



## Entrevista

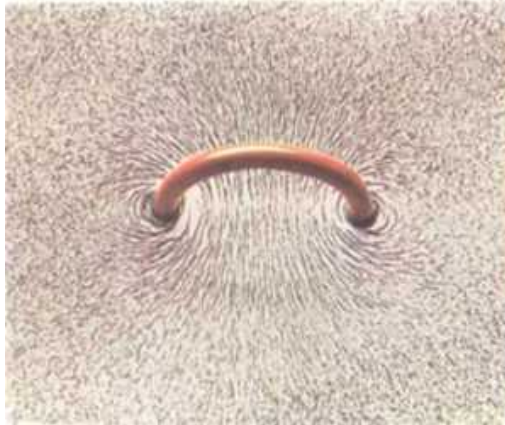
Louis de Broglie expone aquí sus opiniones en torno a la teoría atómica, sus fundamentos y sus implicaciones.



*Demócrito, pensador griego cuya intuición le lleva a postular que la materia constituida por pequeños corpúsculos indivisibles: los átomos*

***¿Desde cuándo se conoce la existencia de los átomos y cómo se llegó a la formulación de la hipótesis atómica?***

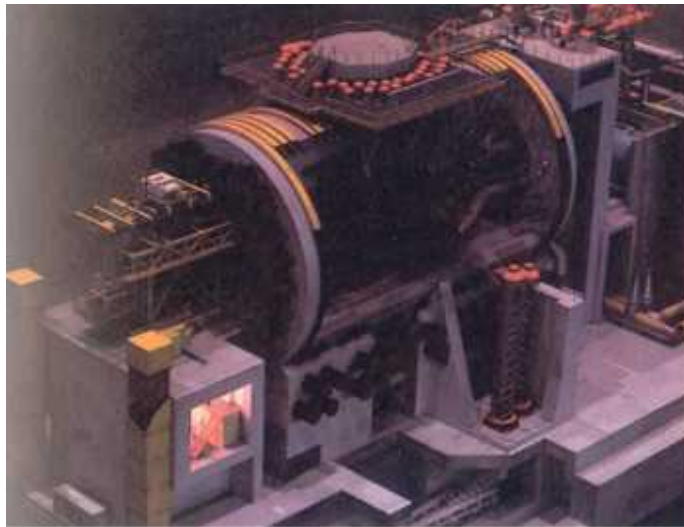
Nadie ignora que la hipótesis atómica se remonta a la Grecia clásica. Empédocles, Demócrito, Leucipo y, finalmente, Epicuro formularon la hipótesis de la que más tarde se haría eco Lucrecio en su obra *De rerum natura*.



*Campo magnético creado por una corriente eléctrica puesto de manifiesto por medio de limaduras de hierro.*

La noción del átomo deriva de la hipótesis que los cuerpos están constituidos por partículas muy ligeras, invisibles e indivisibles, pero hasta dos mil años más tarde no se formularía científicamente una teoría atómica.

***¿Cómo se pasó de los planteamientos atomistas a las consideraciones científicas respecto al átomo?***



*Los reactores nucleares permiten utilizar la energía del núcleo para alimentar centrales eléctricas. Maqueta del reactor G-2 del Laboratorio Científico de Los Álamos.*

Con la química del siglo XIX y el descubrimiento de las leyes de discontinuidad química. Por otra parte, los químicos de la segunda mitad del siglo XIX también le

dedicaron su atención, y de ahí partió la teoría atómica de la materia, más o menos basada en la teoría cinética de los gases.

Los físicos llegaron a la certeza que el átomo era un complejo edificio del que había que determinar la estructura, y para esta labor pusieron a contribución sus conocimientos sobre la naturaleza de la electricidad. Desde el siglo XVIII sabemos que hay electricidad positiva y electricidad negativa, y que la electricidad se relaciona con el fenómeno del magnetismo. Se planteó para la electricidad la misma cuestión que para la materia: saber si poseía una estructura discontinua.



*Contador Geiger portátil. Este tipo de aparatos permiten detectar y medir las radiaciones emitidas por los núcleos atómicos.*

Las leyes de la electrólisis, descubiertas por Faraday, parecían indicar la existencia de esta discontinuidad; al descubrir los electrones, corpúsculos elementales de electricidad negativa, la discontinuidad de la electricidad negativa se hizo patente. Hacia 1900 se planteó si la electricidad positiva poseía, como la negativa, una estructura granular.



*Reactor nuclear de piscina.*

Después de la experiencia de E. Rutherford, hacia 1910 los físicos se pusieron de acuerdo para adoptar su modelo, en el que se consideraba el átomo como un sistema solar en el cual el núcleo desempeñaba el papel del Sol, y los electrones el de los planetas.

### ***¿Cómo se diferencian los átomos?***

En su estado normal, un átomo debe ser neutro y contener tanta electricidad positiva como negativa. Por tanto, si en un átomo hay un número  $Z$  de electrones cuya carga negativa es  $-e$ , el núcleo debe tener la carga  $+Ze$ . Lo que diferenciará, entonces, los distintos tipos de átomos, por ejemplo, un átomo de plomo de un átomo de plata, es el valor del número entero de los electrones periféricos.



*Para trabajar con isótopos radiactivos se usan mecanismos que permiten su manipulación a distancia evitando el contacto directo.*

El número atómico no es otra cosa que el número de orden de elementos químicos en una clasificación de elementos establecida desde 1896 por Mendeleev.



*Las cámaras de burbujas permiten visualizar las trayectorias de las partículas elementales. Instalaciones complementarias de uno de estos dispositivos.*

Esta serie contiene 92 elementos, que normalmente se hallan en la naturaleza y de los que el más ligero es el hidrógeno y el más pesado el uranio, cuyo peso atómico se aproxima a 238.

A partir del modelo atómico de Rutherford, Niels Bohr desarrolló en 1913 su teoría científica del átomo, que luego, junto a las nuevas ideas de la mecánica ondulatoria, proporcionó a los físicos una interpretación muy completa de lo que ocurre en la periferia del átomo. Sólo hacia 1930 se empezó a conocer lo que ocurría en el núcleo atómico.



*La energía nuclear ofrece una fuente inagotable de recursos si la humanidad no comete la locura de utilizarla para su propia destrucción.*

### ***¿Qué papel desempeñan los isótopos?***

El descubrimiento de los isótopos ha eliminado casi por completo la dificultad que se presentaba respecto a la teoría de la unidad de la materia.

Estudiando la desviación de los átomos con espectrógrafos de masas se demostró que núcleos del mismo número atómico, correspondientes a átomos de la misma constitución, dotados de propiedades físicas y químicas casi idénticas, pueden tener masas diferentes. A estos elementos se les llama isótopos; por ejemplo, del estaño se conocen 10 isótopos no radiactivos. Se comprueba que las masas de cada uno de los isótopos de todos los núcleos conocidos son casi exactamente múltiplos enteros de la masa del protón. A este "casi exactamente" se le llama defecto de masa y aún opone una leve resistencia a la teoría de la unidad de la materia.

### ***¿Qué es la radiactividad?***

Antes de conocer la existencia del núcleo, los trabajos de Curie, Becquerel, Soddy, Fajans y Rutherford nos han hecho conocer el fenómeno de la radiactividad natural, de la que sólo están dotados los elementos químicos pesados y que consiste en la facultad de estos átomos de desintegrarse al azar dando nacimiento a un átomo de otro elemento.



*Vista parcial de un reactor nuclear, instalación en donde se trata el material de modo que se pueda auto-mantener y controlar una reacción en cadena de fisión nuclear.*

Cuando se conoció la existencia del núcleo central apareció claramente el sentido de la radiactividad. Puesto que el núcleo caracteriza la individualidad de las especies químicas, es él quien debe romperse en el fenómeno de la radiactividad.

