aston, utilizando aparatos más sensibles, confirmó que el gas neón estaba verdaderamente compuesto por dos tipos de átomos, uno de peso atómico 20 y el otro de peso atómico 22, ambos números enteros, claros y satisfactorios.



LA DIFERENCIA DE UN NEUTRÓN. Los átomos de arriba representan los tres isótopos del hidrógeno. El protio (dibujo izquierdo, forma el 99,98 % del hidrógeno atmosférico), tiene un protón (negro) y un electrón (bola blanca con cola). Se convierte en deuterio (dibujo central) admitiendo un neutrón en su núcleo (que mostramos entrando en el núcleo a lo largo de una línea de trazos) y emitiendo un fotón, partícula energética sin carga ni masa. Si se repite el proceso, el deuterio se convierte en tritio (derecha).

Parecía haber 10 veces más de átomos de neón ligeros que de los pesados. Tales mezclas de átomos se encontraron en otros elementos. Átomos químicamente idénticos, pero de pesos diferentes, recibieron el nombre de isótopos. Faltaba aún una explicación de cómo los isótopos de un elemento podían tener diferentes pesos. Para explicar esta anomalía, Rutherford y otros científicos propusieron que debía haber un constituyente desconocido en el núcleo cuya presencia explicaría una diferencia de peso.



FRAGMENTOS FUNDAMENTALES.

Cuando un haz de protones de elevada energía, producido en un acelerador de partículas choca con un blanco, como el representado en azul oscuro en lo alto del diagrama, los núcleos atómicos pueden desprender 32 partículas fundamentales. Cuanto más ligera es la partícula, tanto más se curva su trayectoria. El mismo imán empuja las ocho partículas negativas hacia la derecha. Los físicos creen que hay 16 partículas neutras, pero no han demostrado aún concluyentemente la existencia de los tres que en la parte superior del diagrama aparecen como círculos de trazos, el neutrino-mu y el antineutrino-mu, así como la partícula anti-xi. La mayor parte de las mencionadas partículas no existen en el espacio libre más que durante una diezmillonésima de segundo, y algunos de sus combinaciones, que reciben el nombre de resonancias, viven escasamente tan sólo una cienmillonésima de segundo.

Como se suponía que la nueva partícula carecía de carga eléctrica, recibió el nombre de neutrón, y se inició una busca tras la prueba de su existencia. Finalmente, en 1932, James Chadwick, uno de los discípulos de Rutherford, llenó una cámara de niebla con nitrógeno y lo expuso a ciertos rayos misteriosos que se sabía emitía el

berilio cuando era bombardeado con partículas alfa. Las fotografías mostraron lo que parecían ser núcleos de nitrógeno retrocediendo al impacto de misteriosos golpes. Midiendo el retroceso, Chadwick dedujo que los rayos que causaban aquellos golpes consistían en «partículas de masa casi igual a la de un protón, y sin carga neta». Adivinó que esas partículas debían ser neutrones. Los científicos tenían ahora que tener en cuenta que, junto con los protones, había números variables de neutrones ligados al núcleo, y que contribuían al peso de los diversos isótopos.

Uno teoría en un huevo crudo

Pero aún seguían en pie cuestiones vitales: ¿qué era lo que mantenía juntas a todas estas partículas y cómo estaban dispuestas? Según una sugerencia, el núcleo podía ser un sistema construido algo así como el mismo átomo, con las partículas nucleares girando en órbitas específicas o «capas», lo mismo que Bohr había imaginado que los electrones giraban alrededor del núcleo. Otra teoría que ha demostrado ser útil asemejaba el núcleo a una gota de líquido. En este esquema los neutrones y los protones se comportan de manera muy semejante a las moléculas en una gota de agua, con una especie de atracción mutua que mantiene unido al núcleo. Estos conceptos, en apariencia irreconciliables, de una estructura del núcleo en capas y de gota de agua, fueron reunidos en 1953 en la teoría «unificada» de Aage Bohr, hijo de Niels, concepto del núcleo como Líquido en capas, como la yema y la clara de un huevo crudo.

A pesar de todas estas teorías, la estructura del núcleo sigue siendo un misterio. Cuando los científicos han ido bombardeando átomos con proyectiles de velocidades cada vez mayores, han sacado del núcleo, no solamente neutrones y protones, sino también un enjambre de nuevas y extrañas partículas, como los conejos de la chistera de un prestidigitador.

Un día de 1932, en su laboratorio del California Institute of Technology, el doctor Carl Anderson estaba registrando rayos cósmicos, esas misteriosas partículas que llegan a la tierra a tremendas velocidades. Fotografió lo que sucedía en una cámara de niebla cuando penetraba un rayo cósmico en una plancha de plomo, y luego entraba en un potente campo magnético. Una fotografía presentaba una traza idéntica a la de un electrón ordinario, salvo que cuando se curvaba bajo la influencia

del campo magnético, lo hacía en dirección opuesta. Anderson dedujo que se trataba de un electrón positivo, que de ahora en adelante llamaremos «positrón». Los positrones nacen para morir pronto. En el momento en que un positrón se encuentra con un electrón, estas dos partículas antitéticas, por razones aún no comprendidas del todo, se aniquilan mutuamente, con acompañamiento de un desprendimiento de energía. Fue esta conversión de masa en energía la que había predicho la trascendental ecuación de Einstein

$$E = mc^2.$$

En esta ecuación E representa energía, m masa y c la fantástica velocidad de la luz, 300.000 kilómetros por segundo. El equivalente de energía de un electrón o un positrón puede calcularse multiplicando el peso de uno u otro de ellos,

0,00000000000000000000000009 gramos

(9×10^{-28} gramos), por el cuadrado de la velocidad de la luz. Cuando tratan con partículas atómicas los físicos prefieren expresar la energía por medio de una unidad llamada Mev, un millón de electrón voltios. El choque suicida de un electrón con un positrón produciría un Mev. Esta energía se manifiesta en forma de rayos gamma.

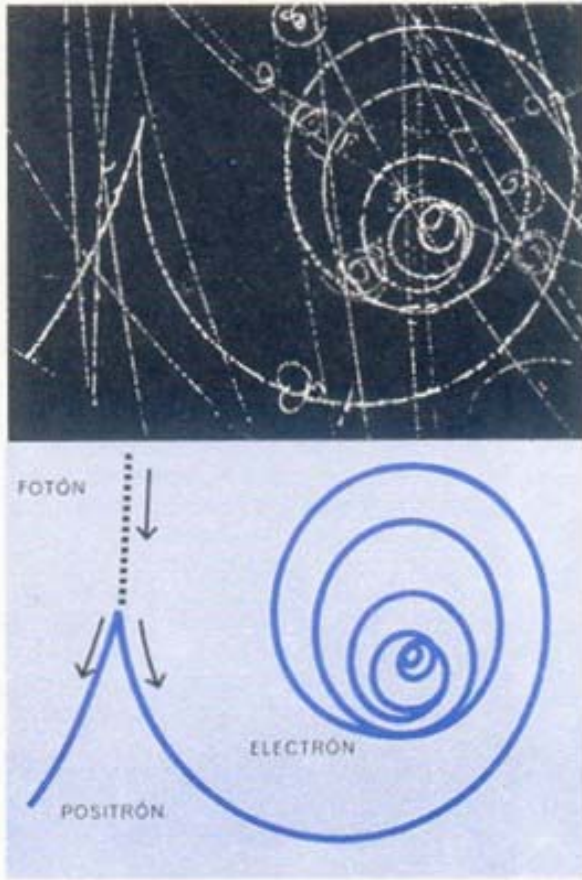
El descubrimiento de la existencia de una directa antítesis al electrón confirmaba, de un modo curioso, la simetría esencial de la física nuclear, pero aumentaba también su complejidad. Podía ahora conjeturarse que por cada partícula era probable que hubiese una antipartícula. Y llevando estas especulaciones a sus últimas conclusiones, los físicos comenzaron a jugar con la idea de que existe alguna especie de antimateria cuyos átomos consisten en antipartículas, antielectrones (o positrones) que giran alrededor de antiprotones. Es de presumir que un trozo de antimateria que se encontrase con un trozo de materia determinaría una aniquilación catastrófica.

Cosas opuestas

¿Puede ser posible que un infierno de llamas que sólo aparece como una mota luminosa en un telescopio gigante sea realmente una colisión entre una galaxia y una antigalaxia? ¿Tendría una de las galaxias una gravedad *anti* a la de la otra? Los científicos carecen de respuesta a tales preguntas, pero nadie puede dejarlas de lado como fantasías improbables.

Los misteriosos rayos cósmicos que revelaron por vez primera la antipartícula siguen siendo un útil instrumento para la ciencia. Pero paulatinamente el arsenal de factura humana de bombarderos de partículas, ciclotrones, sincro-ciclotrones, betatrones y sincrotrones, ha ido aumentando. Si bien no pueden competir con los rayos cósmicos más poderosos, son capaces de disparar más partículas a un blanco. A medida que han ido aumentando las máquinas, se han ido arrancando nuevas partículas al núcleo del átomo, en cantidades verdaderamente asombrosas. Algunas partículas aparecen brevemente, luego desaparecen o se transforman en dos o más partículas completamente diferentes.

Por ejemplo, los físicos buscaron largo tiempo una explicación de la fuerza inmensamente poderosa que mantiene juntos protones y neutrones en el corazón del átomo.



HACIENDO MATERIA CON ENERGÍA. El complicado dibujo que aparece en la fotografía de cámara de burbujas de hidrógeno, es una imagen de la creación de materia a partir de energía, una bomba atómica al revés. La fotografía muestra las huellas de las burbujas que se forman cuando las partículas subatómicas cargadas procedentes del bevatrón de la Universidad de California se desplazan o través de hidrógeno liquido mantenido justo por debajo de su punto de ebullición.

El diagrama que se acompaña aclara las trayectorias específicas de los trozos de materia que se acaban de crear; la línea de puntos representa la trayectoria del rayo gamma de elevada energía, o fotón. Las curvas representan el positrón y el electrón que se forman cuando se desintegra el fotón, y que son desviados a izquierda y derecha por el campo magnético que rodea la cámara de burbujas.

No puede ser una fuerza eléctrica, pues incluso los neutrones, que carecen de carga, se mantienen juntos; no puede ser una acción gravitatoria, pues la gravedad entre partículas de masa tan pequeña sería demasiado débil. Además, los experimentos probaban que la fuerza nuclear, fuese lo que fuese, tenía un alcance limitado. Y entonces, en 1935, un físico teórico japonés, Hideki Yukawa, presentó un nuevo punto de vista del problema de la fuerza nuclear. La teoría de Yukawa era que quizás en el interior del núcleo había aún otra «partícula elemental» que

oscilaba rápidamente arriba y abajo entre los protones y los neutrones, manteniéndolos juntos; su acción podría ser comparada a un péndulo que oscilase entre dos objetos, atrayéndolos a los dos. Yukawa calculó que su partícula de unión tendría que pesar unas 200 veces más que un electrón.

El Pico Pikes y una partícula

Aquella idea parecía extraña, pero los físicos la tomaron en serio y comenzaron a buscar la partícula. En 1936, Carl Anderson, que había estado explotando con gran éxito los rayos cósmicos, esta vez en la cumbre del Pico Pikes, en Colorado, anunció el descubrimiento de una partícula de una masa de unas 200 veces la del electrón. La llamó mesotróon, abreviado más tarde a mesón. Se parecía extrañamente al agente de fuerza nuclear que Yukawa predijera. Pero como no concordaba en todo con la teoría del japonés, los investigadores siguieron buscando.

Después de la segunda Guerra Mundial, un equipo de investigación anglo-italiano, C. F. Powell y G. P. S. Occhialini, que habían estado enviando a gran altura paquetes especiales de película fotográfica en globos para probar rayos cósmicos, anunciaron que habían encontrado, no un mesón, sino dos. Uno de ellos, al que se llamó mesón-mu (o muón), fue identificado como la partícula que Carl Anderson había descubierto diez años antes. Al Otro se le llamó mesón-pi (pión), y como demostró gran afinidad por neutrones y protones, se consideró era la partícula de Yukawa.



UNA PRUEBA PARA UN NÚCLEO. El papel de la partícula nuclear pión es muy semejante al de una hipotética gorriona con dos críos gigantes que tiene que evitar que salten del nido. Cada uno de los pajaritos representa un protón, mientras que el nido representa el núcleo. Los protones son partículas eléctricamente cargadas que tienden a repelerse mutuamente. Lo mismo que la madre pájaro, el pión mantiene unido el núcleo saltando a uno y otro lado, de protón a protón. Los científicos creen que cuando el pión está cerca de uno de los protones lo convierte en un neutrón eléctricamente neutro, pero que cuando el pión regresa al otro protón, el neutrón vuelve a su primitivo estado de protón.

La lista de partículas fundamentales que han salido del núcleo pasa ahora de 30. Comprende electrones, protones, neutrones, neutrinos y varias clases de mesones, además de una clase de partículas, más pesadas que el protón, llamadas hiperones, que comprende tres grupos llamados partículas lambda, sigma y xi. Cada una de las de esta lista tiene su antipartícula.

Algunas de estas partículas parecen desempeñar un papel vital en el núcleo. Sin ellas, las ecuaciones de acontecimientos nucleares no se equilibran adecuadamente. Por ejemplo, la caza del elusivo neutrino prosiguió durante un cuarto de siglo porque, de no suponer su existencia, no se podía percibir ningún esquema consistente en la energía de los electrones que salían de los núcleos de los átomos radiactivos; alguna partícula desconocida parecía robar parte de la energía. Pero la teoría decía también que, si en efecto existía un neutrino, carecía de carga, y sería de poca masa, y podría, por lo tanto, pasar a través de 160 billones de kilómetros

de plomo antes de ser detenido por una colisión. Por lo tanto, sería aún más difícil de detectar que el neutrón. Pero en 1956, dos americanos, Frederick Reines y Clyde Cowan, Jr., informaron que habían encontrado el neutrino. Utilizando aparatos dispuestos junto a un reactor atómico gigante, del cual se creía que surgían aquellas partículas, habían registrado la evidencia destructora de las colisiones entre neutrinos y núcleos atómicos.

En la lista de partículas nucleares sólo se han incluido las que tienen vidas relativamente largas, por lo menos por ser del mundo atómico: es decir, cuyo período de semi-desintegración sea de una diez milmillonésima de segundo, o mayor. Pero para añadir a las dificultades de los físicos, recientemente han descubierto varias docenas de las llamadas «resonancias»: entidades a manera de partículas cuya vida es de algo así como una cien miltrillonésima de segundo.

De las muchas partículas que emanan de las al parecer inagotables profundidades del núcleo del átomo, la ciencia está tratando de construir alguna teoría que explique su presencia. ¿Son todas ellas formas diferentes de unas cuantas partículas? Nadie lo sabe con seguridad, pero la mayor parte de los físicos creen que cuando aparezca una buena teoría, saldrá de las ecuaciones e ideas de la mecánica cuántica u ondulatoria.

Porque hasta ahora hemos estado tratando con los fragmentos del núcleo solamente como si fuesen partículas. Pero, lo mismo que en el capítulo 6, una imagen más exacta debe tener en cuenta el doble aspecto de la materia como partículas y ondas.

Nueva nota de incertidumbre

Debemos, además, invocar una regla sobre los átomos que ha hecho perder a la mayoría de los físicos la esperanza de que vuelva nunca más a haber una imagen verdaderamente definida de un átomo o de un núcleo. Su mismo nombre es, en efecto, el principio de incertidumbre. Enunciado en 1927, fue producto del cerebro de un joven físico alemán llamado Werner Heisenberg. En pocas palabras afirmaba que no hay manera de lograr seguir con precisión un electrón, ni ninguna otra partícula atómica. Los electrones son tan pequeños, y las ondas luminosas relativamente tan gruesas, que intentar fijar la posición de un electrón en órbita con

ondas luminosas sería algo así como intentar medir el espesor de una hoja de papel con una vara de madera. Incluso si utilizáramos rayos X de onda corta, el impacto mismo de los rayos X perturbaría el curso del electrón. Efectivamente, Heisenberg demostró con argumentos incontrovertibles que cuanto con más exactitud se determina la posición del electrón, con tanta menos exactitud puede medirse su momento.

Si bien esto puede parecer una sutileza sobre técnicas de laboratorio, el principio de Heisenberg presentaba inferencias filosóficas que habrían de revolucionar la física. Pues al mismo tiempo que la incertidumbre hacía la afirmación puramente negativa de que la certidumbre sobre las partículas atómicas era imposible, tenía también un aspecto positivo. Decía a los físicos que se olvidasen para siempre de sus vanos esfuerzos por hacer al mismo tiempo, a nivel atómico, determinaciones exactas de posición y momento. Les decía que, en vez de aquello, debían dedicar sus energías al intento de desarrollar una nueva física. Poco a poco esa nueva física ha ido surgiendo y ha tenido un éxito inmenso.