Louis de Broglie opina acerca de la nueva problemática de la física actual a partir de la teoría de la relatividad.

### ***La teoría de la relatividad, ¿cómo modificó la química tradicional?***

Desde Lavoisier, creador de la química moderna, se consideraba que la masa se conserva siempre rigurosamente. El desarrollo de la teoría de la relatividad condujo a modificar esta concepción, de modo que la masa no sería más que una forma particular de la energía, la cual se conservaría siempre. Esto sería el principio de la inercia de la energía enunciado por Einstein en 1905 y que permite comprender el



origen de los defectos de masa: la masa del núcleo es ligeramente inferior a la suma de las masas de los constituyentes debido a que en el momento de su formación se produce la pequeña pérdida de energía. Por todo ello hoy las hipótesis de la unidad de la materia y de la complejidad de los núcleos se hallan libres de toda objeción.

### ***¿Cómo han influido los estudios sobre el átomo en el descubrimiento de las partículas elementales?***

Desde 1930 las técnicas de las transmutaciones provocadas en los núcleos mediante bombardeos han sido rápidamente desarrolladas gracias al empleo de dispositivos poderosos cuyo prototipo ha sido el ciclotrón puesto en marcha en el *Radiation Laboratory* de la Universidad de California en Berkeley por Ernest O. Lawrence.



*Los reactores nucleares requieren complejas instalaciones que garanticen el control de los procesos que tienen lugar en su interior.*

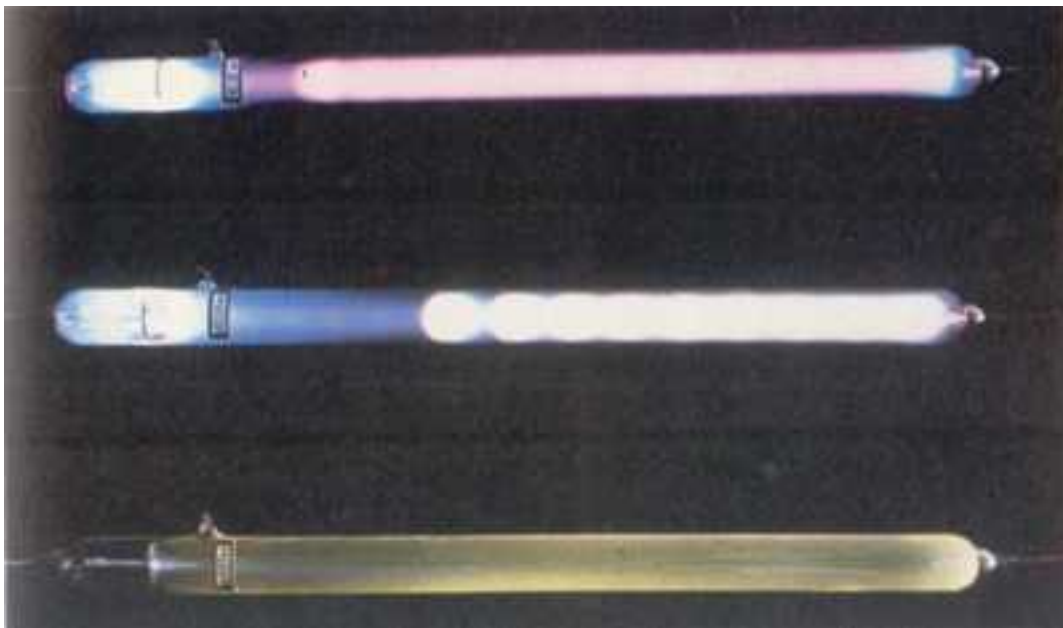
En el centro de estos experimentos tuvo lugar un gran descubrimiento por parte de los esposos Curie, que demostró cómo ciertos procesos de bombardeo ocasionan el nacimiento de un núcleo inestable, el cual se desintegra espontáneamente y da nacimiento a otro elemento.

En 1932 la física nuclear fue transformada por el descubrimiento de dos nuevas partículas: el neutrón y el electrón positivo; después del descubrimiento del

neutrón, Heisenberg propuso una concepción de la estructura del núcleo muy superior a la antigua, según la cual el núcleo no está formado por electrones y protones, sino por protones y neutrones; la producción de electrones negativos o positivos en procesos de desintegración se explicaría no por la preexistencia de electrones en el núcleo, sino por la transformación de un protón nuclear en neutrón, o viceversa, acompañado de la creación de un electrón. El conjunto de estas concepciones sirve de base a la teoría de los núcleos y a la previsión de los fenómenos nucleares.

### ***¿Cuál es el origen de la energía atómica?***

Hace tiempo que se sabe utilizar la energía liberada en la interacción entre los átomos en el momento en que se unen o deshacen liberando calor. Todos los procesos de la química tradicional, y especialmente la metalurgia, representan nuevas utilizaciones de la energía, que desde Lavoisier se han multiplicado de modo vertiginoso.



*Tubos en los que se produce una descarga luminiscente. Los gases excitados emiten radiación al saltar los electrones atómicos a niveles de menor energía.*

El descubrimiento de cuerpos violentamente explosivos, como la nitroglicerina, ha permitido obtener liberaciones bruscas de grandes cantidades de energía, pero

hasta aquí se trataba de la energía química proveniente de la periferia de los átomos. Lo que caracteriza la energía atómica es su procedencia del núcleo atómico, donde se reúnen los protones y neutrones y donde, al transformarse la estructura, se libera mucha más energía que en los fenómenos periféricos, por lo que debería llamarse únicamente energía nuclear. Al descubrirse en 1938-39 el fenómeno de la fisión del uranio la situación ha cambiado por completo.

***Tras la fisión del átomo no pacífica, ¿cuál ha sido el camino recorrido en la utilización de la energía nuclear?***

Se había observado que el bombardeo del uranio por los neutrones daba lugar a una desintegración del núcleo, y se demostró que el choque de neutrones contra ciertos núcleos de uranio los rompía en dos de masa aproximadamente igual, que este fenómeno se acompañaba de una emisión de neutrones, y que los núcleos producidos eran, además, inestables, produciéndose nuevas transformaciones. Las reacciones nucleares al principio sólo afectaban a algunos núcleos de átomos, y a pesar de su interés teórico no eran más que juegos de laboratorio. Pero en 1939 los físicos advirtieron una nueva posibilidad. Al liberarse neutrones y propagarse éstos por toda una masa de uranio el desprendimiento de energía es formidable.



*Los rayos catódicos están constituidos por electrones que se propagan en línea recta. El descubrimiento de estas partículas constituyó el punto de partida en la elaboración de las modernas teorías sobre el átomo.*

Ello llevó al descubrimiento de la bomba atómica. La bomba de Hiroshima fue construida a partir de uranio 235, y la de Nagasaki se hizo a partir de plutonio. Posteriormente se desarrollaron las bombas de hidrógeno, basadas, no en fisión de núcleos pesados, sino en la de núcleos ligeros, cuya potencia puede ser miles de veces mayor que la de las bombas atómicas.

***Además de los efectos inmediatos de una explosión atómica, ¿qué otros efectos secundarios se producen?***

Todas las bombas atómicas poseen la propiedad de expandir radiaciones, átomos radiactivos que permanecen en la atmósfera y en el agua, capaces durante mucho tiempo de emitir radiaciones nocivas para el organismo humano, que incluso pueden determinar alteraciones cromosómicas que pongan en peligro generaciones futuras.

***¿Cuál es la responsabilidad moral del científico en este terreno?***

No son los científicos, sino los políticos, los responsables de determinadas aplicaciones de los descubrimientos científicos. La misión de aquéllos es hacer avanzar la ciencia, como contribución al progreso de la humanidad. Difícilmente logra el científico evitar las aplicaciones negativas de la ciencia, contrarias al interés de los pueblos.

***¿Cuáles son las principales aplicaciones pacíficas en el uso de la energía nuclear?***

Entre Otras muchas figuran los reactores nucleares, que se utilizan para hacer funcionar máquinas de vapor o turbinas de gas que a la vez alimentan centrales eléctricas o se emplean en la propulsión de buques o submarinos. Si los hombres quieren que su civilización no se detenga y progrese, deben pasar de los combustibles basados en el carbón y el petróleo a la obtención de combustibles sintéticos y a la utilización industrial de la energía nuclear, que por otra parte no resultaría cara.

***¿Cuáles son el estado actual y las perspectivas de las investigaciones en el campo de la física nuclear?***

La física nuclear ha realizado grandes progresos en los últimos veinte años. De tales progresos ha nacido la física de las partículas elementales, que se ocupa del estudio de las partículas subatómicas. En los años 30 apenas se conocían cuatro o cinco de ellas: el protón, el electrón, el positrón, el neutrón y el fotón; hoy se conocen más de trescientas. La situación es muy compleja, pero cabe esperar que por este camino lleguen a resolverse numerosas cuestiones aún pendientes acerca de la estructura del núcleo atómico. Por lo que respecta a la utilización pacífica de la energía atómica, los estudios se centran ahora en el control de los procesos que se verifican en la explosión de una bomba de hidrógeno, idénticos, en líneas generales, a los que origina la energía solar. La puesta a punto de estos reactores nucleares de fisión supondría una fuente inagotable de energía, no sometida a la dependencia de materiales como el uranio y el plutonio, y con toda seguridad mucho más económica que la proporcionada por los actuales reactores. Si la humanidad no comete la locura de emplearla para su propia destrucción, la utilización de la energía atómica transformará la industria. La posibilidad de utilizar a nuestro antojo la energía atómica ha abierto una nueva era en la historia de la humanidad: la inteligencia humana puede sentirse orgullosa de haber llegado a penetrar los secretos de la constitución íntima de la materia.



## Louis Víctor de Broglie

El profesor Louis Víctor de Broglie, premio Nobel de Física en 1929, nació en Dieppe el 15 de agosto de 1892. Es actualmente secretario permanente de la Academia de Ciencias, miembro de la Academia Francesa y del Instituto de Francia, profesor de la Facultad de Ciencias de la Universidad de París y miembro de la Royal University de Londres. Se doctoró en ciencias en la Sorbona en 1924 presentando un importante estudio en el que expuso su teoría sobre las ondas de materia, que daría origen a la mecánica ondulatoria posteriormente desarrollada por Schrödinger. En un intento de compaginar las dos teorías físicas de la luz (corpúscular y ondulatoria), postuló que los electrones y demás partículas en movimiento están dotados de propiedades como si cada partícula, al moverse, poseyera una onda asociada. En los últimos años, de Broglie ha investigado también las propiedades magnéticas del electrón. Ha escrito gran número de obras que tratan de física atómica y algunos libros de divulgación sobre las modernas teorías físicas. Entre sus numerosas obras figuran: *Physique et microphysique* (1947), *Continu et discontinu en physique moderne* (1950), *Mécanique ondulatoire du photon et théorie quantique des champs* (1957), *Eléments de théorie des quanta et de mécanique ondulatoire* (1959) e *Introduction á la nouvelle théorie des particules de M. J. P. Vigier* (1961).

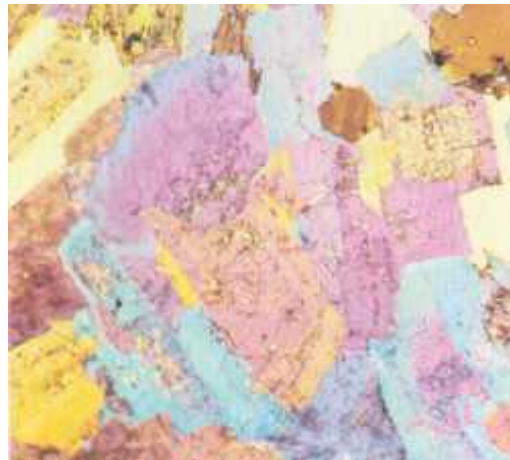


## Capítulo 1

### Constitución de la materia

#### Contenido

1. [Elementos químicos y átomos](#)
2. [Teoría cinética de los gases](#)
3. [Las diversas clases de átomos](#)
4. [¿Cuánto pesa un átomo?](#)
5. [Dimensiones del átomo](#)
6. [Descubrimiento del electrón](#)
7. [Dos clases de electricidad](#)
8. [Transformaciones de los átomos.](#)
9. [Constitución del átomo](#)
10. [Isótopos](#)

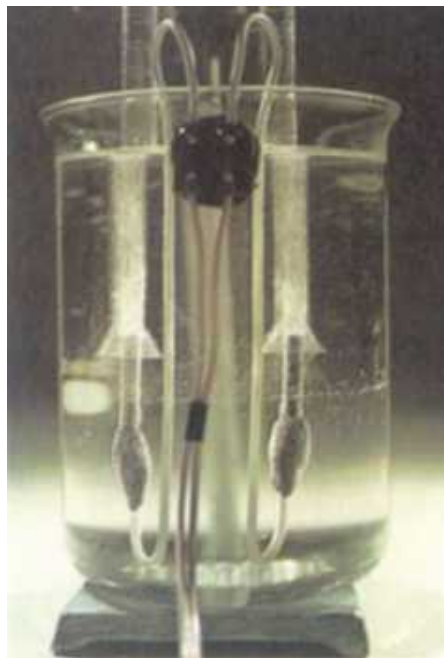


*El granito (a la izquierda) es un agregado de tres compuestos químicos distintos. A la derecha, microfotografía que pone de manifiesto la composición del granito.*

El mundo en que vivimos parece constituido por una gran cantidad de sustancias diversas. Un breve repaso de los cuerpos con los que tratamos habitualmente nos obliga a utilizar palabras como piedra, madera, metal, vidrio y plástico. Si intentamos precisar un poco más tendremos que introducir nuevas palabras para designar las distintas clases de piedras, y lo mismo nos sucederá con los metales y



los plásticos. Una vez clasificados todos los cuerpos que llamamos sólidos, quedarán los líquidos como el agua, el alcohol y la gasolina, y después de éstos tendremos que empezar con el aire y los demás gases. El examen detallado de una roca, por ejemplo el granito, permitirá observar que éste se compone de unos gránulos muy duros de color blanquecino, el cuarzo, otros brillantes y, a veces, oscuros, la mica, y uniendo a ambos una sustancia de color intermedio denominada feldespato; cualquier especialista puede indicarnos también que además existen tipos muy diversos de micas y feldespatos.



*Voltámetro, aparato que permite descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno.*

La simple enumeración de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos existentes no proporciona ninguna información sobre la naturaleza de los mismos.



*Instalaciones exteriores del reactor experimental KIWI, usado para pruebas relacionadas con los viajes espaciales.*

Al calentar un pedazo de hielo se convierte en agua, y calentando ésta se la puede transformar en vapor; si se procede en sentido inverso, es decir enfriando, el vapor volverá a transformarse en agua, y de ella podrá obtenerse el hielo. En un laboratorio mínimamente dotado, con el único auxilio de corriente eléctrica y de unas gotas de ácido, el agua puede descomponerse en dos gases, hidrógeno y oxígeno, cuyas propiedades no tienen ninguna relación con el agua de la que se han obtenido.