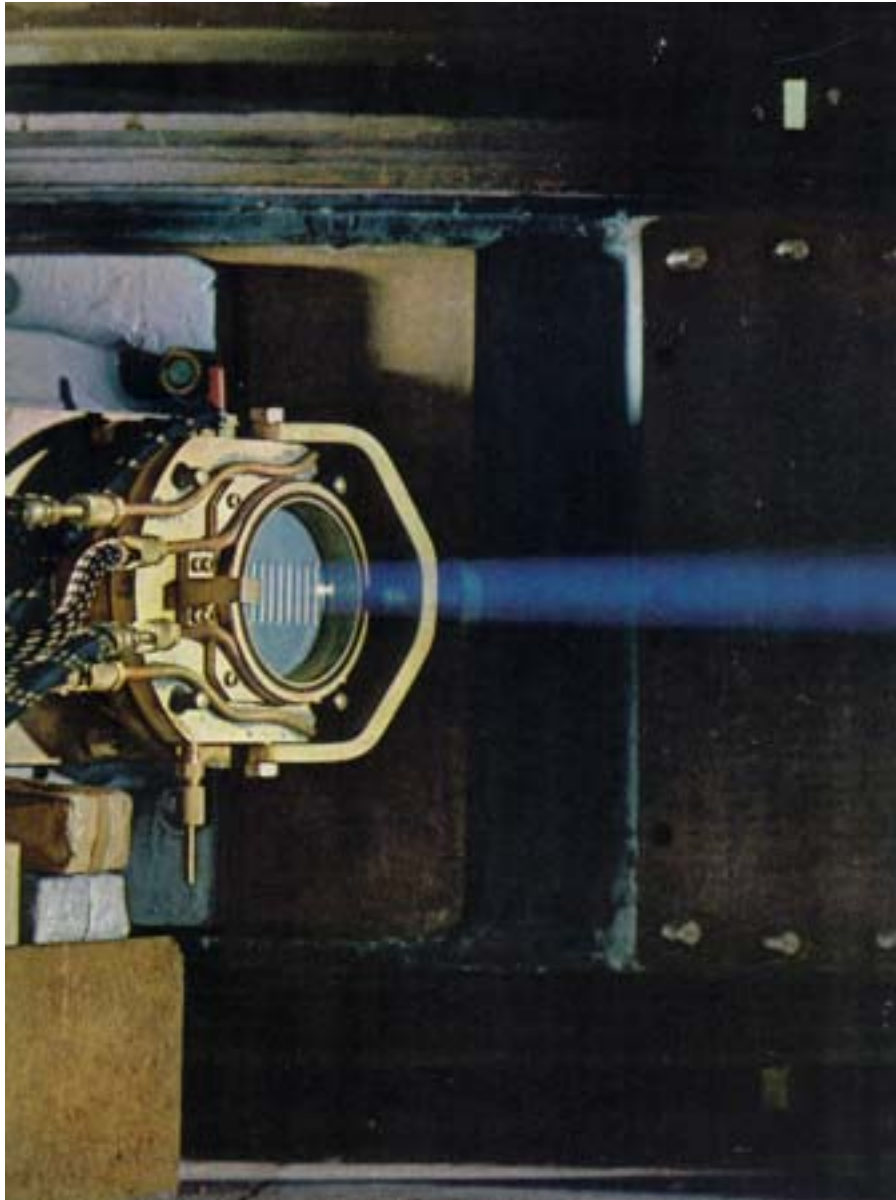
Con el nombre de mecánica cuántica u ondulatoria, existe un mecanismo matemático que prescinde en gran manera de la clásica preocupación sobre movimientos exactos de partículas individuales, y trata solamente de los movimientos probables de las partículas. Y ha resultado que las matemáticas de las probabilidades de Heisenberg corresponden exactamente con las matemáticas de las ondas de Schrödinger (capítulo 6). Por esta razón la mayor parte de los científicos considera ahora las ondas de materia como ondas de «probabilidad», imágenes de las probabilidades crecientes o decrecientes de que haya partículas en un lugar determinado. Por ejemplo, las cimas de las ondas que rodean a un núcleo atómico coinciden exactamente con las posiciones más probables de la trayectoria de un electrón y, por tanto, con las posiciones de las órbitas. Transistores, superconductores, superimanes, los potentes lasers generadores de luz, y multitud de artificios han salido del complejo corazón matemático de la mecánica cuántica; no hubiesen nunca surgido de la antigua teoría del átomo de Bohr.

No obstante, según hemos visto por la superabundancia actual de partículas nucleares inexplicadas, la física actual no es toda sencilla comprensión y matemáticas supereficientes. El físico prefiere considerar al átomo como una bola

de borra energética e incierta. Cuanto más oscura se ha hecho la imagen de su estructura, tanto mejor es la visión de su corazón.

Instrumentos gigantescos para penetrar en los secretos de una mota

A medida que los físicos van avanzando en su conocimiento de la identidad profunda de la materia, los instrumentos de su investigación se hacen mayores y más complejos. Los más importantes e impresionantes son los aceleradores de partículas o rompeátomos, los cuales difieren en tamaño y acción, pero en esencia lo que todos ellos hacen es cargar pequeñísimas partículas, algo así como de una billonésima de centímetro de diámetro, con tremenda energía, y luego las lanzan contra blancos subatómicos igualmente pequeños. Las colisiones que se producen rompen los blancos en pedazos que proporcionan indicios vitales sobre la estructura de la materia. Con frecuencia, cuanto mayor energía puede comunicar un acelerador a sus pequeños proyectiles, tanto más informativo resulta el experimento. Treinta años de progreso técnico han conducido a máquinas complicadas que producen energías cada vez mayores.



RETRATO DE UN HAZ DE PARTÍCULAS. Uno de los primeros grandes rompeátomos, el famoso ciclotrón de la Universidad de California en Berkeley, produjo en 1939 este haz de partículas aceleradas. El resplandor purpúreo no procede del haz mismo (que emerge de la ventanilla de la izquierda) sino de los átomos de aire que han sido agitados por el paso del haz. Este ciclotrón se desmontó en 1962 por anticuado.

El mayor rompe-materia del mundo

En el Laboratorio Nacional de Brookhaven, cerca de New York City, se encuentra el mayor acelerador de partículas del mundo. Su inmensamente compleja instalación se extiende sobre unas 8 hectáreas, costó 33 millones y necesita el cuidado de 180

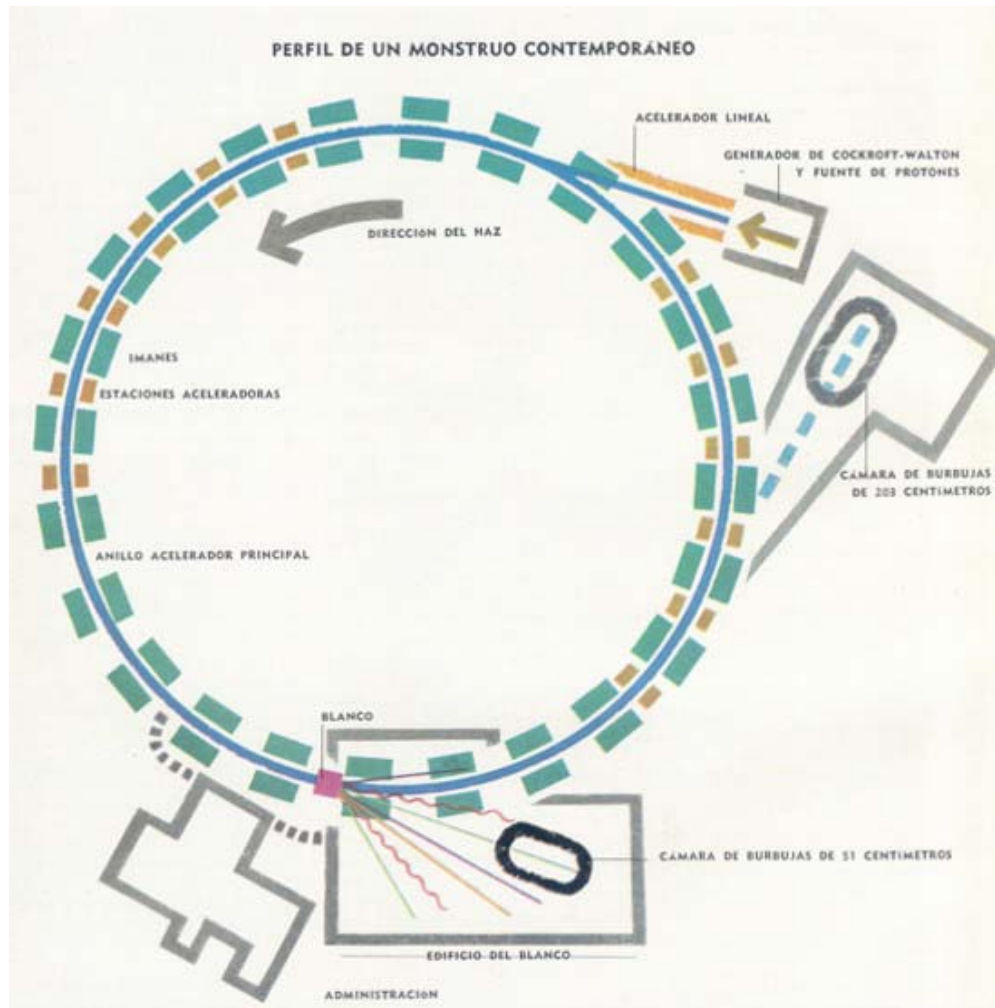
personas. Gran parte es subterránea, y está en un túnel circular de unos 800 metros que alberga el aparato para elevar las partículas subatómicas a energías de 33 mil millones de electrón-voltios. Un electrón-voltio (ev) es la unidad de energía que un campo eléctrico comunica a una partícula.

Un haz de partículas provisto de energía tan elevada tiene dos usos principales: primero, puede producir nuevos tipos de partículas por la fuerza de sus colisiones con los núcleos del blanco; segundo, obra como una especie de supermicroscopio. Cuando las partículas cargadas de energía rebotan, llevan consigo impresiones de las características de los núcleos. Estas impresiones pueden proporcionar un “ojo” con que mirar en el interior del átomo. La mayor parte de los aceleradores tratan las partículas cargadas y en movimiento por medio de impulsos sucesivos y acumulativos de energía eléctrica. Esta técnica varía según los diferentes tipos de rompeátomos (véase Apéndice). El monstruo de Brookhaven es un sincrotrón, que hace correr partículas llamadas protones en una órbita circular. Las mantiene en posición gracias a unos ingeniosos imanes que constantemente empujan y comprimen los protones por medio de campos magnéticos variables, o gradientes. Esta característica explica el nombre de la máquina, “sincrotrón de gradiente alterno” (AGS).



UN GIGANTE QUE NUNCA DUERME. Esta fotografía aérea muestra el vasto complejo AGS de Brookhaven, desde aproximadamente el mismo punto de vista que el diagrama de la derecha. El círculo del principal anillo acelerador tiene unos 250 metros de diámetro. Los tres metros de tierra de encima del anillo constituyen una coraza natural contra la radiación: el AGS no presenta peligro para sus operadores, ni para la campilla que lo rodea. Funciona a base de tres turnos por día.

El sincrotrón de gradiente alterno de Brookhaven aparece aquí en diagrama, visto por arriba. El generador de Cockcroft-Walton, así llamado en honor de sus dos inventores británicos, produce una fuerza eléctrica inicial que impulsa protones hacia un acelerador lineal (*linac*) donde ganan velocidad antes de entrar en el anillo acelerador principal. Los grandes imanes son el cerebro del AGS, dan forma y controlan el haz de protones que gira en el vacío alrededor del anillo. El pulso del monstruo lo proporcionan doce estaciones aceleradoras; cada uno de ellas aumenta repetidamente la velocidad del haz con sacudidos eléctricos sincronizadas. Se ven una docena de haces de protones persiguiéndose alrededor del anillo. Cuando un haz incide en el blanco, pierde partículas secundarias; éstos se criban y dirigen a los aparatos para su estudio y valoración.



El sincrotrón de gradiente alterno de Brookhaven

En Stanford, la última moda en aceleradores

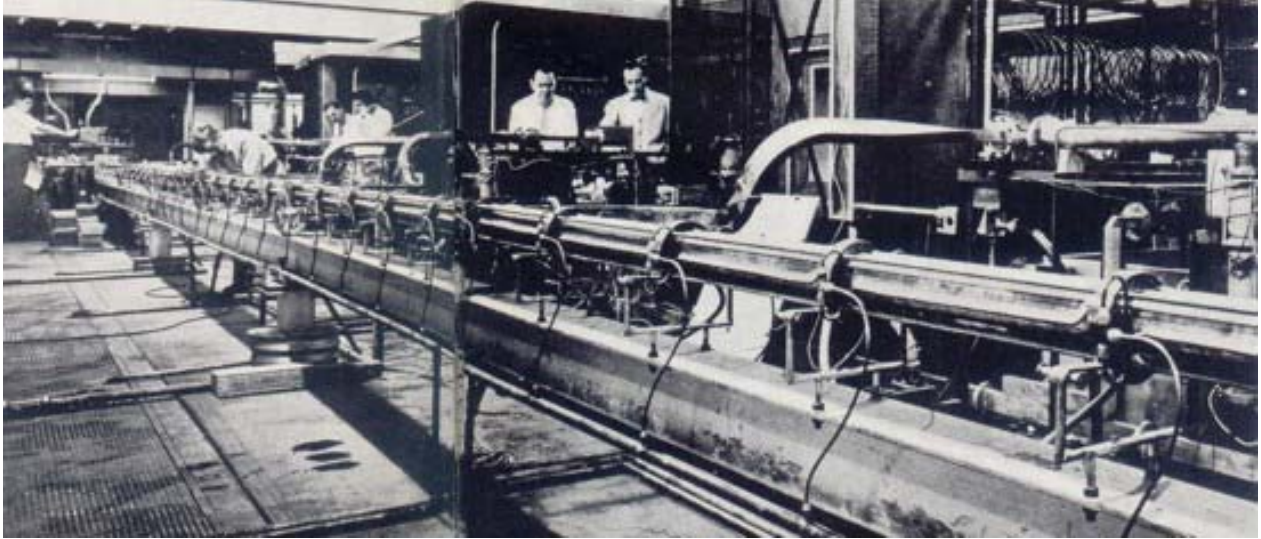
No todos los aceleradores tratan con protones. Algunos emplean electrones, que son de gran utilidad en la exploración subatómica. Los electrones, de una masa 1.800 veces menor que los protones, pueden dar impresiones más precisas de sus blancos atómicos y han proporcionado algunos de los datos más explícitos conocidos. Un acelerador en línea recta, no presenta problemas de radiación, pero sí otra dificultad. A fin de producir haces de energía verdaderamente elevada, el acelerador lineal debe tener muchas estaciones aceleradoras muy potentes dispuestas en líneas, puesto que cada una de ellas sólo actúa una vez. Esta condición se cumplirá en un acelerador lineal que se está construyendo en la Universidad de Stanford, California. Maravilla de artillería electrónica, será el rompeátomos más largo (tres kilómetros doscientos metros) y más caro (US\$ 114

millones) del mundo. Cuando esté terminado, en 1967, hará que el mayor acelerador lineal del mundo, en Stanford, parezca un fusil de juguete.



En California se han nivelado y preparado más de tres kilómetros de terreno, a fin de proporcionar un camino adecuado para el túnel de 3.000 metros que se construye para albergar el nuevo acelerador gigante de Stanford. El tubo acelerador (línea roja y dibujo inferior), que es un tubo de cobre de unos diez centímetros, estará recubierto por 10 metros de tierra. Los electrones son inyectados en el tubo por un cañón electrónico, parecido al de un tubo catódico de TV. A diferencia del preacelerador lineal del AGS, la fuerza aceleradora de la nueva máquina serán ondas de radio viajeras de frecuencia extremadamente elevada que transportarán racimos de electrones a lo largo del tubo, comunicándoles energía de hasta 20 Bey.

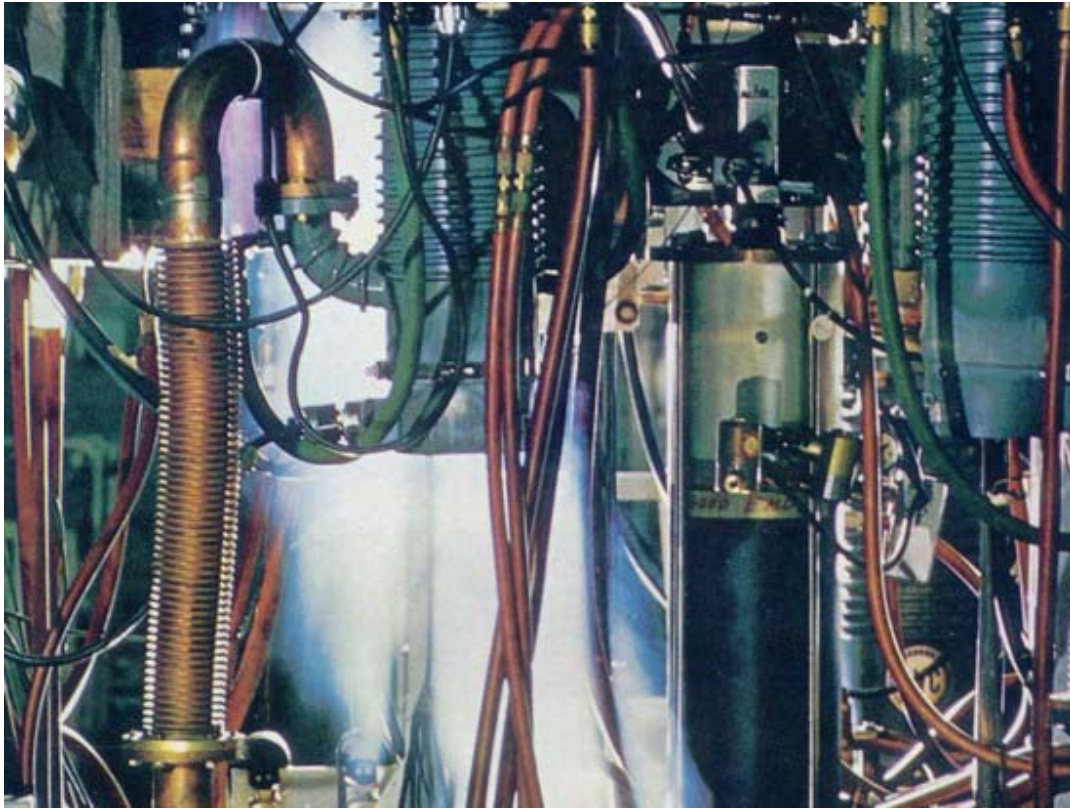
Las ondas recibirán su energía de 240 válvulas de radio de enorme potencia, llamadas válvulas klistrón, que se dispondrán en la galería superior. El proyecto permite añadir en el futuro 720 válvulas más, las cuales aumentarían la potencia total hasta el valor fantástica de 40 Bey. El patio de desvío del haz electrónico desviará magnéticamente el haz de electrones hacia diversos blancos. Las líneas verticales del dibujo inferior representan salientes en el tubo acelerador que controlarán la velocidad. Al final del tubo el haz incidirá en un blanco y liberará partículas secundarias que pueden luego ser aisladas y registradas.



ANTEPASADO DE UN MONSTRUO. Funcionando actualmente en Stanford se encuentra el acelerador lineal Mark III de 100 metros (1952). Produce mil millones de electrón-voltios. Cuando está en acción, el delgado tubo acelerador queda escondido tras una coraza de bloques de hormigón contra la radiación. El éxito del Mark III condujo al proyecto de la nueva máquina, equivalente a 32 Mark III.

Capítulo 8

Comienzo de una reacción en cadena inacabada



ALICIA Y EL PAÍS DE LAS MARAVILLAS. El laberinto de alambres y bobinas es Alicia, sobrenombre del Experimento Adiabático de Inyección y Captura a Baja Energía. Los científicos de la Universidad de California utilizan a Alicia para crear reacciones termonucleares, no con la desencadenada furia de la bomba de hidrógeno, sino con cantidades controlables de energía.

EL 16 de julio de 1945, un cegador fogonazo sobre el desierto de Nuevo México anunció que el átomo había salido del laboratorio para desempeñar un papel que iba a afectar las fortunas de las naciones y las vidas de miles de millones. Se trataba de un debut apresurado, bajo la presión de la guerra, y no fue precisamente la exhibición que los científicos que la contemplaban hubiesen escogido por su gusto. Pero para la inteligencia científica representaba la culminación triunfante del largo proceso para la comprensión y el dominio de la energía encerrada en el interior del átomo.

El proceso había comenzado alrededor de principios de siglo cuando los científicos se dieron cuenta por primera vez que la materia y la energía no eran entidades distintas, sino que estaban unidas en una relación íntima e indestructible resumida en la relación de Einstein, engañosamente sencilla, $E = mc^2$.

Sabían que $E = mc^2$ no era un sueño. La energía estaba allí, arraigada en el átomo. Era, en efecto, el propulsor primario del universo, el medio gracias al cual las estrellas resplandecían y el sol conseguía su descomunal calor. El hombre tardó tiempo en darse cuenta que podía aquí, en la tierra, liberar aquella energía, pues la ecuación de Einstein no era una guía, sino sencillamente una descripción de lo que sería la relación entre materia y energía si su interconversión llegaba algún día a ser realizada por el hombre. No obstante, como constante recuerdo de la realidad que se ocultaba tras aquella ecuación, había también el goteo permanente de energía en forma de radiación y calor, de los minerales radiactivos naturales, como el radio y el torio. Estos materiales tardan, respectivamente, miles y miles de millones de años en perder una cantidad apreciable de su radiactividad, pero a la inmensa escala de la naturaleza no hay diferencia entre una millonésima de segundo y un millón de años. Quizás se encontraría otro proceso que liberase la energía en forma de avalancha en vez de goteo, si bien nada menos que un Ernest Rutherford dijo que no le parecía probable.

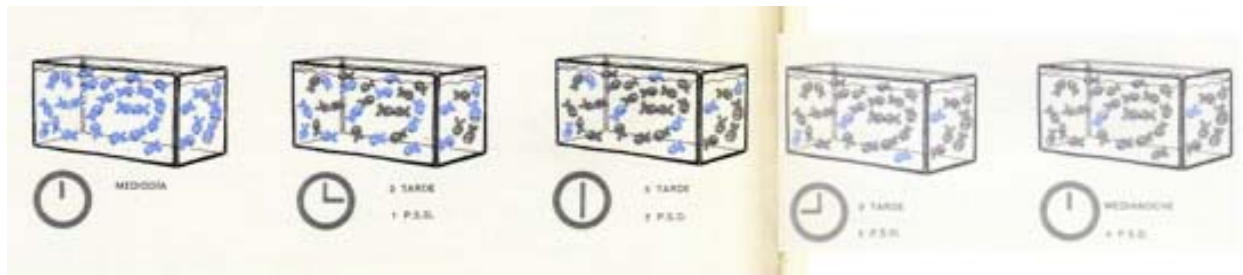
Y entonces, en 1938, se descubrió una peculiaridad, antes inadvertida, de un elemento natural, el uranio. En aquel oscuro y angustioso período de antes de la tempestad, muchos de los principales científicos de Europa se desplazaban, buscando refugio de la persecución racial y de los dictadores. Poco a poco bastantes de ellos llegaron a los Estados Unidos y se asentaron aquí, llegando a hacer de este país el centro de estudios atómicos. Pero el primer paso sensacional lo consiguieron dos expertos radioquímicos que eligieron quedarse en la Alemania nazi, Otto Hahn y Fritz Strassmann. Estaban realizando un experimento entonces de interés en los laboratorios de física avanzada; bombardeaban el elemento uranio con neutrones lentos obtenidos de una mezcla de radio y berilio. En 1934 el brillante físico italiano Enrico Fermi, y otros en años siguientes, habían efectuado experimentos semejantes. Pero Hahn y Strassmann obtuvieron resultados nunca jamás observados. Cuando analizaron su blanco de uranio después del bombardeo,

encontraron vestigios de un elemento que sus profundos ensayos demostraron ser bario, un elemento que pesa sólo aproximadamente la mitad del uranio. En la muestra de uranio no había bario antes de comenzar los ensayos. Si realmente podían creer en sus resultados, había, de hecho, roto por la mitad el pesado núcleo de uranio. Según las teorías aceptadas por la física nuclear, eso era algo tan inimaginable como sería romper un ladrillo disparándole un guisante.

Pronósticos en un manuscrito

Hahn y Strassmann quedaron perplejos. Como químicos experimentados que eran, sabían que habían efectuado los experimentos con cuidado y minuciosidad. Pero, ¿es que iban a destruir sus excelentes reputaciones profesionales aventurándose en el dominio de la física nuclear, contradiciendo a sus mayores lumbreras y exponiéndose al ridículo, por algún absurdo descuido experimental? Enviaron un breve informe a una publicación científica alemana, *Die Naturwissenschaften*, anunciando sus hallazgos. Pero al mismo tiempo se abstuvieron de toda conclusión que pareciese ir contra las ideas de los grandes físicos del día. (Años más tarde Hahn recordaba que: «Después de haber echado al correo el manuscrito, me pareció de nuevo todo ello tan improbable, que deseé haber podido sacar el documento del buzón».)

Luego, a pesar de seguir con sus dudas, Hahn también informó de su hallazgo a la gran física Lise Meitner, que durante 30 años había sido su inseparable compañera de trabajo; unos cinco meses antes se había ido a Suecia huyendo de la persecución antisemita del Tercer Reich de Hitler.



DE PECES Y DE FERMIO. La desintegración de un elemento radiactivo, el proceso por el cual un núcleo pierde partículas o porciones de energía, se mide en términos de su periodo de semidesintegración. Este es el tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de cualquier cantidad de un elemento. Las ilustraciones representan la desintegración radiactiva de un isótopo del fermio, el fermio 256, que tiene un periodo de semidesintegración de tres horas. Si representamos el fermio por medio de 32 peces azules en un acuario a mediodía, a las 3 de la tarde la mitad de los peces se habrán desintegrado (vuelto gris). A las 6 de la tarde el número de peces azules se habrá reducida a la mitad, quedando ocho peces azules y 24 grises. A las 9 de la noche sólo quedarán dos peces azules. Cada elemento radiactivo tiene su período de semidesintegración; del uranio 238 es 4.500.000.000 de años: del polonio 212 es tres diezmillonésimas de segundo.

La doctora Meitner recibió la carta de Hahn mientras estaba de vacaciones en una estación marítima cerca de Goteborg con su sobrino Otto Frisch, también un físico que había huido de Alemania; él estaba entonces trabajando con Niels Bohr en Copenhague. Pensando en cómo podía haber sucedido que un átomo de uranio pareciese haberse dividido en dos átomos, cada uno de ellos de aproximadamente la mitad de su peso, Meitner y Frisch adaptaron la imagen nuevamente ideada por Bohr, del núcleo como gota de líquido. En este modelo de la gota líquida, las partículas del núcleo eran consideradas como unidas entre sí de un modo semejante a las moléculas en una gota de agua. Tal núcleo, como ya hemos visto en el capítulo 7, se mantiene unido por una atracción tremenda y misteriosa llamada fuerza nuclear, fuerza suficiente para superar la repulsión eléctrica inherente a los protones de carga positiva, tan apretados los unos a los otros. También sujeta a los neutrones que carecen de carga. Se ha determinado que esta potente fuerza nuclear sólo actúa a corta distancia, una fracción del diámetro de uno de los mayores núcleos atómicos. Más allá de esta distancia, las fuerzas eléctricas repelentes, que actúan a mayores distancias, predominan sobre la fuerza nuclear.

Cuando un neutrón externo penetra en el «líquido» núcleo, la perturbación hace oscilar violentamente al núcleo. Al llegar a cierto punto se deformará adquiriendo una forma alargada, y cuando esto ocurra, las fuerzas cohesivas de corto alcance del núcleo ya no serán lo suficientemente poderosas para mantenerlo unido. Las fuerzas eléctricas repelentes dominan y comienzan a empujar los dos extremos del núcleo, apartándolos cada vez más. Formará como una cintura de avispa, y acabará por dividirse en dos mitades, de modo muy parecido a como se dividen las células biológicas. Es precisamente esta semejanza con el comportamiento biológico lo que condujo a Meitner y Frisch a dar al proceso nuclear el nombre de «escisión».

Razonaron luego que si lo que Hahn y Strassmann habían realmente observado era una escisión, debería haber presente otro importante fenómeno: una enorme liberación de energía. La mayor parte de esta energía aparece después de que las fuerzas eléctricas son las dominantes y proyectan los dos nuevos núcleos en direcciones opuestas a tremendas velocidades. Según los cálculos efectuados por Meitner y Frisch, la energía generada de esta manera consistiría en aproximadamente 200 Mev, 200 millones de electrón voltios, para cada pequeño átomo que se dividía.

Preludio de un viaje

Frisch se apresuró a volver a Copenhague, consiguiendo alcanzar a Bohr justo cuando estaba a punto de embarcarse para los Estados Unidos, a donde iba a trabajar durante varios meses con el mismo Einstein en Princeton. Se dice que cuando Bohr oyó la historia de Frisch, se golpeó la frente y dijo:

«¿Cómo se nos ha podido pasar por alto esto tanto tiempo?». Salió hacia América desbordante de la sensacional noticia, mientras Frisch se precipitaba en su laboratorio para comprobar lo que él y su tía habían estado pensando en Suecia. Incluso antes que Bohr hubiese atravesado el Atlántico, Frisch había confirmado la esencia de la nueva teoría. Lo mismo que Hahn y Strassmann, bombardeó el uranio con neutrones. A medida que cada neutrón se estrellaba en un átomo de uranio, observaba una gran explosión de energía, lo bastante potente para hacer salir de escala a los instrumentos de medida.

¿Cómo no habían observado esto Fermi y los otros que habían bombardeado átomos de uranio con neutrones? La respuesta es que probablemente casi todos habían seguido los pasos iniciales de Fermi después de su primera división del átomo de uranio en 1934, y Fermi había confundido los fragmentos radiactivos de uranio, tomándolos por átomos superpesados situados más allá del uranio en la tabla periódica.

También había faltado poco para que la escisión fuese descubierta por un americano. En la Universidad de California, en 1936, el joven Philip H. Abelson, que estaba empezando su carrera científica, había dividido el átomo de uranio, pero no se había dado cuenta de lo que había hecho. No obstante, al mismo tiempo que Hahn y Strassmann realizaban su trascendental experimento, Abelson estaba montando aparatos que hubiesen identificado los fragmentos de escisión del uranio, y hubiese conseguido para los Estados Unidos el descubrimiento de la escisión. Fue a causa de una serie de accidentes el que la energía atómica no cayera en manos de los hombres durante los años anteriores a la segunda Guerra Mundial.

La noticia de Meitner y Frisch, que Bohr transmitió, se extendió rápidamente a través de la creciente comunidad de científicos extranjeros reunidos en el suelo de los EE.UU. Por aquel tiempo, enero de 1939, el gran Fermi mismo, cansado de la Italia de Benito Mussolini, había llegado para ocupar un cargo en la Universidad de Columbia. Fermi se quedó al principio estupefacto cuando se enteró de lo que se le había escapado por poco, pero con la rapidez mental de su tranquilo ingenio se puso a sacar nuevas conclusiones de la escisión nuclear. Para poder conseguir una reacción de escisión que equivaliese siquiera a una linterna de bolsillo se iban a necesitar miles de millones más de neutrones que los que habían sido obtenidos en el laboratorio. Con su profundo conocimiento del núcleo, Fermi imaginó que quizás el mismo proceso de escisión podría causar que de los núcleos que se dividían, saliesen nuevos neutrones. Estos nuevos neutrones, a su vez, podrían dividir nuevos núcleos, y en pocos instantes crear generaciones de proyectiles de neutrones disparados desde el interior de la masa de uranio. A este fenómeno se aplicó la expresión «reacción en cadena».

Un mundo «camino del dolor»

Esta hipótesis produjo gran revuelo entre los compañeros de Fermi, pues si resultaba cierta, prometía un desprendimiento de energía tal como el hombre no había nunca conseguido por sus propios medios. De hecho, fue comprobada pronto y de modo emocionante, primero por un equipo de investigación francés, y poco después, por varios científicos que trabajaban independientemente en los EE.UU. En un laboratorio de Columbia el físico Leo Szilard y su compañero, el canadiense Walter Zinn, idearon un sencillo experimento que debería revelar, por destellos de luz en un tubo de televisión, si el uranio, al dividirse, emitía neutrones. Más tarde Szilard recordó aquella ocasión:

«Si aparecían destellos de luz en la pantalla significaría que se emitían neutrones... y eso, a su vez, querría decir que la liberación de la energía atómica en gran escala estaba a la vuelta de la esquina.

»Dimos la vuelta al interruptor y vimos los destellos.