*Laboratorio químico de finales del siglo XIX*

Estos sencillos hechos ponen de manifiesto, por una parte, la posibilidad de transformar unos cuerpos en otros distintos, y por otra la de encontrar una misma sustancia en formas aparentemente tan diversas que enmascaran su naturaleza común. Parece lógico, pues, intentar la ordenación de nuestros conocimientos a partir de investigar los rasgos comunes de todos los cuerpos existentes. Los antiguos griegos así lo hicieron y, algunos de sus filósofos postularon que la tierra, el agua, el aire y el fuego eran las únicas sustancias primarias existentes, que, combinadas en distintas proporciones, daban origen a todo el mundo material. En esta visión excesivamente simplista es difícil que se reconozcan hoy rasgos de verosimilitud. Sin embargo, tiene el mérito de constituir un primer intento de explicar unos fenómenos propios de un mundo demasiado complejo a partir de unos pocos principios elementales.

## **1. Elementos químicos y átomos**

A lo largo de los siglos se han identificado progresivamente una serie de sustancias, llamadas elementos, elementos químicos o elementos simples, que aparecen formando parte de los demás cuerpos, denominados compuestos, pero que no pueden considerarse constituidas por otras más sencillas. Así, por ejemplo, el oxígeno y el hidrógeno son elementos simples, pero no el agua, en cuya composición intervienen ambos y que es, por consiguiente, un compuesto; el granito es una mezcla de tres compuestos, cuarzo, feldespato y mica, en cuya constitución intervienen diversos elementos simples.

El estudio de las propiedades de los elementos químicos y de las leyes que regulan las reacciones de los mismos, que dan origen a los compuestos, constituye el objeto de la química y es uno de los capítulos más fascinantes de la investigación científica. Por medio de laboriosos trabajos, experimentos y mediciones se han descubierto una serie de principios que son respetados escrupulosamente por la naturaleza. A partir de ellos, el químico británico Dalton llegó a la conclusión, en 1803, que la materia está constituida por pequeños corpúsculos independientes e imposibles de dividir a los que llamó átomos (término proveniente del griego y que significa indivisible). Cada elemento químico está formado por una clase exclusiva de átomos, iguales entre sí, pero distintos de los átomos de los otros elementos, de los

que difieren, por lo menos, en la masa. Las distintas clases de átomos pueden combinarse constituyendo corpúsculos más complejos, denominados moléculas, las cuales pueden dividirse, por procedimientos químicos, en los distintos átomos que las componen. La diferencia entre los cuerpos simples y los compuestos estriba en que las moléculas de los primeros están formadas por átomos de una misma especie, mientras que las moléculas de los segundos lo están por átomos correspondientes a elementos químicos diversos.

## **2. Teoría cinética de los gases**

La hipótesis corpuscular de la materia hace posible la interpretación de los fenómenos químicos, y, al mismo tiempo, permite dar una explicación a numerosas propiedades físicas de los cuerpos. Ya se ha dicho que una misma sustancia puede presentarse en estado sólido, líquido o gaseoso. Puesto que en las transformaciones de sólido a líquido, o de líquido a gas, no se observa la aparición de ningún nuevo compuesto, cabe convenir que las moléculas deben ser las mismas en cualquiera de los tres estados.

Con objeto de explicar el comportamiento de las sustancias gaseosas se ha elaborado la teoría cinética de los gases. En ella se supone que las moléculas que constituyen un gas están a grandes distancias entre sí en comparación con su tamaño. Por esta razón, tales moléculas no ejercen prácticamente ninguna acción unas sobre otras y su movimiento es completamente desordenado. Ello justifica el hecho que un gas puede expandirse indefinidamente ocupando la totalidad del recinto que lo contiene. La aplicación de las leyes de la estadística ha permitido relacionar fenómenos conocidos desde antiguo, como la presión o la temperatura de los gases, con la velocidad media de sus moléculas. Cuanto mayor es la temperatura de un gas mayor es la velocidad con que se mueven, en promedio, las partículas que lo constituyen. Por el contrario, en los líquidos y los sólidos la distancia que separa a unas moléculas de otras es mucho menor y entre ellas actúan fuerzas de naturaleza muy compleja, que les impiden desplazarse de manera arbitraria. Concretamente en los sólidos, las fuerzas son tan intensas que impiden prácticamente cualquier desplazamiento de las partículas constituyentes, las cuales

sólo realizan pequeñas oscilaciones en torno a posiciones fijas; por ello estos cuerpos presentan una forma y un volumen constantes.

Elemento	Sím-bolo	Núm. atómico	Masa atómica	Elemento	Sím-bolo	Núm. atómico	Masa atómica	Elemento	Sím-bolo	Núm. atómico	Masa atómica
Actinio	Ac	89	227	Francio	Fr	87	[223]	Plutonio <sup>(1)</sup>	Pu	94	[242]
Aluminio	Al	13	26,98	Gadolinio	Gd	64	157,26	Polonio	Po	84	210
Americio <sup>(1)</sup>	Am	95	[243] <sup>(2)</sup>	Galio	Ga	31	69,72	Potasio	K	19	39,1
Antimonio	Sb	51	121,76	Germanio	Ge	32	72,60	Praseodimio	Pr	59	140,91
Argón	Ar	18	39,944	Hafnio	Hf	72	178,5	Promecio <sup>(1)</sup>	Pm	61	[147]
Arsénico	As	33	74,92	Helio	He	2	4,003	Protactinio	Pa	91	231
Astato	At	85	[210]	Hidrógeno	H	1	1,008	Radio	Ra	88	226,05
Azufre	S	16	32,066	Hierro	Fe	26	55,85	Rádón	Rn	86	222
Bario	Ba	56	137,36	Holmio	Ho	67	164,94	Renio	Re	75	186,22
Berilio	Be	4	9,013	Indio	In	49	114,82	Rodio	Rd	45	102,91
Berkelio <sup>(1)</sup>	Bk	97	[247]	Indio	Ir	77	192,2	Rubidio	Rb	37	85,48
Bismuto	Bi	83	208,99	Irbidio	Yb	70	173,04	Rutenio	Ru	44	101,1
Boro	B	5	10,82	Itrio	Y	39	88,91	Samario	Sm	62	150,35
Bromo	Br	35	79,916	Lantano	La	57	138,92	Selenio	Se	34	78,96
Cadmio	Cd	48	112,41	Laurencio <sup>(1)</sup>	Lr	103	[257]	Silicio	Si	14	28,09
Calcio	Ca	20	40,08	Litio	Li	3	6,940	Sodio	Na	11	22,991
Californio <sup>(1)</sup>	Cf	98	[251]	Lutecio	Lu	71	174,99	Talio	Tl	81	204,39
Carbono	C	6	12,011	Magnesio	Mg	12	24,32	Tántalo	Ta	73	180,95
Cerio	Ce	58	140,13	Manganeso	Mn	25	54,94	Tecnecio <sup>(1)</sup>	Tc	43	[99]
Cesio	Cs	55	132,91	Mendeléiev <sup>(1)</sup>	Md	101	[256]	Teluro	Te	52	127,61
Circonio	Zr	40	91,22	Mercurio	Hg	80	200,61	Terbio	Tb	65	158,93
Cloro	Cl	17	35,457	Molibdeno	Mo	42	95,95	Titanio	Ti	22	47,9
Cobalto	Co	27	58,94	Neodimio	Nd	60	144,27	Torio	Th	90	232,05
Cobren	Cu	29	63,54	Neón	Ne	10	20,183	Tulio	Tm	69	168,94
Criptón	Kr	36	83,80	Neptunio <sup>(1)</sup>	Np	93	[237]	Uranio	U	92	238,07
Cromo	Cr	24	52,01	Niobio	Nb	41	92,91	Vanadio	V	23	50,95
Curio <sup>(1)</sup>	Cm	96	[247]	(Columbio)	Nb	41	92,91	Wolframio	W	74	183,86
Disproseo	Dy	66	162,51	Niquel	Ni	28	58,71	(Tungsteno)	W	74	183,86
Einsteinio <sup>(1)</sup>	Ea	99	[264]	Nitrógeno	N	7	14,008	Xenón	Xe	54	131,3
Erbio	Er	68	167,27	Nobelio <sup>(1)</sup>	No	102	254	Yodo	I	53	126,91
Escandio	Sc	21	44,96	Oro	Au	79	197	Zinc	Zn	30	65,38
Estaño	Sn	50	118,70	Osmio	Os	76	190,2				
Estroncio	Sr	38	87,63	Oxígeno	O	8	16				
Europio	Eu	63	152	Paladio	Pd	46	106,4				
Fermio <sup>(1)</sup>	Fm	100	[253]	Plata	Ag	47	107,88				
Fluor	F	9	19	Platino	Pt	78	195,09				
Fósforo	P	15	30,975	Plobo	Pb	82	207,21				

Relación de los elementos del sistema periódico con sus símbolos y masas atómicas.

En los líquidos tales fuerzas permiten a las moléculas moverse libremente, aunque otras, por lo que, si bien su forma se adapta a la de los recipientes que los contienen, el volumen permanece inalterado. Cuando se aumenta la temperatura de un sólido, las partículas que lo constituyen efectúan oscilaciones cada vez mayores, hasta llegar a una fase en que son capaces de desplazarse libremente. En este momento se produce el paso al estado líquido. Si se sigue aumentando la temperatura aumenta también la velocidad de las moléculas hasta que éstas son capaces de vencer las fuerzas mutuas, instante en el que el líquido empieza a transformarse en gas o en vapor.

### 3. Las diversas clases de átomos

Se conocen en la actualidad algo más de un centenar de elementos químicos distintos, algunos de los cuales han sido fabricados artificialmente por el hombre;

esto quiere decir que existen más de un centenar de átomos distintos. Para dosificarlos hay que recurrir nuevamente a las leyes de la química. Comparando las proporciones con que los átomos se combinan entre sí para formar moléculas, se ha conseguido establecer una escala relativa de masas atómicas. Si se toma como punto de referencia el más ligero de los elementos, el hidrógeno, y se le asigna el valor 1, la masa relativa del oxígeno será, aproximadamente, igual a 16, la del hierro 55,85, la del plomo 207,21 y la del uranio, el más pesado de los elementos conocidos hasta hace muy pocos años, 238,07.

Es necesario tener presente que tales números no representan la masa del átomo de hidrógeno, o de oxígeno, por ejemplo, sino tan sólo un valor comparativo entre ambos. Es decir, traducen el hecho que el oxígeno tiene una masa 16 veces mayor que la del hidrógeno, y que la del uranio es también 238 veces mayor.

En realidad, el método empleado para establecer la escala de masas atómicas es más complicado que el descrito aquí, pero a los efectos el resultado es prácticamente el mismo.

#### 4. ¿Cuánto pesa un átomo?

Sin embargo, continuamos sin saber cuál es el peso real de un átomo. Primeramente, conviene precisar la diferencia entre peso y masa. El peso de un cuerpo depende no solamente de él, sino de la acción que la Tierra u otro astro ejerza sobre él: en la cumbre de un monte un cuerpo pesa menos que a nivel del mar, y en el polo todos los cuerpos resultan más pesados que en el ecuador. En cambio, la masa es un factor característico de cada cuerpo, constituye una medida de la cantidad de materia que contiene y no varía al trasladar aquél de un lugar a otro. En la presente obra, a pesar que en el lenguaje corriente se confundan ambos conceptos, se usará siempre la palabra masa en lugar de peso.

*"Decimos dulce, decimos amargo, decimos caliente, decimos frío, decimos calor, pero en realidad no hay mas que átomos y vacío."*

DEMÓCRITO

Resulta inútil pensar en cualquiera de los métodos comunes para medir masas cuando se trata de calcular la masa de los átomos; éstos son tan pequeños que la más precisa de las balanzas utilizadas en los laboratorios es incapaz de apreciar su masa, ni siquiera la de un millón de ellos. De todos modos se dispone de un punto de partida. Se llama átomo-gramo de una sustancia al valor de la masa atómica, tal como se ha establecido, expresada en gramos. Ahora bien, es fácil darse cuenta que átomos-gramo de diversas sustancias contienen el mismo número de átomos; en efecto, en un gramo de hidrógeno hay cierta cantidad de átomos, exactamente la misma que habrá en 16 g de oxígeno, puesto que este último tiene una masa 16 veces mayor que la de aquél.

*“De variedad infinita en masa y figura, pueden formar cuerpos de toda especie. Unos tienen configuración esférica, cúbica o elíptica; otros cónica, cilíndrica o piramidal (...). Móviles por naturaleza, estos átomos están en movimiento durante toda la eternidad, con diferentes velocidades y direcciones que los arrastran al azar en distintos sentidos, en el seno del vacío infinito.”*

EPICURO

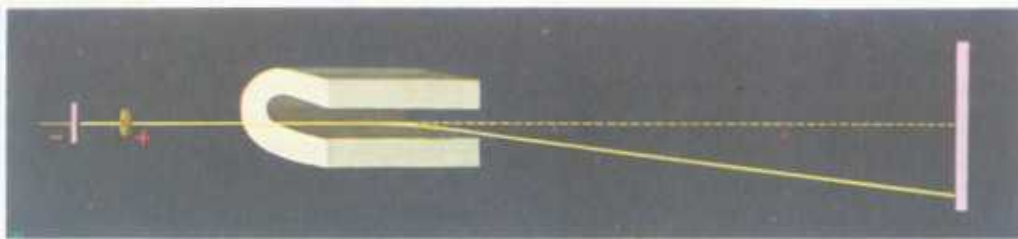
En consecuencia, lo único que hay que hacer es calcular cuántos átomos hay en un átomo-gramo. A la cantidad que resulta, y que ha podido medirse por diversos métodos, satisfactoriamente, se la llama número de Avogadro, en honor de dicho físico italiano. La cantidad resultante es enorme; para escribirla se requerirían 24 cifras: 602.4703000.0002000.0001000.000, superior a 600.000 trillones de átomos. Se trata de una cantidad tan enorme que debemos renunciar a imaginarla; para escribirla de forma cómoda se utiliza la flotación  $6,0247 \times 10^{23}$ . Dada una sustancia cualquiera, para conocer cuál es la masa de un átomo de la misma en gramos bastará con dividir su masa atómica por el número de Avogadro. En todos los casos resulta un número pequeñísimo, imposible de imaginar, y engorroso de utilizar en los cálculos. En la práctica se renuncia a emplear los números así obtenidos, utilizándose únicamente los valores de las masas atómicas.

## 5. Dimensiones del átomo

Dadas estas masas tan extraordinariamente reducidas ¿cuál será el tamaño de los átomos? Las mediciones realizadas hasta la fecha por muy distintos procedimientos concluyen en que todos los átomos tienen aproximadamente el mismo tamaño (el mayor de ellos es tan sólo 4-5 veces superior al más pequeño). El hecho no deja de ser sorprendente, puesto que la relación entre las masas varía desde 1 a más de 200. El diámetro aproximado oscila en torno a múltiplos pequeños de 0,00000001 cm ( $10^{-8}$  cm), es decir, es ligeramente superior a una diezmillonésima de milímetro. Para obtener una idea aproximada del valor de esta magnitud, así como del número de Avogadro, puede imaginarse un cubo de aluminio puro de 10 cm de lado: si los átomos que lo componen se hinchasen hasta alcanzar el tamaño de las pelotas de tenis de mesa, resultaría un cubo cuyo lado mediría aproximadamente 12.700 km, y el volumen ocupado por él sería algo inferior al doble del volumen de la Tierra. Es decir, dentro de este inmenso cubo cabría nuestro planeta ¡y todavía sobraría espacio!

## 6. Descubrimiento del electrón

La hipótesis atómica de Dalton resultó extraordinariamente fructífera, tanto en el campo de la química como en ciertos dominios de la física.