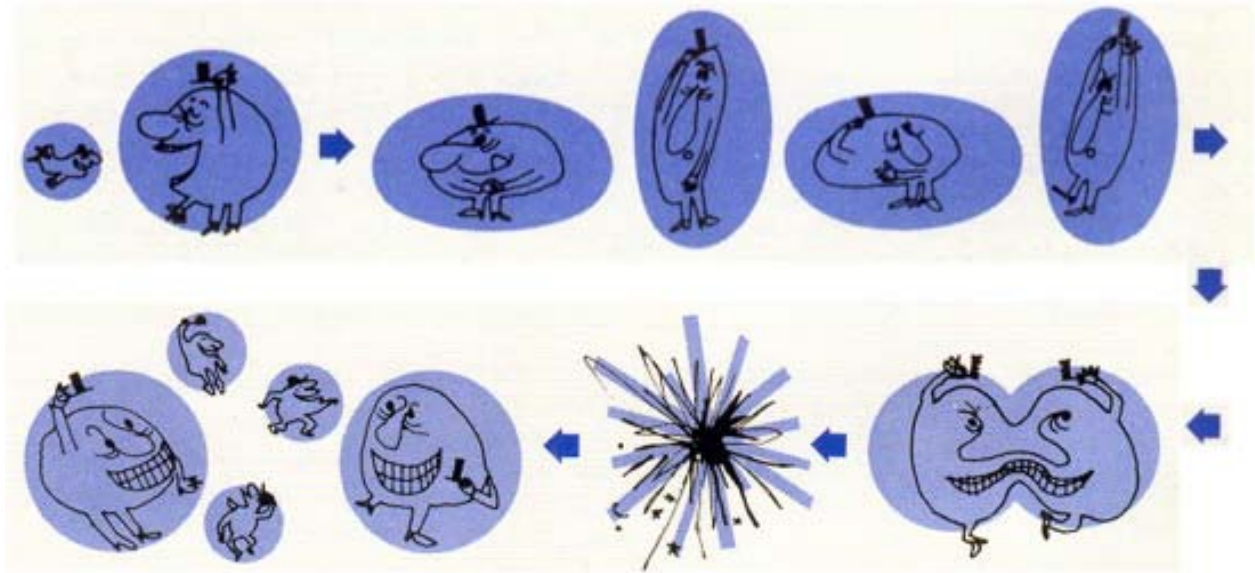
»Los observamos un rato, luego lo apagamos todo, y nos fuimos a casa.

»Aquella noche me quedaron muy pocas dudas de que el mundo estaba en el camino del dolor».

ESCISIÓN: UN GOLIAT ATÓMICO DERRIBADO POR UN PEQUEÑO NEUTRÓN

El grueso átomo de uranio, o el aún más grueso átomo de plutonio, puede ser dividido en dos por el impacto de un sólo neutrón. En este proceso de escisión, la masa de los productos de escisión no es igual a la del átomo original, parte de la masa ha sido convertido en energía. Cuando se multiplica la pequeña cantidad de energía de la escisión de un átomo, por el enorme número de átomos escindibles de algunos gramos de uranio, el resultado es la energía para hacer saltar una ciudad.

Pero una permutación atómica de aún mayor potencia es la de la fusión nuclear, proceso que se representa en la página siguiente.



Cuando un neutrón rápido se mete en un átomo peso pesado de uranio 235 (arriba izquierda), el núcleo se dilata y comienza a oscilar, y haciendo contorsiones se estira y se ensancha. Pero la tensión creada por la partícula adicional es excesiva y pronto hace que el núcleo se porta en dos. Esta división, o escisión se produce con una explosión de energía liberada, y del proceso emergen dos núcleos más ligeros (fragmentos de escisión) y tres neutrones libres. Al dividir un núcleo de U^{235} , los fragmentos son núcleos de bario y de criptón.

El hecho que la emisión de neutrones había sido observada no significaba necesariamente que la bomba atómica estuviese a la vista. Pero muy pronto aquella comunidad de científicos extranjeros comenzó a ejercer una voluntaria censura sobre las publicaciones de su trabajo, y Fermi fue a Washington e insinuó a funcionarios de la U. S. Navy la posibilidad que los Estados Unidos comenzasen a desarrollar la energía nuclear. Entonces, a principios del verano de 1939, los científicos extranjeros se sintieron alarmados; con su especial sensibilidad al presagio de los acontecimientos en el extranjero, se dieron pronto cuenta del significado de los informes de Europa, en el sentido que los principales investigadores alemanes iban desapareciendo uno tras otro en los laboratorios del Káiser Wilhelm Institute en Berlín. Y había, además, informes que cantidades de uranio de las ricas minas de Checoslovaquia seguían el mismo camino.

Finalmente, en julio, el irreprímible Szilard, con su instinto por la medida oportuna, encontró la fórmula decisiva para lanzar una advertencia clara y resonante. Junto con su compatriota húngaro, el físico Eugene Wigner, persuadió al gran Einstein

para que dirigiese una carta al presidente Roosevelt. Esta carta, redactada entre Einstein y Szilard, hacía notar que el reciente trabajo de Szilard, Fermi y otros indicaba que una reacción nuclear en cadena podría ser posible, y sugería que el Gobierno proveyese fondos para acelerar los experimentos de escisión. Una nota de profecía trágica dominaba la comunicación: *«...podría llegar a ser posible producir una reacción nuclear en cadena, en una gran masa de uranio, con lo cual se generarían enormes cantidades de energía y de elementos semejantes al radio... Parece casi seguro que esto podría ser conseguido en un futuro inmediato. Este nuevo fenómeno conduciría también a la construcción de bombas, y es concebible, aunque mucho menos cierto, que así se fabricasen bombas de un nuevo tipo, enormemente potentes... ».*

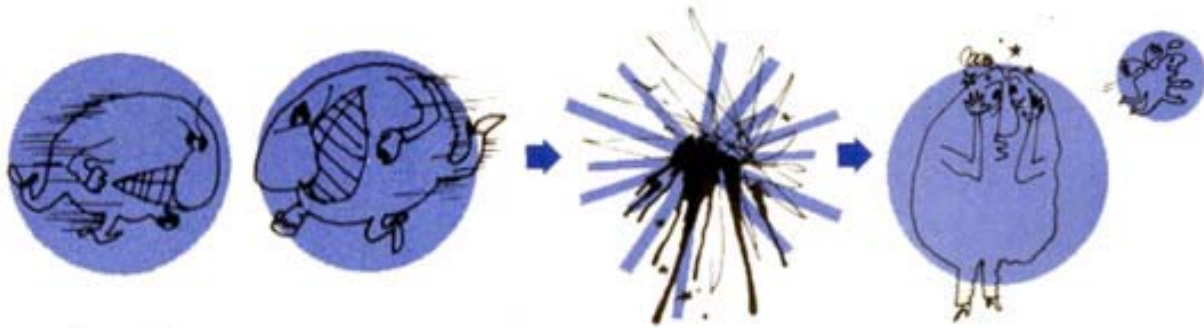
Se necesitaron seis meses de agitación a cargo de los científicos extranjeros para conseguir que la burocracia de Washington proporcionase 6.000 dólares para permitir a Fermi comprar el grafito que dijo que necesitaba para construir algo que llamaba una «pila», fuese aquello lo que fuese.

Usos de una cancha de squash

Y, por una u otra razón, se necesitaron casi tres años y un millón de dólares antes que Fermi y su equipo, reunidos, el 2 de diciembre de 1942, en una abandonada cancha de squash de la Universidad de Chicago, sacasen lentamente una barra de control y por vez primera en la historia se iniciase una reacción en cadena que se mantenía por sí misma. Este extraordinario hecho aconteció en el interior de la llamada pila de Fermi: un simple montón de bloques de grafito, óxido de uranio y uranio puro. Incluso con una pila atómica en funcionamiento la cuestión de si se podía construir una bomba atómica estaba lejos de ser resuelta. El verdadero «secreto» de la bomba atómica se encontraba en la naturaleza peculiar de los átomos de uranio. Niels Bohr y un compañero americano, John Wheeler, habían efectuado en Princeton estudios teóricos que indicaban que no era el isótopo común de uranio, de peso atómico 238, el que se escindía bajo el bombardeo lento de neutrones, sino un isótopo más ligero, el uranio 235.

FUSIÓN: UN ASUNTO CANDENTE ENTRE DOS HIDRÓGENOS

La fusión es en esencia lo opuesto a la escisión: dos núcleos ligeros se sueldan entre sí formando un núcleo más pesado, según se ilustra más abajo. Pero el núcleo fusionado no es exactamente tan pesado como los dos ligeros juntos. La fusión libera enormes cantidades de energía, pero sólo se produce a temperaturas elevadísimas. El uso en la práctica de la energía de fusión tiene que esperar el desarrollo de algún medio de mantener las temperaturas de la bomba-H, en el interior de una planta de producción de energía.



En la reacción de fusión dos pesos ligeros atómicos, los isótopos del hidrógeno, deuterio y tritio, chocan en el estado de plasma; al reunirse en un solo núcleo los protones y los neutrones de dos núcleos distintos, se libera energía y parte de su peso total se pierde. Finalmente, se expulsa un neutrón sobrante, y se forma un núcleo de helio estable como producto final de la transformación termonuclear.

Este último se encuentra normalmente en la naturaleza mezclado con el uranio 238 en la proporción de una parte en 140. Puesto que los dos isótopos son químicamente idénticos, la mejor manera de separar el U-235 del U-238 era un proceso físico que utilizase la diferencia de tres unidades de su masa.

Los científicos del Proyecto Manhattan (como se llamaba al programa de construcción de la bomba) ensayaron diversas técnicas. La que en definitiva tuvo más éxito fue el proceso de difusión gaseosa. Ésta consiste en formar un compuesto gaseoso de uranio, llamado hexafluoruro de uranio, y proyectarlo por bombeo contra una barrera formada por placas provistas de millones de pequeños agujeros, de unas dos millonésimas de centímetro de diámetro. Según un principio de física bastante complejo, las moléculas que contienen los más ligeros átomos de U-235 tienden a pasar por los agujeros con algo más de facilidad que las que llevan al más pesado U-238. Este proceso, repetido en miles de etapas, va filtrando

progresivamente un hexafluoruro gaseoso de uranio de una concentración de más del 90% de átomos de U-235. Para el programa de la bomba atómica se construyó en Oak Ridge, Tennessee, una gigantesca planta de difusión, con un costo de 500 millones de dólares.

Un papel paternal para el uranio

No obstante, los físicos habían entre tanto encontrado otro material que se podía escindir. No se hallaba en la naturaleza, pero podía ser obtenido como producto secundario de la escisión del uranio en un reactor del tipo del de Fermi. Si se desprendían muchísimos neutrones de la escisión de átomos de U-235, actuarían sobre el no escindible U-238, de tal modo que lo transmutarían en un elemento artificial llamado neptunio.



TRIPLE AMENAZA NUCLEAR. La bomba-H es un artificio en tres etapas, de escisión-fusión-escisión. Según se ilustra, su detonación se inició haciendo estallar cargas de TNT que juntan suficiente U-235 para iniciar una reacción en cadena controlada. El repentino chaparrón de neutrones (azul medio) y la elevadísima temperatura de la explosión atómica resultante actúan sobre los átomos de litio 6 y de deuterio del cilindro Central, el litio se convierte en tritio, el cual, mezclándose con el deuterio a elevadísimas temperaturas, forma plasma. Las partículas de plasma se fusionan formando helio 4 en una explosión termonuclear que libera más neutrones (blanco). Al bombardear el forro de U-238 de la bomba (azul cloro) ocasionan una reacción final de escisión.

La mitad de este neptunio se desintegraría espontáneamente en 2 ó 3 días, dando otro elemento, plutonio, el cual podía ser extraído químicamente de su antecesor uranio. Resultó que en una reacción de neutrones rápidos, como los de la bomba atómica, el plutonio era aún más escindible que el U-235.

La producción de plutonio se convirtió entonces en una cuestión de prioridad en el programa de la bomba atómica, ya que el proceso de separación del U-235 aparecía lento y complicado. A orillas del río Columbia en Hanford, Washington, se construyeron tres grandes reactores, cada uno de los cuales estaba diseñado para producir aproximadamente unos doscientos gramos de plutonio por día. Para eliminar el enorme calor desarrollado por esos reactores, se hacía pasar a su través el agua del río Columbia, que luego se devolvía al mismo.

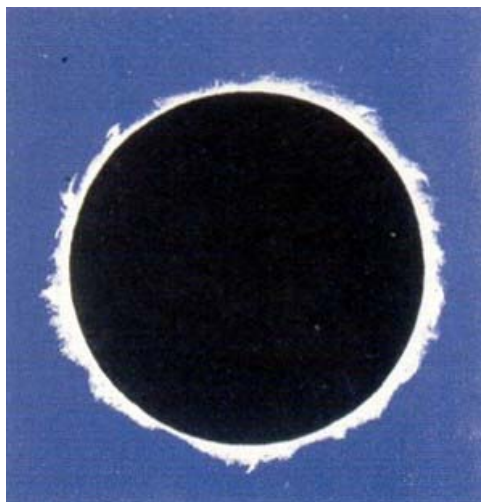
Para que la escisión ocurra espontáneamente en el U-235 o en el plutonio, el trozo de material debe exceder cierto tamaño, o «masa crítica». Si el pedazo es demasiado pequeño, se escapan por los lados demasiados neutrones antes de encontrar un átomo que escindir. El método que se ideó para detonar la bomba consistía en exceder la masa crítica, bien juntando muy rápidamente dos o más trozos de material escindible, o comprimiendo una bola hueca del mismo material. Para llevar esto a cabo se acostumbra utilizar cargas de explosivos corrientes en el interior de la bomba.

Debut en el desierto

Después de cinco años de frenético trabajo, que comprendió la construcción de tres ciudades secretas, la movilización de medio millón de personas y un gasto de dos mil millones de dólares, se hizo estallar la primera bomba de escisión del mundo en lo alto de una torre, en una bien vigilada porción del desierto, cerca de Álamogordo, Nuevo México. Se trataba de un artificio macizo, que pesaba cuatro toneladas, cuyo violento corazón era una brillante esfera de plutonio del tamaño de una pelota de baseball. Por medio de una potente carga explosiva se comprimía la esfera hueca hasta que se alcanzaba la densidad crítica para una reacción en cadena que se mantuviese a sí misma. Entonces, en menos de una millonésima de segundo, el

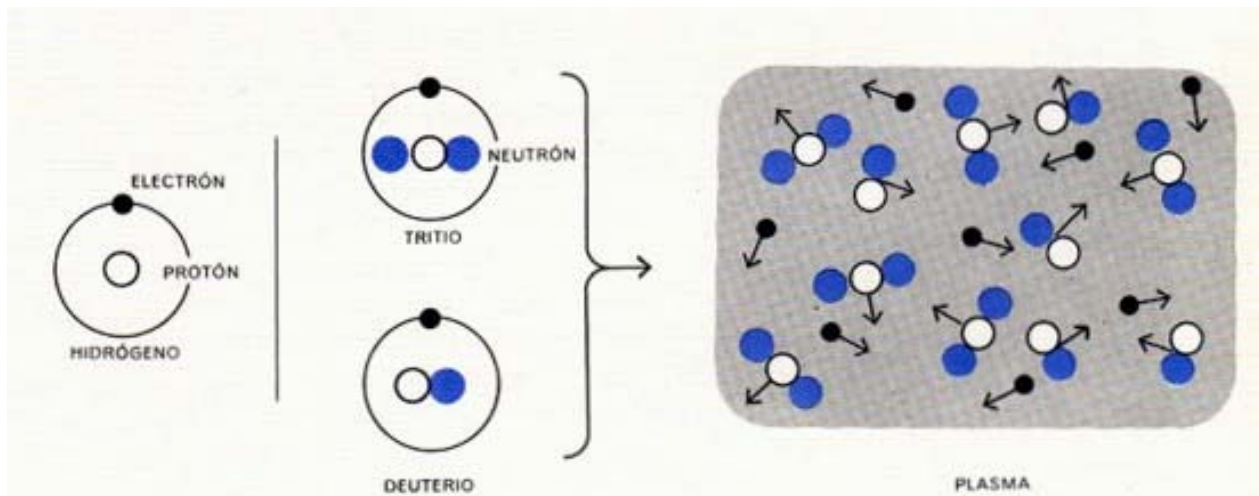
sólido metal se convirtió en una explosión gaseosa a varios millones de grados, como si un trozo de sol hubiese descendido sobre la tierra.

Las bombas sobre Hiroshima y Nagasaki desempeñaron su terrible objetivo y aceleraron el final de la guerra. Una vez hecho esto, la mayor parte de los científicos e ingenieros del Proyecto Manhattan se sintieron felices de volver a la enseñanza, la investigación pura, o la industria. Los experimentos continuaron para convertir la reacción en cadena a la función beneficiosa de producir corriente eléctrica; con el tiempo entraron en funcionamiento reactores para la producción de energía en Gran Bretaña y en ciertas regiones de elevado coste de energía de los Estados Unidos. La ciencia médica se ha beneficiado de la nueva profusión de isótopos radiactivos, que han resultado ser útiles tanto como fuente de radiaciones para tratar tumores malignos, como en función de «trazadores» que pueden ser seguidos por medio de instrumentos durante su curso a través de los órganos del cuerpo. La industria los utiliza también como trazadores e incluso para alterar las características de ciertos materiales, como los plásticos. El efecto de la radiación, al determinar mutaciones genéticas, si bien es en general considerado como uno de los más deplorables aspectos de la era atómica, encuentra a veces usos beneficiosos.