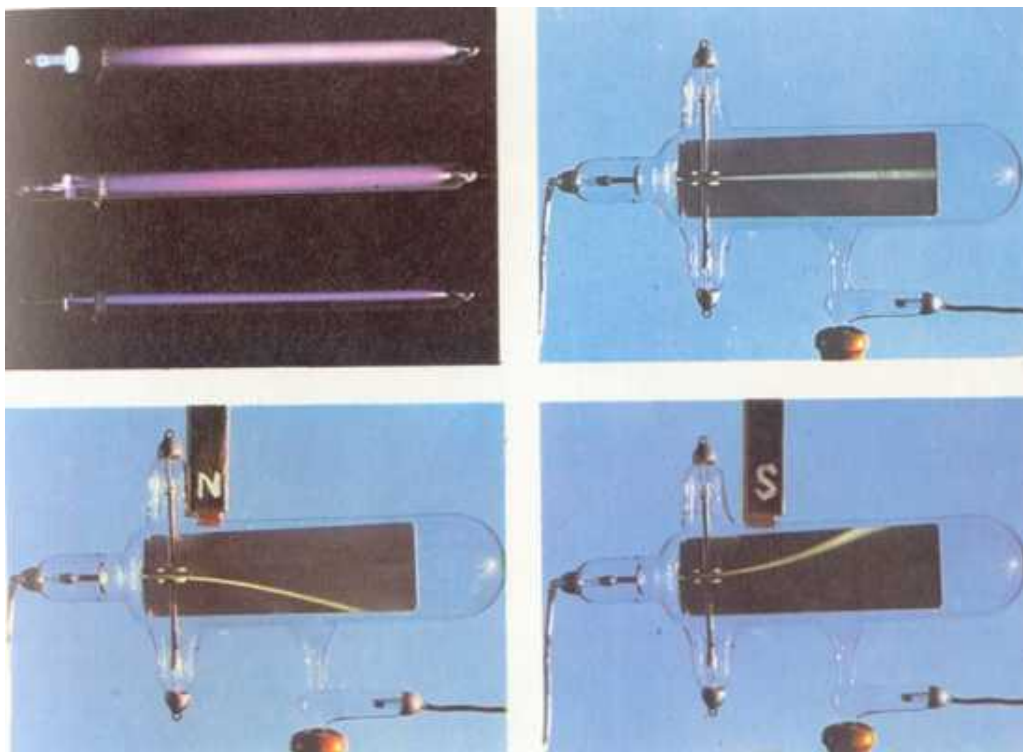
*Los electrones son desviados por la acción de los campos magnéticos creados por los imanes.*

En realidad, aunque introduciendo notables modificaciones, constituía un triunfo de la intuición de algunos pensadores griegos, como Leucipo y Demócrito, los cuales 2.500 años antes ya habían imaginado a la materia constituida por átomos discretos e invisibles. Sin embargo la idea de continuidad predominaba en todas las teorías físicas del siglo XIX. Durante mucho tiempo la hipótesis atómica fue considerada



como una imagen afortunada que hacía fácilmente inteligibles algunos fenómenos, pero sin relación con la realidad. A ello contribuía la especial naturaleza del lenguaje matemático que, a partir de Newton, constituye la base utilizada en la descripción de los fenómenos físicos. En efecto, las características de este lenguaje parecen incompatibles con cualquier idea de discontinuidad como la implicada en la existencia de los átomos. Por ello, no es extraño que se pensase en la materia como en un continuo infinitamente divisible.

Otras manifestaciones de la naturaleza, como el calor, eran asimismo atribuidas a un fluido continuo, el calórico, que al pasar de unos cuerpos a otros determinaba sus variaciones térmicas; esta noción se mantuvo hasta que, a mediados del pasado siglo, Joule demostró que el calor no era sino una forma de energía comparable a las ya conocidas.



*Arriba, descarga luminiscente en tubos con mercurio a diferentes presiones y trayectoria rectilínea de los rayos catódicos. Abajo, desviación de los rayos catódicos por efecto de un campo magnético (imán).*

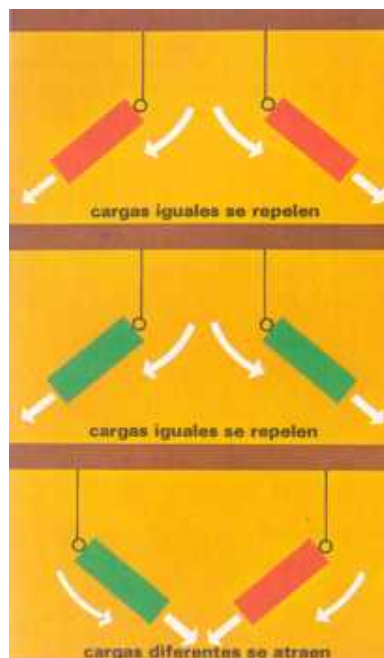
La electricidad era igualmente considerada como un tipo especial de fluido imponderable. El estudio de las descargas eléctricas que se producen en tubos que

contienen gas a baja presión permitió modificar totalmente esta idea. Los tubos luminiscentes son conocidos por todos, puesto que constituyen el fundamento de los rótulos luminosos de los anuncios callejeros.

Cuando están en funcionamiento se observa que del cátodo de los mismos se desprenden unas radiaciones que se propagan en línea recta, capaces de atravesar pequeñas láminas, y que son desviadas si se coloca un imán en sus proximidades. A estas radiaciones se les llama rayos catódicos y están constituidas por unas pequeñas partículas, los electrones, portadores de la más pequeña cantidad de electricidad medida en la naturaleza. El descubrimiento del electrón tuvo una trascendencia enorme, ya que puso de manifiesto que la electricidad se presenta dividida en unidades fundamentales pequeñísimas, lo cual inclinó definitivamente la balanza a favor de la teoría atómica, constituyendo uno de los puntos de partida en el desarrollo de la física moderna.

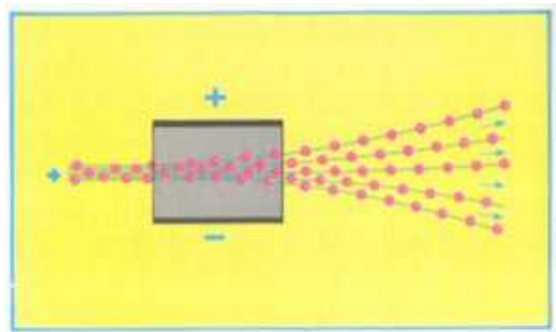
## 7. Dos clases de electricidad

Antes de seguir adelante conviene efectuar un repaso de nuestros conocimientos sobre la electricidad. Los fenómenos eléctricos son conocidos desde antiguo, si bien hasta el siglo XVIII no empezaron a estudiarse detalladamente.



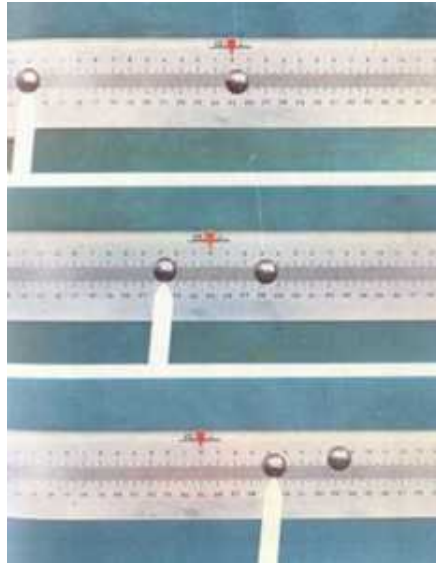
*Representación de la acción mutua entre cargas eléctricas.*

Las consecuencias de la existencia de cargas eléctricas, así como de sus aplicaciones, nos resultan comunes puesto que forman parte de la vida cotidiana. Sin embargo, hay una propiedad que puede pasar fácilmente inadvertida: se trata de la existencia de dos tipos distintos de cargas eléctricas. Cuando se frota una varita de vidrio con un paño, aquélla adquiere una carga eléctrica; el fenómeno se manifiesta por la propiedad de atraer papelitos y cuerpos de pequeñas dimensiones. El mismo resultado se obtiene frotando una varilla de lacre. Dos varitas de vidrio electrizadas colocadas cerca una de otra se repelen entre sí, y lo mismo sucede si se enfrentan dos varitas de lacre.