UN CALIENTE HALO DE HIDRÓGENO. El aparentemente sólido sol es en realidad una bola de plasma gaseoso opaco, principalmente de hidrógeno. Su núcleo interno está en constante estado de fusión, convirtiéndose el hidrógeno en helio con liberación de enormes cantidades de calor y de luz. Generalmente la naturaleza gaseosa del sol no es perceptible pero en un eclipse solar aparece su halo.

Pero ahora sabemos que la idea optimista de que la energía atómica pudiera ser permanentemente relegada a un uso pacífico, dedicado exclusivamente a la mejora de la vida humana, no fue sino una ilusión pasajera. Las crecientes tensiones de la guerra fría pronto hicieron necesaria otra reunión de talento y mano de obra para la fabricación de bombas. Y esta vez la movilización se debía al conocimiento de otra fuente de energía.



DE ISÓTOPOS A IONES Y A ENERGÍA. Los diagramas representan (1) los isótopos de hidrógeno; (2) su ionización formando plasma; (3) la fusión de sus iones plasma en las reacciones termonucleares. El átomo de hidrógeno corriente (extremo izquierda) tiene un protón, un electrón y ningún neutrón. Con dos neutrones en su núcleo se le conoce como tritio, pero con sólo un neutrón se le llama deuterio. La ilustración gris muestra el caótico movimiento de los núcleos de tritio y de deuterio en estado de plasma: a las temperaturas elevadísimas o «estelares» del plasma, los electrones saltan de sus órbitas, dejando solos a los núcleos como iones positivos.

Hasta bien entrado el presente siglo, la física se ocupaba únicamente de los tres estados en que la materia se encuentra corrientemente en la tierra, sólido, líquido y gaseoso. Pero se cree que la mayor parte de la materia del universo existe en una cuarta forma, material violento relativamente raro en la experiencia humana. Le llamamos plasma, nombre que le dio en 1920 uno de los primeros exploradores de sus propiedades, el científico americano Irving Langmuir, ganador del Premio Nobel. Como ya se ha observado anteriormente en estas páginas, el estado de una sustancia determinada a una presión determinada depende directamente de su

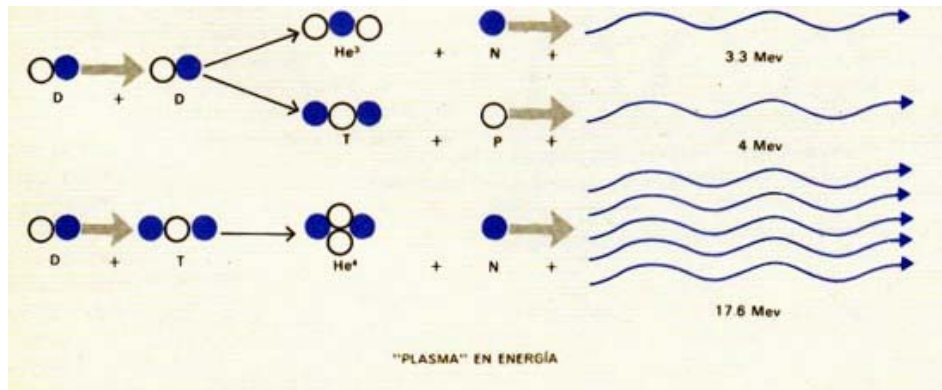
temperatura. A medida que aumenta la temperatura, el hielo se convierte en agua y el agua en vapor. Finalmente, si se aplica mucho calor, el movimiento de las moléculas de H_2O llega a ser tan violento que empiezan a destrozarse entre sí, formando iones con carga eléctrica. Esta ionización es en realidad el mismo proceso que observamos en el capítulo 6 en los gases del interior de los tubos Crookes de J. J. Thomson.

El plasma es, por lo tanto, una masa movediza de partículas calientes con carga eléctrica, electrones libres que llevan una carga negativa, e iones de carga positiva, siendo el conjunto eléctricamente neutro. Algunas sustancias requieren más calor que otras para ionizarse, pero el fenómeno generalmente no comienza hasta que las temperaturas llegan por lo menos a unos $3.000^{\circ}C$ y no funciona a toda marcha hasta llegar a unos $55.000^{\circ}C$. Incluso entonces las partículas continúan recombinándose espontáneamente; así, pues, generalmente se encuentran átomos neutros junto a las partículas de plasma cargadas.

La materia prima de las estrellas

El plasma se extiende por todo el universo en diversos grados de concentración. Es la materia prima de la cual están hechas las estrellas y llena el espacio entre todos los cuerpos celestes con una delgada matriz que late y palpita con extrañas ondas y corrientes. Salvo en las estrellas, su consistencia es más tenue que el mayor vacío conseguido por el hombre.

A pesar de la furia que se atribuye a su ígnea temperatura, el plasma es casi demasiado delicado para existir en este frío y estrecho rincón del universo que llamamos la tierra. Aquí se le acostumbra a encontrar solamente en lugares tan inhospitalarios como el corazón de los relámpagos, la aurora boreal, y en los arcos eléctricos. En condiciones terrestres normales, las partículas del plasma, en su frenética agitación, chocan con las lentas moléculas de sus fríos alrededores y pierden su energía. No obstante, este estado no terrestre de la materia está tan lleno de presagios para el futuro del hombre que en recientes años su investigación se ha convertido en uno de los mayores programas de estudio de las ciencias físicas.



También se muestran dos clases de reacciones de fusión de plasma: encima, dos iones de deuterio (D) se fusionan formando, o bien un isótopo de helio (He^3) más un neutrón (N) y 3,3 Mev de energía, o un ión de tritio (T) más un protón (P) y cuatro Mev. En el diagrama de abajo, los iones de deuterio y de tritio se fusionan formando un isótopo de helio diferente (He^4) más un neutrón y 17,6 Mev de energía. El Mev es un millón de electrón voltios: como ejemplo digamos que una cerilla proporciona mil billones de Mev.

Ya en 1920 los científicos comenzaron a suponer que en el plasma de la incandescente masa del sol debía ocurrir alguna especie de reacción nuclear. De lo contrario, ¿cómo podía explicarse su inmensa y prolongada producción de energía? El profesor Hans Bethe, físico teórico nacido en Alsacia-Lorena, propuso como mecanismo dos tipos posibles de reacciones. En el curso de las reacciones los elementos que se unen transforman masa en energía, y las cinco milmillonésimas partes de esta energía, en forma de rayos solares, son interceptadas por la tierra. Se presentó entonces una idea horripilante, pero tentadora: ¿podía la reacción natural de fusión del sol ser repetida en la tierra? Según cálculos teóricos, tal reacción «termonuclear» liberaría tres y media veces más de energía por kilo que una reacción de escisión del uranio. Pero la joven investigación termonuclear se encontró pronto con un espinoso problema. En el comprimido corazón del sol los iones de hidrógeno ordinario se fusionan uniéndose a una velocidad apreciable, pero tal reacción sobre la tierra sería demasiado lenta para ser de utilidad. Pero resultó casualmente que existen dos isótopos de hidrógeno, llamados deuterio y tritio, que se fusionan rápidamente a temperaturas más bajas. El deuterio se encuentra en la naturaleza combinado con oxígeno en la llamada «agua pesada», y el tritio puede también ser obtenido por bombardeo del elemento litio con neutrones de un reactor atómico.

En 1954 el Gobierno de los EE.UU. había construido ya una planta gigantesca en las orillas del río Savannah, destinada a la manufactura de materiales para una bomba de hidrógeno. Dos años antes se había hecho detonar el primer «artificio termonuclear» en la Isla de Elugelab, en el Pacífico; la explosión consiguiente hizo desaparecer por completo la isla del mapa. Si bien los detalles son aún secretos, se sabe que este artificio termonuclear y las armas que le siguieron comprendían esencialmente una secuencia de tres reacciones: escisión, fusión, y de nuevo escisión. En la primera etapa se hace detonar una potente bomba atómica, para generar el calor necesario para la fusión, y al mismo tiempo para producir neutrones que actúan sobre un compuesto de litio, el deuterio de litio, produciendo tritio. En la segunda fase el deuterio y el tritio se fusionan, formando helio y liberando más neutrones de muy elevada energía. Finalmente, estos neutrones determinan que se escinda una envoltura de uranio 238. Es esta última etapa la que, no sólo representa de la mitad a los dos tercios de la energía total liberada por la bomba, sino que también produce el mortal fallout de las armas nucleares «sucias».

Un potente vaso de agua del grifo

Lo mismo que con la escisión, el estudio de la fusión recibió su primer impulso de la urgente necesidad militar, pero pronto respondió al interés de la aplicación pacífica. A medida que los científicos iban aprendiendo más acerca de cómo desarrollan el sol y las estrellas sus fantásticas energías de la fusión de diversos iones en el plasma, consideraron la consecución de una reacción de fusión mantenida (y controlada) como fuente de energía prácticamente ilimitada, que podría ser generada partiendo de un combustible tan prácticamente ilimitado como las aguas del océano.

Durante una docena de años, la cuestión de cómo conseguir la fusión controlada ha preocupado a miles de experimentadores de todo el mundo. Los Estados Unidos, la Unión Soviética, Gran Bretaña, Francia, Alemania y Japón, todos ellos han montado ambiciosos programas. Antes de 1958 casi todos los diversos esfuerzos nacionales eran de un secreto máximo. Pero uno tras otro los investigadores se encontraron con las mismas dificultades, y de común acuerdo se fueron suprimiendo las barreras del secreto, con la esperanza que los esfuerzos combinados de la ciencia

internacional conseguirían al final dominar el problema. Actualmente la busca de la fusión controlada representa uno de los principales ejemplos mundiales de cooperación científica internacional.

Lo mismo que en la bomba H, el objeto de la fusión controlada consiste en conseguir que los núcleos de hidrógeno se fusionen entre sí, formando núcleos de helio o de tritio, generando durante el proceso la enorme energía necesaria para mantener en marcha la reacción. En la bomba, los núcleos se juntan violentamente gracias a la fuerza brutal de una explosión de escisión atómica. Como evidentemente estaría fuera de lugar hacer estallar bombas atómicas en un laboratorio, la ciencia ha tenido que buscar otros medios de elevar las temperaturas hasta los cincuenta millones de grados, o más, necesarios para «encender» el combustible de la fusión.

El problema de la contención

El medio que en definitiva se utilizó fue el magnetismo, que podía al mismo tiempo calentar el plasma y contenerlo una vez caliente.

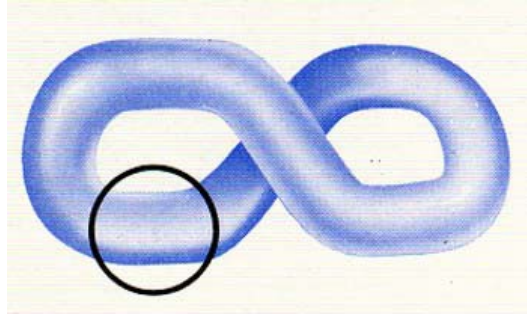
Lo difícil es contenerlo. No hay material terrestre que pueda ser mantenido a más de unos miles de grados sin que funda. A tal temperatura relativamente frígida, la pared de un envase de material helaría inmediatamente las partículas de plasma que entrasen en contacto con él, haciéndolas lentas e inútiles, y deteniendo la reacción antes de que pudiese realmente comenzar. Pero si se mantiene el plasma dentro de las fronteras invisibles de un campo magnético, no le será necesario nunca tocar paredes materiales que le enfriarían.

La idea más sencilla para controlar la fusión consistía en que el plasma generase su propio campo magnético, y se encerrase a sí mismo. Esta técnica utiliza lo que se llama el efecto de «pellizco». La idea consistía en hacer pasar electricidad a través de una columna de plasma en un tubo. Lo mismo que sucede cuando pasa corriente a través de un alambre, la electricidad produce anillos de líneas de fuerza magnética, como bandas de goma alrededor de la columna de plasma.

Las líneas tienden a comprimir la columna formando un núcleo más compacto y alejado de las paredes del tubo. Los primitivos experimentos consiguieron al principio este efecto, pero tan pronto como la columna de plasma se hizo

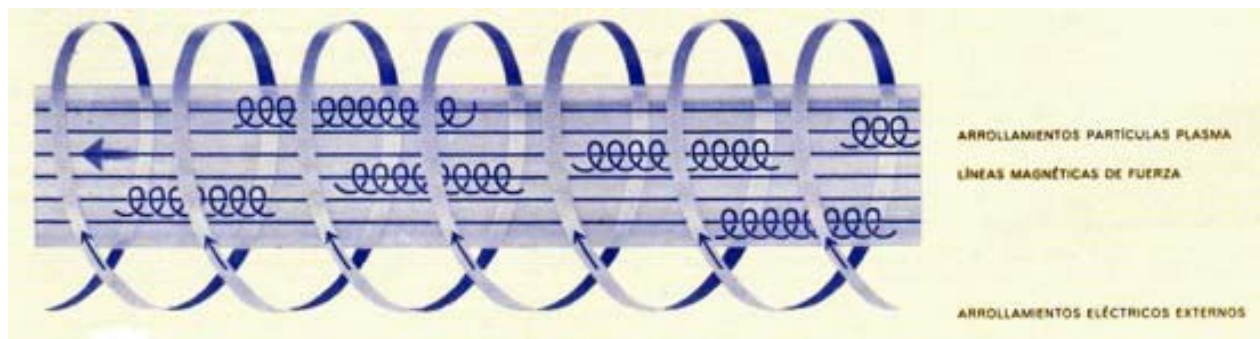
verdaderamente estrecha, comenzaba a retorcerse y doblarse, hasta que los retorcijos tocaban las paredes y enfriaban el plasma.

«BOTELLA MAGNÉTICA» PARA LA FURIA DE LOS NÚCLEOS EN FUSIÓN



DOMANDO UNA TEMPESTAD DE PLASMA. Para aprovechar la tremenda fuerza de la fusión atómica, los físicos del plasma han ideado un estelarator en forma de ocho (arriba). La parte rodeada de un círculo es la que se representa en detalle en la sección transversal de más abajo. En este artificio el plasma es «pellizcado» de modo que forme una estrecha corriente, por medio de grandes arrollamientos eléctricos, los cuales generan fuertes líneas de fuerza paralelas. Las partículas cargadas de plasma, generalmente caóticas, son así dominadas, y se mueven en pequeñas espirales alrededor de las líneas magnéticas. Pero incluso la mejor de estas botellas magnéticas pierde, el plasma salta, se dobla y se retuerce, saliéndose de sus espirales y yendo a tocar las paredes del estelarator. Cuando esto ocurre, el plasma se enfría de los 100 millones de grados necesarios para mantener la fusión, y en tal caso el proceso se detiene.

Era algo así como tratar de que un cordón para zapatos se mantuviese de pie. Desde entonces se han ensayado otras «botellas magnéticas», utilizando diversas e ingeniosas técnicas. Pero el inquieto plasma ha demostrado siempre un poco más de ingenio todavía, y ha encontrado nuevas maneras de escaparse.



La mayor parte de los científicos de fusión son sólo moderadamente optimistas acerca de si podrán alguna vez conseguir simultáneamente el calentamiento y la contención del plasma. No obstante, cada año que pasa los investigadores adelantan un poco más en el perfeccionamiento de sus máquinas, comprenden un poco mejor lo que ocurre, alcanzan una temperatura un poco más elevada, una contención algo mejor. Y una consecuencia valiosa de esta comprensión es el conocimiento de otros usos a que algún día pueda ser dedicado el plasma.

Un fascinador orden de ideas que ha producido toda una nueva tecnología ha sido llamado magnetohidrodinámica (afortunadamente abreviado a MHD). Definida estrictamente, la MHD es el estudio de los efectos dinámicos de los campos magnéticos sobre fluidos conductores de electricidad (como fluye, el plasma se define como fluido). Aunque la fusión controlada pueda estar aún muy distante, es muy posible que, gracias a la MHD, el plasma pueda ser de utilidad en las técnicas de generación de electricidad que utilizan combustibles convencionales. Los principios de la MHD podrán probablemente ser utilizados en los motores eléctricos para cohetes que algún día se utilizarán para propulsar ingenios espaciales. Los campos electromagnéticos expulsarían rápidamente el plasma por la parte trasera de la boquilla del cohete, impulsándolo así hacia adelante. Además, cuando un ingenio espacial vuelve a la superficie terrestre, genera a su alrededor un plasma, a medida que disipa su enorme velocidad entre las moléculas del aire. Así es que los científicos han estado estudiando la idea de equipar una nave espacial con nuevos y potentes imanes superconductores que «empujarían» al plasma exterior y así contribuirían a frenar y a mantener la nave en su curso de regreso a la tierra.