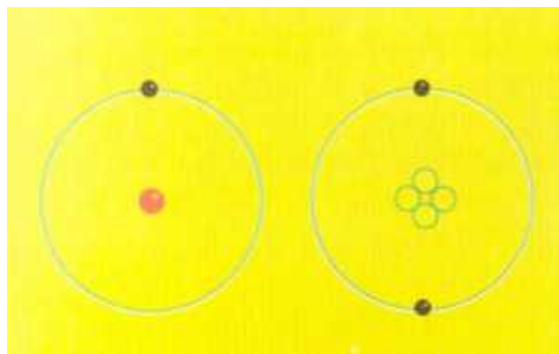
*Las partículas cargadas sufren distintas desviaciones según su signo al atravesar un condensador.*

Supóngase ahora que aproximamos una varita de vidrio a otra de lacre, y que ambas están electrizadas: en lugar de repelerse, como sería de esperar, se atraen entre sí. Si seguimos aproximándolas hasta que entren en contacto, sus propiedades eléctricas desaparecen por completo.



*La repulsión entre cargas de distinto signo varía con su distancia.*

Parece, pues, que a diferencia de lo que sucede con la masa, de la que se conoce un solo, tipo, existen dos clases distintas de electricidad. Las cargas eléctricas de una misma clase se repelen entre sí, pero atraen a las de la clase opuesta, y si se une determinada cantidad de cargas de un tipo con la misma cantidad de cargas de otra clase, los efectos de ambas se neutralizan. Con objeto de distinguir las dos clases de electricidad se convino en llamar positiva a la del vidrio y negativa a la del lacre. Se ha comprobado que la electricidad del electrón tiene la naturaleza de la del lacre; por tanto, la carga eléctrica del electrón tiene signo negativo.



*Representación esquemática de los átomos de hidrógeno y del helio.*

Las cargas de signos opuestos pueden identificarse fácilmente, ya que son desviadas en distintas direcciones por los campos magnéticos creados por los

imanes, y por los campos eléctricos que se originan, por ejemplo, entre las armaduras de un condensador.

## **8. Transformaciones de los átomos**

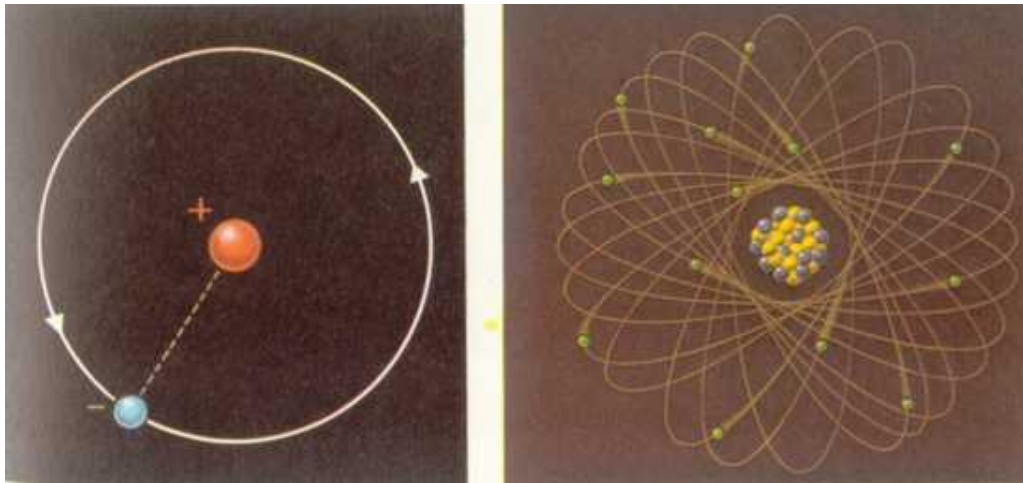
No deja de resultar curioso que la primera partícula microscópica identificada no fuese un átomo, sino una parte de él. Los electrones poseen una masa 1.837 veces menor que la del más ligero de los átomos, el de hidrógeno. Además, como ya se ha dicho, tienen carga eléctrica, mientras que los átomos son eléctricamente neutros. No resulta, pues, difícil deducir de estos hechos que los átomos son entidades más complicadas de lo que Dalton había imaginado.

Las propiedades radiactivas de algunos elementos confirman esta idea. Se sabe que los átomos de algunas sustancias, generalmente de masa atómica grande, pueden transformarse espontáneamente en otros distintos emitiendo electrones, o un nuevo tipo de partículas que se llaman alfa. La masa de las partículas  $\alpha$  (alfa) es, aproximadamente, igual a cuatro veces la del átomo de hidrógeno. Poseen también carga eléctrica, que es igual al doble de la del electrón, de la que se diferencia por ser de signo positivo.

En los átomos en que no tienen lugar de forma natural estas transmutaciones, y que son la mayoría de los conocidos, pueden producirse las mismas artificialmente, bombardeándolos con las partículas  $\alpha$  emitidas por algún átomo radiactivo.

El resultado del choque de una de esas partículas con un átomo suele consistir en la absorción de la primera, seguido de la emisión de otra partícula igual o distinta de la inicial. De entre las partículas que pueden ser emitidas en tales reacciones hay una que reviste especial interés. Se trata del protón, el cual posee una masa que coincide casi con la del átomo de hidrógeno, y cuya carga es positiva e igual, en valor absoluto, a la que posee el electrón.

Con lo expuesto hasta aquí se conocen ya tres partículas subatómicas: los electrones, los protones y las partículas  $\alpha$ . La estructura de estas últimas puede explicarse fácilmente si se recurre a unas nuevas partículas, los neutrones, cuya masa coincide con la de los protones, pero desprovistos de carga eléctrica. Así, las partículas  $\alpha$  resultan estar constituidas por un conjunto de 2 protones y de 2 neutrones fuertemente unidos.



*La estructura de los átomos se va haciendo más compleja a medida que aumenta el número atómico: izquierda, átomo de hidrógeno con un solo electrón; a la derecha, átomo de aluminio con 13 electrones.*

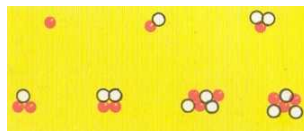
### **9. Constitución del átomo**

El conjunto de los electrones de un átomo constituye la corteza atómica, nombre que proviene de una imagen que considera al átomo como a un sistema solar en miniatura, en el cual los planetas estarían sustituidos por los electrones. El papel que corresponde al Sol, en esta representación lo desempeñaría el núcleo atómico, en el que se agrupan los protones y los neutrones, y que incluye la casi totalidad de la masa atómica. El más sencillo de los átomos, el de hidrógeno, está constituido por un protón, que forma el núcleo, y un electrón orbital. Le sigue, en orden de complicación, el átomo de helio, y con una corteza que contiene 2 electrones, cuyo núcleo está constituido por una partícula  $\alpha$ .



*Composición del hidrógeno y del oxígeno, y lugar que ocupan en el sistema periódico de los elementos.*

Los electrones de la corteza atómica determinan completamente las propiedades químicas de los elementos.