Pero, a pesar de todas estas ideas, hoy día los científicos no tienen sino un escaso conocimiento de este cuarto estado de la materia llamado plasma, lejos de ser suficiente para inspirar verdadera confianza de que esta tenue pero fogosa sustancia puede sujetarse a la voluntad del hombre.

Umbral del futuro

Incluso si el hombre consiguiese liberar la energía de fusión, no estaría sino en el umbral. En todas las reacciones hasta ahora conseguidas, el hombre solamente ha logrado utilizar una pequeña fracción de un uno por ciento de la energía potencial

del átomo, pequeño producto secundario de una redistribución de unos cuantos protones y neutrones. Si consiguiese convertir partículas enteras de energía, de una manera controlada y dirigida, el hombre podría extender su insignificante fuerza actual en proporciones literalmente astronómicas. Habría entonces poca cosa que no le fuera posible conseguir, desde modificar las condiciones climáticas del planeta, hasta lanzar otros planetas en nuevas órbitas alrededor del sol.

Si pensamos en el breve período de tiempo, menos que la vida de un hombre, durante el cual la inteligencia humana ha conseguido penetrar en el corazón del átomo y arrancarle una fracción de su poder, es difícil fijar el límite a lo que pueda ser conseguido en unas cuantas generaciones más. Los avances espectaculares de la ciencia en recientes décadas han superado todo lo que científicos como Rutherford hubieran nunca podido considerar posible. Pero, naturalmente, este hombre, que por vez primera contempló la extraña soledad del núcleo en el interior del reino del átomo, no tenía ni idea de la increíble complejidad de la ciudadela que fue el primero en conquistar. La impenetrable bola de billar ha sido reemplazada por una desconcertante comunidad de partículas cuya naturaleza y acciones mutuas constantemente contradicen la teoría. Cuando caigan finalmente los más profundos secretos del átomo, ¿quién es capaz de decir las posibilidades que aparecerán?

Sean cuales fueren los descubrimientos que nos esperan, es probable que continúe siendo cierta la descripción que del mundo de la ciencia dio Einstein hace casi un cuarto de siglo:

«...quienquiera que haya conocido la intensa vivencia de los afortunados avances realizados en este campo se siente lleno de profundo respeto por la racionalidad que aparece en la existencia. Gracias a esa comprensión consigue una trascendental emancipación de las cadenas de sus propias esperanzas y deseos, y alcanza así aquella humilde actitud mental hacia la grandeza de la razón encarnada en la existencia, y que, en su mayor profundidad, es inaccesible al hombre.»

La radiación: llave que inauguró la era atómica

A principios del presente siglo se produjo un cambio radical en las ideas del hombre sobre la estructura de la materia. Dos descubrimientos en el campo de la radiación desempeñaron un papel preponderante en esta revolución. En 1895, Wilhelm

Roentgen descubrió casualmente una radiación por completo diferente de los familiares rayos de calor y de luz. Sus rayos X, producidos por una corriente eléctrica en un tubo de vacío, eran invisibles e imperceptibles, pero podían lograr extraordinarias imágenes sobre las películas. El año siguiente trajo consigo un descubrimiento aún más importante: la radiactividad, propiedad de ciertos elementos que emiten radiaciones en forma de energía o de materia.



REVELACIONES DE LOS RAYOS-X. El público se enteró de la existencia de los rayos X y del hecho que podían penetrar en la carne gracias a fotografías como ésta, tomada en febrero de 1896 por el profesor Michael Pupín, de la Universidad de Columbia. Los puntos negros de la imagen, perdigones incrustados en lo mano, no son defectos de la película, sino efecto de un accidente de caza

La contribución de los rayos X y de la radiactividad a la fundación de la moderna era científica fue enorme. Ahora es evidente que las fuerzas de radiación constituyen uno de los principales factores de la era atómica.

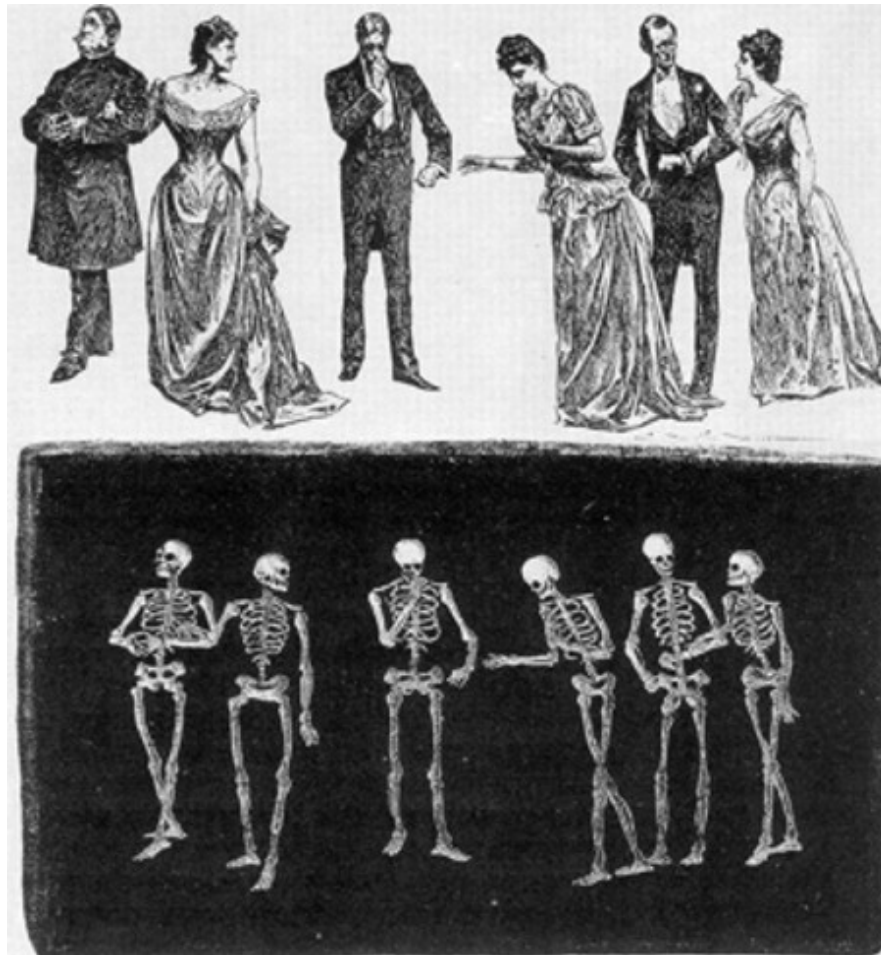
Los rayos X, fuente de diversión y asombro

Los nuevos y extraordinarios rayos X del profesor Roentgen despertaron el asombro de Europa y América. La idea de ver lo invisible era irresistible, y como el tubo de rayos catódicos en el cual se producían era un elemento corriente en el instrumental

de los laboratorios, cientos de científicos se convirtieron de la noche a la mañana en “expertos” en rayos X.

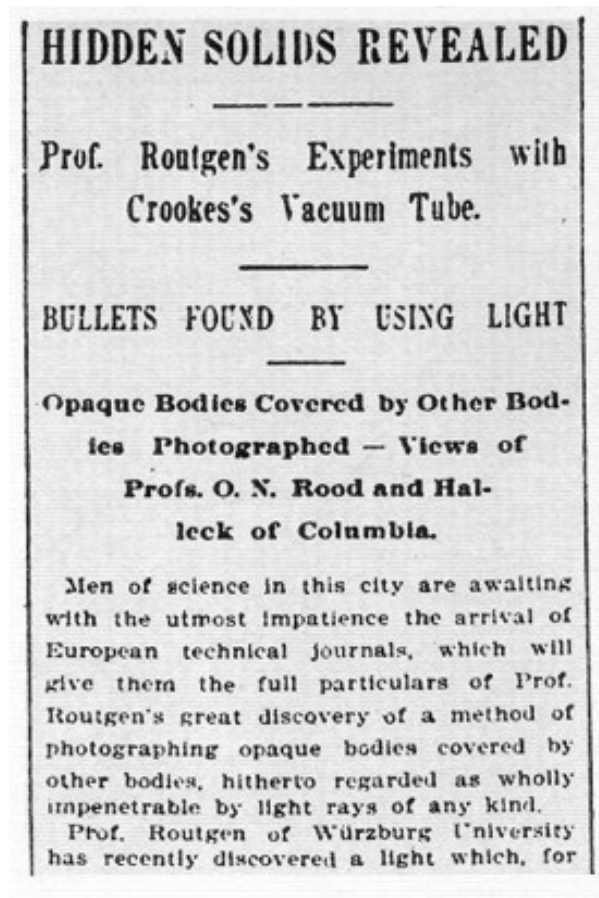
HACIENDO BROMA DE UNA NUEVA MODA

La fascinación ejercida por los rayos X sobre el público proporcionó motivo de gran diversión a las publicaciones tanto de Europa como de los EE.UU. La revista humorística americana Life publicó esta burlesca fotografía de rayos X en 1896. Al año del descubrimiento de Roentgen se habían publicado 1.000 libros, artículos y fotografías sobre el tema



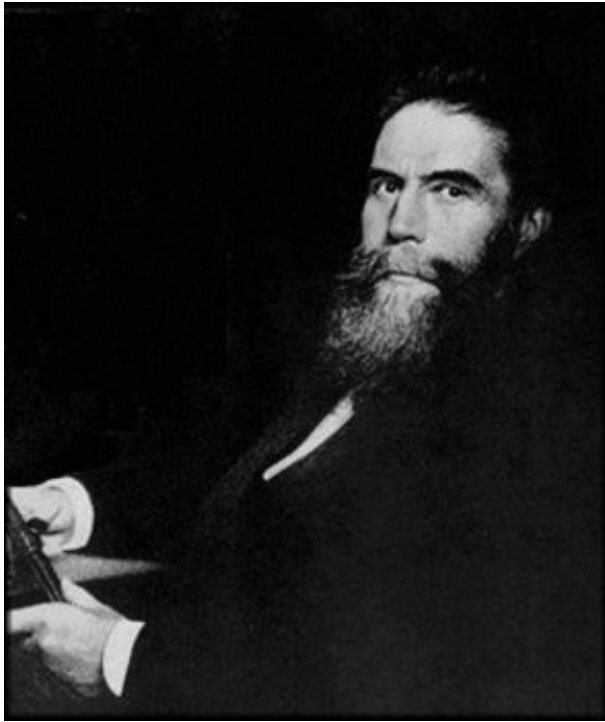
Para aquellos de nuestros lectores a quienes les gusta profundizar en las cosas, publicamos estos dos grabados. Son interesantes por mostrar las posibilidades del arte del futuro desarrollado por la fotografía de vanguardia. Hemos elegido un conocido dibujo de LIFE para ilustrar lo que queremos decir.

Imágenes espectrales de pies y manos aparecieron, por todas partes en los diarios, así como en chistes y caricaturas. Una firma de Londres anunciaba “ropa interior a prueba de rayos X, ninguna dama segura sin ella”.



EL IMPACTO DE UNA NOTICIA. El New York Times publicó la noticia del descubrimiento de Roentgen el 16 de enero de 1896 (y escribió mal su nombre). Algunos científicos hubiesen podido pretender prioridad en el descubrimiento, si hubiesen sido más observadores. A. W. Goodspeed, de Filadelfia, mostró una fotografía de rayos X que había hecho accidentalmente seis años antes.

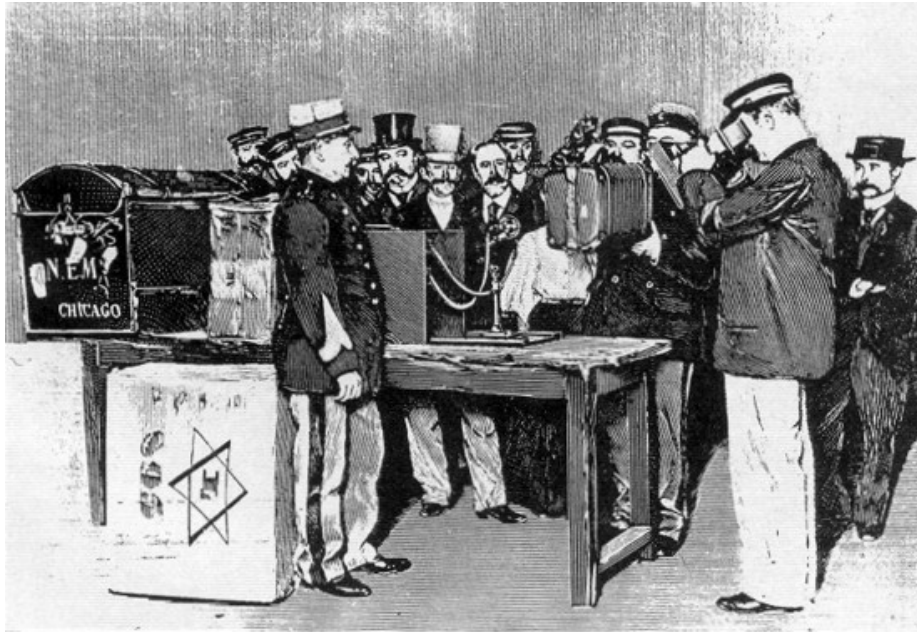
No obstante, muchos médicos encontraron inmediatamente una utilización práctica para los rayos X, y se emplearon también en otros ingeniosos usos. Lo malo fue que en aquellos primeros días pocas personas se dieron cuenta de lo peligrosos que eran los rayos X y otros rayos. Pasaron años antes que el mundo advirtiese la trascendencia del rayo de "nueva especie".



HÉROE DE LA CIENCIA UN POCO A DESGANA. Wilhelm Conrad Roentgen era un profesor de la Universidad de Würzburg, donde se encontró con los rayos X al observar que hacían resplandecer material fluorescente. Al publicar sus observaciones se convirtió en un héroe nacional de la noche a la mañana. Fue condecorado por el emperador Guillermo II, pero rechazó un título ofrecido por el Príncipe de Baviera.



«MIRANDO» UN HUESO ROTO. Una de las primeras veces que se utilizaron en medicina los rayos X, fue el 3 de febrero de 1896 en Dartmouth College, por el doctor Gilmon Frost (derecha) y su hermano el doctor Edwin Frost. La primitiva instalación consistía en una batería, un tubo de rayos catódicos (iluminado), una bobina de inducción y una película (bajo el brazo del muchacho).



«MIRANDO» A TRAVÉS DEL EQUIPAJE». Esta fotografía, tomada en agosto de 1897, muestra a empleados de aduana franceses utilizando un fluoroscopio para «ver» a través del equipaje de los viajeros. Un fluoroscopio tiene una pantalla recubierta de un material que resplandece bajo los rayos X. El uso fluoroscópico de los rayos X fue perfeccionado poco después del descubrimiento de Roentgen.

Radiactividad, y la familia que le siguió la pista hasta el fin

En París, en 1896, Henri Becquerel observó que el uranio, sin estímulo externo, emitía radiaciones que revelaban una película lo mismo que los rayos X.



Pierre Curie, profesor en la Sorbona.

Así se descubrió la radiactividad, y se iniciaron las extraordinarias carreras de Pierre y Marie Curie, quienes por tal descubrimiento compartieron un Premio Nobel con Becquerel. Los Curie continuaron una investigación más a fondo, y en el año 1898 descubrieron el radio y el polonio, los elementos más radiactivos entonces conocidos. Marie ganó otro Premio Nobel, la única persona laureada dos veces.



UN ROSTRO DE «TERRIBLE PACIENCIA». El rostro de Marie Curie, intenso pero sereno, refleja lo que su hija Eve llamó la «terrible paciencia» que demostró durante sus tediosos experimentos sobre el radio. Eve, la única de la familia que no ha sido científica, escribió la biografía de su madre, y describió sus talentos como física, química, obrera especializada, ingeniera y peón, al mismo tiempo.

La hija y el yerno de los Curie, Irène y Frédéric Joliot-Curie, siguieron el mismo camino y consiguieron nuevos honores por su trabajo en radiactividad. El precio de estas contribuciones fue elevado: Marie, Irene y Frédéric murieron víctimas de los efectos de la radiactividad.



ACLAMACIONES DE AMÉRICA. Marie e Irène Curie junto al presidente Warren G. Harding durante una ceremonia en 1921, en la cual les ofreció un gramo de radio para sus experimentos. El dinero para comprar el radio, que entonces valía US\$ 100.000 por gramo, había sido recogido en una campaña de Mrs. William Brown Meloney (extremo izquierdo), redactora de un diario de Nuevo York.



HONORES DE SEGUNDA GENERACIÓN. Irène y Frédéric Joliot-Curie reciben el Premio Nobel de Química para 1935 de manos del rey de Suecia, Gustavo V, por su trabajo en la producción artificial de elementos radiactivos. A Irène le fue más tarde concedida la Legión de Honor francesa, en 1939. Como Pierre y Marie Curie no tenían descendiente masculino, su yerno añadió el nombre Curie al propio.

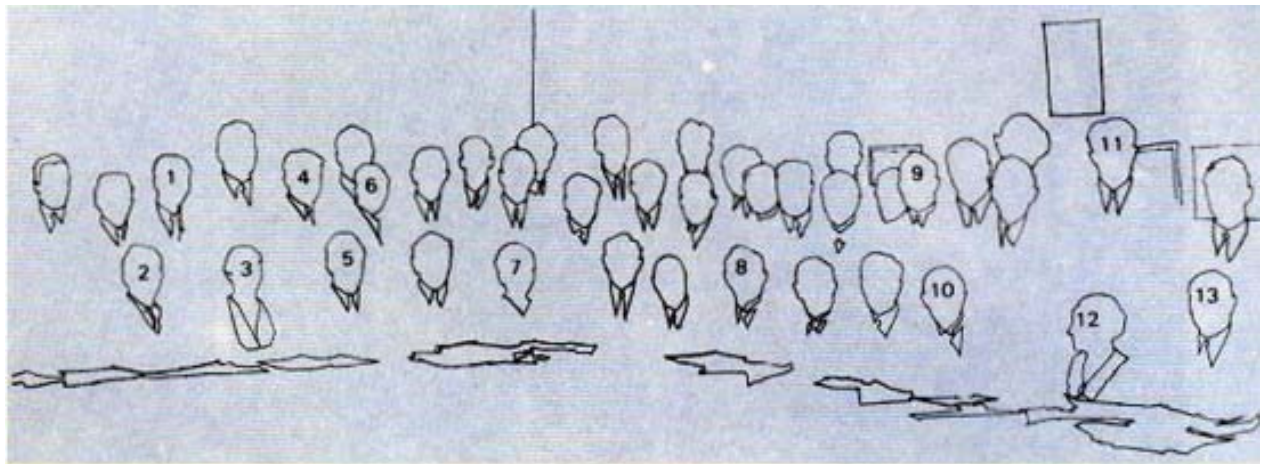
Una generación de genios inicia una nueva era

El descubrimiento de los rayos X y de la radiactividad presentó a los físicos un problema complicado. En el concepto del átomo como pequeña y compacta bola de billar, no había lugar para misteriosas emisiones. Pero la radiación recién descubierta era precisamente una proyección de energía y materia.

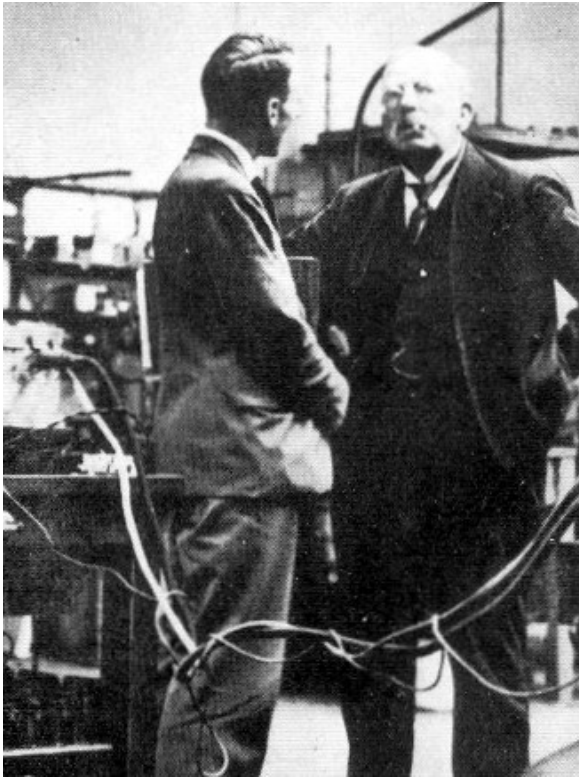
Los científicos de todos los países se pusieron a trabajar en el problema. En América, Thomas Edison y otros indagaron nuevas técnicas de rayos X. En Inglaterra un neozelandés llamado Ernest Rutherford condujo a los científicos ingleses a éxitos deslumbradores. En 1911 descubrió el núcleo y propuso un nuevo concepto estructural del átomo que es válido aún hoy. Esto preparó el camino para los grandes adelantos en física atómica realizados por hombres tales como el danés Niels Bohr. También en 1911, la radiación fue el tema de una conferencia internacional en Bruselas. Otra conferencia en 1933 sobre el tema del núcleo, reunió a muchos de los científicos que dirigían la marcha hacia la era atómica. En 1938 dos químicos alemanes abrieron la puerta de la era al dividir el átomo del elemento radiactivo uranio.



REUNIÓN TACHONADA DE ESTRELLAS. El Instituto Solvay de Bruselas ha congregado prestigiosas reuniones científicas internacionales desde que fue fundado por un filántropo belga en 1912. La conferencia de 1933 reunió un grupo particularmente eminente, encabezado por el físico francés Paul Langevin, y que incluía a 20 premios Nobel. Se pueden identificar trece científicos cuyas realizaciones se citan en este libro.



Frédéric Joliot-Curie (11), Erwin Schrödinger (7), Irène Joliot-Curie (13), Werner Heisenberg (4), Niels Bohr (5), Enrico Fermi (4), Marie Sklodovska Curie (7), Lord Rutherford (4), SIR John Douglas Cockcroft (9), Príncipe Luis Víctor de Broglie (10), Ernest Orlando Lawrence (11), Lise Meitner (12), Sir James Chadwick (13)



«EL VIVERO DE GENIOS». Éste fue el nombre que se daba al Laboratorio Cavendish de Cambridge, Inglaterra, donde Ernest, más tarde Lord, Rutherford (derecha) presidió durante 18 brillantes años. Cavendish fue al principio del siglo XX una inspiración para la ciencia, y no menos de 10 premios Nobel trabajaron entre sus paredes.



PIONEROS EN LAS TÉCNICAS DE RAYOS X. W. D. Coolidge muestra a Thomas Edison, en Schenectady, Nueva York, una máquina para la fabricación de filamentos de tungsteno con destino a los tubos de rayos X. Al descubrir la manera de hacer flexible el tungsteno, Coolidge, en 1913, hizo posible el moderno tubo de rayos X. En lo que trabajó también Edison.

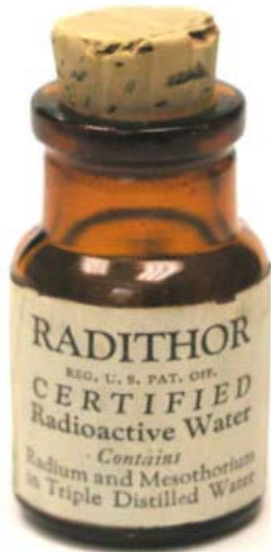


LA VANGUARDIA DE LA ENERGÍA ATÓMICA. Otto Hahn y Fritz Strassmann junto a la mesa de trabajo donde dividieron el núcleo del uranio en 1938. Afortunadamente para los aliados en la segunda Guerra Mundial, los alemanes no la explotaron; los físicos que estaban en América fueron los primeros en convertir una escisión nuclear en una bomba atómica.

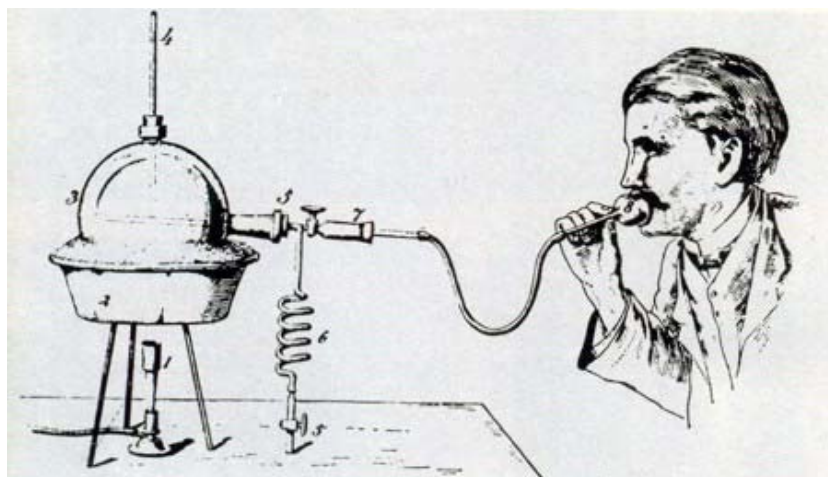
Una fuerza oscura y peligrosa

La naturaleza mortífera de los rayos X y de la radiactividad fue tan poco comprendida al principio, que el hombre pagó un triste precio para descubrir lo poderosa que era la fuerza que había desencadenado. No fue sino hasta mediados los años 1920 que se difundió el conocimiento de qué los rayos X y los rayos alfa, beta y gamma de la radiactividad podían destruir los tejidos de la carne y de los huesos y producir aberraciones genéticas. Ignorando estos hechos, los hombres se exponían inconscientemente a la mutilación y a la muerte. Incluso el gran Thomas Edison ignoraba el peligro: su ayudante Clarence Dally murió en 1905 debido a la exposición sufrida en innumerables experimentos con rayos X. Muchos aclamaron al radio como el gran “sanalotodo”. Se introdujo en específicos con espantosos resultados y fue tratado con un descuido trágico, con frecuencia fatal. Incluso en 1954, lo que el hombre aprendiera de los peligros de la radiación a costa de tan duras lecciones, no fue suficiente para evitar desgracias.

Hoy en día, lejos de haber sido resuelto, el peligro de la radiación aparece cada vez mayor a medida que la energía atómica se utiliza cada día más en usos tanto pacíficos como militares. Toda escisión nuclear crea productos secundarios radiactivos.



UNA PANACEA MORTÍFERA. Radithor, específico liquido que contenía sales radiactivas, se vendía como cura "inofensiva" para más de 160 enfermedades. Pero cuando en 1932 un hombre de negocios sufrió una muerte lenta y horrible después de haber bebido varias botellas diarias durante cuatro años, la indignación del público obligó al fabricante del Radithor a huir del país.



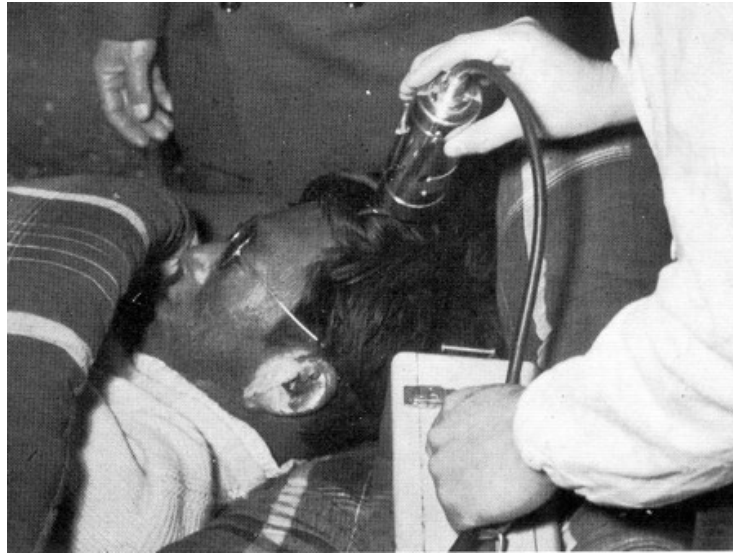
BARATIJAS Y CURANDERISMO. Los curanderos se apresuraron a aprovecharse de la radiactividad. Artefactos como este inhalador de torio eran anunciados como curatodo, que abarcaba desde el artrismo hasta la miopía. Un fanático doctor decía que el radio cumplía una profecía bíblica, e instaba a su uso. Le llamaba "la más suave y calmante medicina que el mundo haya conocido"



UNA TRAGEDIA DE LA IGNORANCIA. Ignorantes del peligro, estos técnicos ocupados en la purificación del radio se inclinan, sin ninguna protección, sobre grandes cápsulas abiertas que contienen sales de radio. Sin saberlo, están absorbiendo peligrosas dosis de radiación, las cuales, después de una continuada exposición a través de muchos años, ocasionarán al organismo daños irreparables.



ESPANTOSO LEGADO DE UNA BOMBA-H. La explosión nuclear de 1954 en Bikini, en el Pacífico, ocasionó mucho más «fallout» radiactivo de lo que se había supuesto. El viento trasladó el residuo «sucio» hasta un buque de pesca japonés y contaminó a su tripulación. Se produjo una muerte; si la nave hubiese estado más cerca de la explosión, los 23 hombres de la tripulación hubiesen también sucumbido.



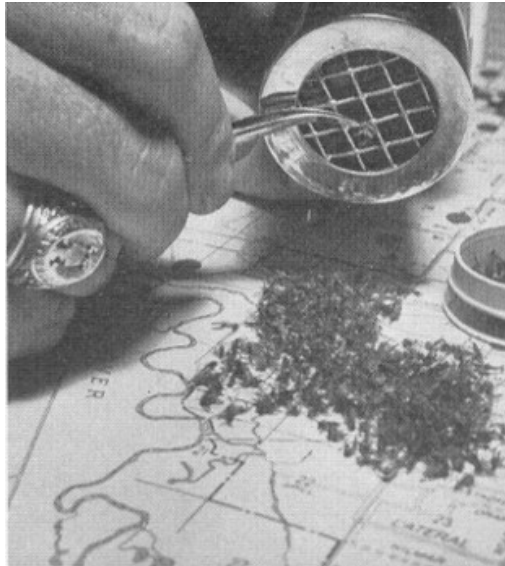
VÍCTIMA DE LA RADIACIÓN. Sanjiro Masouda, a quien se le está investigando la radiactividad con un contador Geiger, pasó 16 tristes meses en un hospital, después del error de Bikini. Se describió a sí mismo como «un gran gusano en proceso de putrefacción». Cada marinero cobró US\$ 4.500 de los EE.UU. Los japoneses tuvieron que desechar 100.000 kilos de pescado.

Una fuerza beneficiosa y brillante

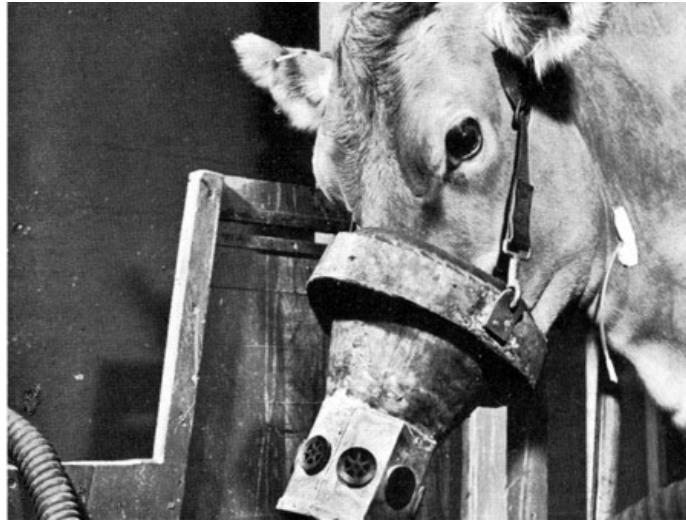
A pesar de todos sus aspectos siniestros, la radiación no es del todo obra del diablo. Lo rayos X, por ejemplo, cuando son bien manipulados constituyen un auxiliar de la medicina, y hace mucho tiempo que se utiliza la radioterapia para tratar ciertas formas de cáncer y de ceguera. Un uso más moderno, y potencialmente aún más beneficioso, de la radiactividad es un trazador indiscreto que sirve para analizar procesos químicos complejos. Algunos elementos estables pueden reorganizarse atómicamente haciéndolos artificialmente radiactivos. Estas mutaciones se llaman radioisótopos, y cada una de ellos presenta una radiación característica que puede ser trazada e identificada con facilidad por medio de instrumentos tales como el contador Geiger. Cuando se añade una cantidad mínima de un isótopo al alimento de un animal o al fertilizante de una planta, aquél emitirá un informe continuo sobre el movimiento de su portador a través del proceso de crecimiento. Este “ojo” radiactivo se enfoca también sobre toda clase de problemas, desde el control de las plagas a las enfermedades del corazón.

Los radioisótopos se producen por escisión nuclear en una pila atómica, y la misma reacción productora de energía puede ser utilizada para iluminar ciudades o

impulsar las turbinas de naves. Ya se ha conseguido controlar lo suficiente la radiación para que estas operaciones sean perfectamente inocuas. Pero ya no estaremos nunca más libres de ella: es el latido de la era atómica.



SIGUIENDO LA PISTA A UN MOSQUITO. La radiactividad de estos mosquitos está siendo investigada por medio de un contador Geiger. Fueron criados en el Central Valley de California, en estanques tratados con radiofósforo, y en sus subsiguientes desplazamientos llevaron consigo ese isótopo hasta ser al fin capturados. Aquí se está identificando la característica radiación de dicho isótopo.



BUSCANDO LOS SECRETOS DEL CRECIMIENTO. A esta vaca parece no importarle, pero está "caliente". Le ha sido inyectada una sustancia nutritiva que contiene el isótopo radiocarbono, y ahora está exhalando dióxido de carbono que puede ser analizado. La velocidad a la que se exhala el trazador radiactivo muestra a qué ritmo el cuerpo de la vaca utiliza las sustancias que le fueron inyectadas.



AYUDA PARA EL CORAZÓN. El sapo de Bermuda excreta de una glándula del cuello una sustancia llamada bufagina, que es casi idéntica a la droga digital para el corazón. Alimentando al sapo con algas "calientes", los médicos consiguen que la bufagina sea radiactiva, y pueden luego utilizarla como trazador para contribuir a determinar los efectos de las drogas del tipo del digital.



ENERGÍA POTENTE Y SILENCIOSA. El submarino nuclear USS. "Patrick Henry" representa el sueño moderno de la energía de transporte. Su reactor atómico genera calor para producir vapor para sus turbinas. No se necesita oxígeno para el reactor. La nave puede permanecer sumergida semanas. Se está considerando el uso de la energía atómica para buques submarinos y naves de superficie.

Apéndice

Nuestro innecesario ló de pesos y medidas

El hombre mide el ancho y el largo, el peso y el volumen, el calor y el frío, por medio de patrones de comparación arbitrarios. Los primitivos egipcios medían el volumen líquido por lo que cabía en la boca; los ingleses medievales medían longitudes por la yarda, definida como la distancia desde la punta de la nariz del rey, al extremo de su mano. En el siglo XVIII, Francia adoptó el sistema métrico con tres unidades básicas: el metro (para la distancia), el litro (para el volumen) y el gramo (para el peso). El sistema métrico fue aceptado en el continente, lo mismo que la escala centígrada de temperaturas ideada por el astrónomo sueco Andrés Celsius, que fijó el punto de congelación del agua a 0° y su punto de ebullición a 100°C

Inglaterra siguió por un camino aparte arrastrando a sus colonias americanas; continuó sirviéndose de la escala Fahrenheit de temperaturas (según la cual el agua se congela a 32°F y hierve a 212°F), y de medidas tradicionales tales como la pulgada, el pie, la yarda, y una colección de rarezas. Los americanos utilizan aún 85 pesos y medidas diferentes; cadena, furlong, legua, gui, peck, bushel, dram, cord, dos clases de libra, tonelada, onza, cuarto y milla, entre otras.

Los intentos para convertir los EE.UU. al sistema métrico comenzaron en tiempos de George Washington y continúan hoy en día. El National Bureau of Standards utiliza ejemplares del metro y del kilogramo patrones internacionales (barras de platino e iridio) para comprobar nuestras propias medidas. Nuestros científicos utilizan el sistema métrico para ajustarse a la costumbre profesional universal. Esta tendencia, y los evidentes beneficios que reportaría al comercio exterior la unanimidad universal en los pesos y medidas puede aún obligar a que los EE.UU. se conviertan al sistema. Hasta que esto ocurra, serán necesarias tablas como la de abajo para evitar confusiones.

Métrico a métrico	Métrico a inglés	Inglés a métrico
Longitud	Longitud	Longitud
1 milímetro = 0,001 metro	1 milímetro = 0,03937 pulgadas	1 pulgada = 25,40 milímetros
1 centímetro = 0,01 metro	1 centímetro = 0,3937 pulgadas	1 pie = 30,48 centímetros
1 decímetro = 0,1 metro	1 decímetro = 3,937 pulgadas	1 yarda = 0,9144 metros
1 metro = 1.000 milímetros	1 metro = 39,37 pulgadas	1 milla = 1,609 kilómetros
1 metro = 100 centímetros	1 metro = 3,281 pies	
1 metro = 10 decímetros	1 decámetro = 1,094 yardas	
1 decámetro = 10 metros	1 hectómetro = 10,94 yardas	
1 hectómetro = 100 metros	1 kilómetro = 1,094 millas	
1 kilómetro = 1.000 metros		
Superficie	Superficie	Superficie
1 área = 100 metros cuadrados	1 área = 119,6 yardas cuadradas	1 yarda cuadrada = 0,8361 m. cuadrados
1 hectárea = 100 áreas	1 hectárea = 2,471 acres	1 acre = 0,4047 hectáreas
Volumen	Volumen	Volumen
1 centímetro cúbico = 1.000 milímetros cúbicos	1 metro cúbico = 35,31 pies cúbicos	1 pie cúbico = 28,32 decim. cúbicos
1 decímetro cúbico = 1.000 centim. cúbicos	1 metro cúbico = 1,038 yardas cúbicas	1 yarda cúbica = 0,7646 metros cúbicos
1 metro cúbico = 1.000 decímetros cúbicos		
Capacidad para sólidos y líquidos	Capacidad para sólidos y líquidos	Capacidad para sólidos y líquidos
(1 litro = 1 decímetro cúbico)	1 litro = 1,057 «quarts» líquidos	1 pinta de líquidos = 0,4732 litros
1 litro = 1.000 mililitros	= 0,908 «quarts» sólidos	1 pinta de sólidos = 0,5506 litros
100 centilitros	1 kilolitro = 264,2 galones	1 «quart» de líquidos = 0,9463 litros
10 decilitros	= 113,5 «pecks»	1 «quart» de sólidos = 1,1012 litros
1 kilolitro = 1.000 litros	= 28,38 «bushels»	1 galón = 3,785 litros
		1 peck = 8,8096 litros
		1 bushel = 35,24 litros
Masa (peso)	Masa (peso)	Masa (peso)
1 gramo = 1.000 miligramos	1 gramo = 0,03527 onza «avdp.»	1 onza «avoirdupois» = 28,35 gramos
100 centigramos	= 0,0322 onza «troy»	1 onza «troy» = 31,10 gramos
10 decigramos	1 kilogramo = 2,205 libras «avdp.»	1 libra «avoirdupois» = 0,4536 kilogramos
1 kilogramo = 1.000 gramos	= 2,679 libras «troy»	1 libra «troy» = 0,3732 kilogramos
1 tonelada métrica = 1.000 kilogramos	1 tonelada métrica = 1,1023 ton. cortas	1 tonelada corta = 0,9072 ton. métricas
	= 0,9842 ton. largas	1 tonelada larga = 1,016 ton. métricas

COMPARACIÓN DE SISTEMAS. En la tabla de conversiones de aquí arriba presentamos los equivalentes ingleses y métricos de pesos y medidas corrientes, En la columna de la izquierda se dan los equivalentes ingleses de las unidades métricas patrón; a la derecha se encuentran los equivalentes métricos de los patrones de medida ingleses. El sistema inglés tiene dos series de unidades de peso: las piedras preciosas, los metales preciosos y las drogas acostumbran a pesarse en las llamadas unidades troy; todos los demás productos se pesan en las unidades llamadas habitualmente ovoirdupois.

Rompe-átomos: una lista de campeones

El acelerador de partículas es a la física nuclear lo que el telescopio es a la astronomía. Las corrientes de partículas de elevada energía proporcionan la única manera de “mirar” al interior del núcleo del átomo, y la demanda por parte de los científicos de “ojos” cada vez más potentes ha estimulado la evolución de las técnicas de aceleración de los rompe-átomos. Hay dos grupos: los que aceleran partículas positivas y los que aceleran electrones de carga negativa.

La máquina de Cockcroft-Walton y la diseñada por R. J. Van de Graaff en la Universidad de Princeton a principios de 1930 fueron los primeros pasos de consideración hacia los actuales gigantes de gran energía. Luego vino el ciclotrón, la primera máquina en utilizar la misma estación aceleradora una y otra vez, y en comunicar acumulativamente energía a las partículas en órbita. Éstas se mueven

hacia afuera en espiral, partiendo del centro y con velocidades crecientes, moviéndose en un plano entre dos imanes macizos que proporcionan un campo de control constante. Una trayectoria espiral más larga determinaría mayores energías. El cosmotrón resolvió este problema gracias al uso de una trayectoria circular más bien que espiral. Los imanes, separados y más pequeños, solamente necesitan afectar la estrecha trayectoria de la órbita. La fuerza del campo no permanece constante sino que aumenta para compensar la creciente velocidad de las partículas en órbita. También el principio del enfoque ajustado proporciona más energía con menos peso de imanes. Al controlar la órbita de las partículas con más eficiencia, el enfoque ajustado ha hecho posible las potencias útiles de los sincrotrones de Ginebra y de Brookhaven.

Las cinco últimas máquinas de la lista están diseñadas para proporcionar electrones de elevada energía para investigación nuclear. El betatrón usa el mismo imán para constreñir las partículas y acelerarlas (todas las demás usan una fuerza aceleradora eléctrica). Los sincrotrones aceleran con eficacia los electrones hasta unas energías moderadamente elevadas, pero para energías muy elevadas el único aparato posible es el acelerador lineal, que no necesita imanes.

AÑO	NOMBRE	COSTO	PARTÍCULAS	TRAYECTORIA	ENERGÍA DE FUNCIONAMIENTO	IMANES	TIPO	CAMPO	OTROS DETALLES
1936	CICLOTRÓN DE 21 PULSADAS Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$50.000			deuterón alfa		IMÁN DE 21 TON DE 21 PULSADAS DE 21 TON	CAMPO CONSTANTE DE 21 TON	Es el primero construido y el primer ciclotrón experimental en 1932 a bajo voltaje de 9, 11 y 210 pulsadas, antes de construir las tres que aquí se muestran.
1939	CICLOTRÓN DE 90 PULSADAS Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$225.000			deuterón alfa		IMÁN DE 215 TON DE 90 PULSADAS DE 215 TON	CAMPO CONSTANTE DE 90 TON	El tipo de gran intensidad de este máquina sigue el mismo de partículas fue utilizado en el descubrimiento de estos elementos nuevos. Fue el primer descubrimiento.
1946	SINCRÓ-CICLOTRÓN Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$1.400.000			deuterón alfa		IMÁN DE 4.000 TON DE 400 PULSADAS DE 4.000 TON	CAMPO CONSTANTE DE 400 TON	Este ciclotrón, modificado para acelerar los iones al 100% de su velocidad de partículas a velocidades energéticas en otros dos los primeros puntos, que modificaron tanto el núcleo.
1952	COSMOTRÓN Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$7.000.000	PROTON		deuterón 10 años		IMÁN DE 2.000 TON DE 10 PULSADAS DE 2.000 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	El cosmotrón sigue en forma permanente en el estudio de los elementos y de las partículas de núcleo. Se han de muchos otros los estudios de partículas de núcleo.
1954	BETATRÓN Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$5.500.000	PROTON		deuterón 10 años		IMÁN DE 8.000 TON DE 10 PULSADAS DE 8.000 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Aquí también se ha alcanzado la máxima velocidad en gran escala y se han de las partículas de núcleo en el descubrimiento de las partículas de núcleo.
1957	SINCRÓTRON Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$34.000.000 \$100.000.000	PROTON		deuterón 10 años		IMÁN DE 14.000 TON DE 10 PULSADAS DE 14.000 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Se ha construido y se ha estado en funcionamiento en gran escala y se han de las partículas de núcleo en el descubrimiento de las partículas de núcleo.
1959	SINCRÓTRON DE PROTONES C.A.R.N. Ginebra, Suiza	\$35.000.000	PROTON		deuterón 10 años		IMÁN DE 1.000 TON DE 10 PULSADAS DE 1.000 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Este máquina, del "Centro Europeo para la Investigación Nuclear", con un nivel de la máxima parte del peso del del descubrimiento, tiene una energía de 10 años.
1960	SINCRÓTRON DE PROTONES DE GRADIENTE ALTERNADO Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$33.000.000	PROTON		deuterón 10 años		IMÁN DE 1.000 TON DE 10 PULSADAS DE 1.000 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	El Brookhaven 600, que es el primer acelerador de protones de 100-1000 MeV, con una energía de 10 años, y no ha alcanzado aún su potencial experimental.
ACELERADORES DE ELECTRONES									
1950	BETATRÓN Universidad de Illinois, Urbana, Ill.	\$1.500.000	ELECTRON		deuterón 10 años		IMÁN DE 100 TON DE 10 PULSADAS DE 100 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Este máquina, que se ha estado en funcionamiento en gran escala y se han de las partículas de núcleo en el descubrimiento de las partículas de núcleo.
1954	ACELERADOR LINEAL MARK III Universidad de Stanford, Stanford, Calif.	\$5.900.000	ELECTRON		deuterón 10 años		IMÁN DE 100 TON DE 10 PULSADAS DE 100 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Al principio el Mark III tenía una longitud de 200 pies, pero fue alargado en 1959. Se han de las partículas de núcleo en el descubrimiento de las partículas de núcleo.
1954	SINCRÓTRON DE CORRELL Universidad de Cornell, Ithaca, N.Y.	\$500.000 \$1.000.000	ELECTRON		deuterón 10 años		IMÁN DE 100 TON DE 10 PULSADAS DE 100 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Este acelerador, construido a las máquinas de partículas por electrones en el campo de partículas de núcleo, se ha construido, según se ha estado en funcionamiento.
1962	SINCRÓTRON DE CAMBRIDGE Harvard M.I.T., Cambridge, Mass.	\$12.000.000	ELECTRON		deuterón 10 años		IMÁN DE 100 TON DE 10 PULSADAS DE 100 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Este acelerador, construido a las máquinas de partículas por electrones en el campo de partículas de núcleo, se ha construido, según se ha estado en funcionamiento.
1967	ACELERADOR LINEAL DE DOS MILLAS Laboratorio de Stanford, Stanford, Calif.	\$114.000.000	ELECTRON		deuterón 10 años		IMÁN DE 100 TON DE 10 PULSADAS DE 100 TON	CAMPO DE 10 TON DE 10 TON	Este máquina, construido a las máquinas de partículas por electrones en el campo de partículas de núcleo, se ha construido, según se ha estado en funcionamiento.

ACELERADORES DE PARTÍCULAS POSITIVAS						
AÑO	NOMBRE	COSTO	PARTÍCULAS	TRAYEC-TORIA	ENERGÍA DE FUNCIONAMIENTO (MILLONES DE ELECTRÓN-VOLTS)	
1936	CICLOTRÓN DE 37 PULGADAS Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$50,000		 diámetro: 37 pulgadas	DEUTERÓN ALFA	8 16
1939	CICLOTRÓN DE 60 PULGADAS Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$225,000		 diámetro: 60 pulgadas	PROTÓN DEUTERÓN ALFA	12 24 48
1946	SINCRO-CICLOTRÓN Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$1,400,000		 diámetro: 184 pulgadas	PROTÓN DEUTERÓN ALFA He ⁺	735 480 915 1,140
1952	COSMOTRÓN (protón-sincrotrón) Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$7,000,000	PROTÓN	 diámetro: 75 pies		3,000
1954	BEVATRÓN (protón-sincrotrón) Universidad de California, Berkeley, Calif.	\$9,500,000	PROTÓN	 diámetro: 110 pies		6,300
1957	SINCROFASOTRÓN (protón-sincrotrón) Dubna, U.R.S.S.	cálculos oscilan entre \$34,000,000 y \$100,000,000	PROTÓN	 diámetro: 200 pies		10,000
1959	SINCROTRÓN DE PROTONES C.E.R.N. Ginebra, Suiza	\$35,000,000	PROTÓN	 diámetro: 456 pies		28,000
1960	SINCROTRÓN DE PROTONES DE GRADIENTE ALTERNO Laboratorio Nacional de Brookhaven, Upton, N.Y.	\$33,000,000	PROTÓN	 diámetro: 850 pies		33,000
ACELERADORES DE ELECTRONES						
1950	BETATRÓN Universidad de Illinois, Urbana, Ill.	\$1,500,000	ELECTRÓN	 diámetro: 9 pies		300
1954	ACELERADOR LINEAL MARK III Universidad de Stanford, Stanford, Calif.	\$6,900,000	ELECTRÓN	 longitud: 300 pies	1954 1960	700 1,000
1954	SINCROTRÓN DE CORNELL Universidad de Cornell, Ithaca, N.Y.	\$500,000 \$1,000,000	ELECTRÓN	 diámetro: 50 pies	1954 1963	1,400 2,200
1962	SINCROTRÓN DE CAMBRIDGE Harvard M.I.T., Cambridge, Mass.	\$12,000,000	ELECTRÓN	 diámetro: 236 pies		6,400
1967	ACELERADOR LINEAL DE DOS MILLAS Universidad de Stanford, Stanford, Calif.	presupuestado en \$114,000,000	ELECTRÓN	 longitud: 10,000 pies		20,000