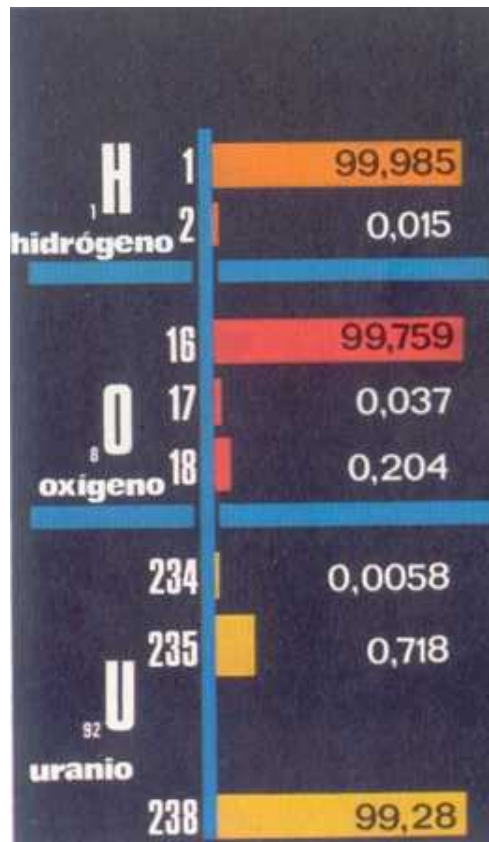


*Isótopos del hidrógeno (1 protón), helio (2 protones) y litio (3 protones); los protones aparecen en rojo y los neutrones en blanco.*

El número de ellos se denomina número atómico del átomo correspondiente y se designa con el símbolo  $Z$ . La ordenación de los átomos en valores crecientes del número atómico da lugar al sistema periódico de los elementos, en el cual se presentan una serie de regularidades que permiten clasificar a los distintos elementos en grupos afines.

Por otra parte, al núcleo atómico se le considera factor determinante de parte de las propiedades físicas del átomo. El número de protones del mismo coincide con el de los electrones orbitales, lo cual determina el carácter neutro de los átomos. La suma del número de protones y neutrones se llama número másico, se representa por el

símbolo A y constituye, como se verá, una magnitud de gran importancia. Las dimensiones del núcleo son extraordinariamente menores que las del átomo en conjunto, ya que son inferiores a la diezmilésima parte de éste.



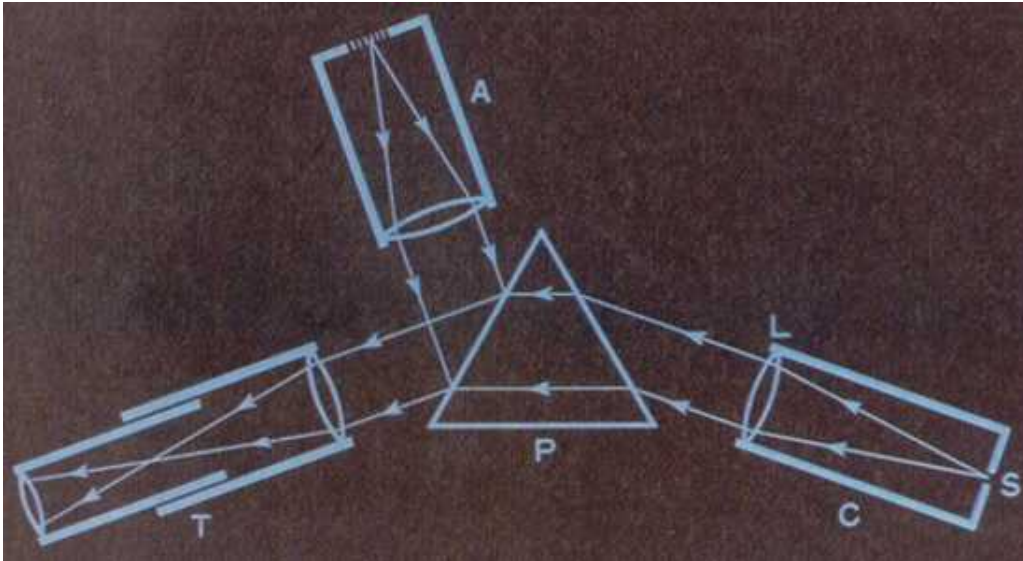
*Isótopos de algunos elementos y su abundancia relativa en tantos por ciento.*

Volviendo al ejemplo del cubo de aluminio y considerando también que los átomos tuvieran el tamaño de las pelotas de tenis de mesa, el total de todos los núcleos agrupados formaría un cubo de sólo unos 120 m de lado e incluiría más del 99 % de la masa total de todos los átomos.

## 10. Isótopos

Las masas de los protones y de los neutrones son prácticamente iguales entre sí e iguales también a la masa del átomo de hidrógeno (existe una pequeña diferencia, debida a la masa del electrón, que resulta insignificante).





*Esquema del funcionamiento de un espectroscopio: C, colimador por el que penetra la luz a analizar; P, prisma en el que se dispersa; T, telescopio por el que se observa el espectro; A, anteojo auxiliar para proyectar una escala sobre el espectro; S, abertura de entrada del colimador; L, lente convergente.*

Según esto, el número másico es las veces que pesa más un átomo determinado que el átomo de hidrógeno y, en consecuencia, tendría que coincidir con la masa atómica. La conclusión de este razonamiento es que todas las masas atómicas han de ser números enteros. Sin embargo, la realidad es muy distinta; las masas de todos los elementos son fraccionarias; buen número de ellos difieren de un entero en una décima, por lo menos, y para algunos, como el magnesio, el hierro, etcétera, la separación es mucho mayor.

Se trata de una aparente contradicción que fue resuelta cuando se descubrió la existencia de núcleos atómicos que a pesar de contener el mismo número de protones, o sea, igual número atómico, diferían en el número de neutrones. Tales núcleos se denominan isótopos y las propiedades químicas de los átomos a que dan lugar son idénticas para todos ellos, dado que tienen la misma configuración electrónica en su corteza. En cambio, su número másico varía según el número de neutrones que incluyen.

Con objeto de distinguir las diversas variantes de los núcleos de los elementos suele emplearse el término núclido, de significado más concreto. Cada núclido se representa mediante el símbolo del elemento químico a que corresponde acompañado de un superíndice que indica su número másico y de un subíndice que

indica el número atómico, en la forma  ${}_Z X^A$ . Los distintos isótopos de un mismo elemento quedan especificados con las notaciones  ${}_Z X^A_1$ ,  ${}_Z X^A_2$ ,  ${}_Z X^A_3$ ... en las que varía únicamente el número másico. El número de neutrones,  $N$ , se obtiene, en cualquier caso, por la diferencia entre los números másico y atómico:

$$N = A - Z.$$

Se conocen tres isótopos distintos del hidrógeno (H): el hidrógeno común, cuyo núcleo  ${}_1 H^1$  consta de un simple protón; el deuterio, con un núcleo formado por un protón y un neutrón  ${}_1 H^2$ , y el tritio, cuyo núcleo presenta dos neutrones  ${}_1 H^3$ . De ellos, sólo los dos primeros son estables y se hallan en la naturaleza en una proporción próxima al 99,985 % el  ${}_1 H^1$ , y el 0,014 % el  ${}_1 H^2$ . El helio (He) tiene dos isótopos: el  ${}_2 He^3$  y el  ${}_2 He^4$ , si bien el primero es casi inexistente. El litio (Li), el tercer elemento más ligero del sistema periódico, presenta también dos isótopos: el  ${}_3 Li^6$  y el  ${}_3 Li^7$ , que se encuentran en una proporción del 7,5 % y del 92,48 % respectivamente. Casi todos los elementos tienen más de un isótopo estable, siendo el estaño, con 10, el que posee un número mayor de ellos.

La aparición de masas atómicas fraccionarias tiene ahora una fácil interpretación. Cuando se aísla un elemento a partir de procedimientos químicos, la muestra resultante contiene todos los isótopos del mismo y la masa total es la que se obtiene como medida proporcional de las masas de cada isótopo.

## Capítulo 2

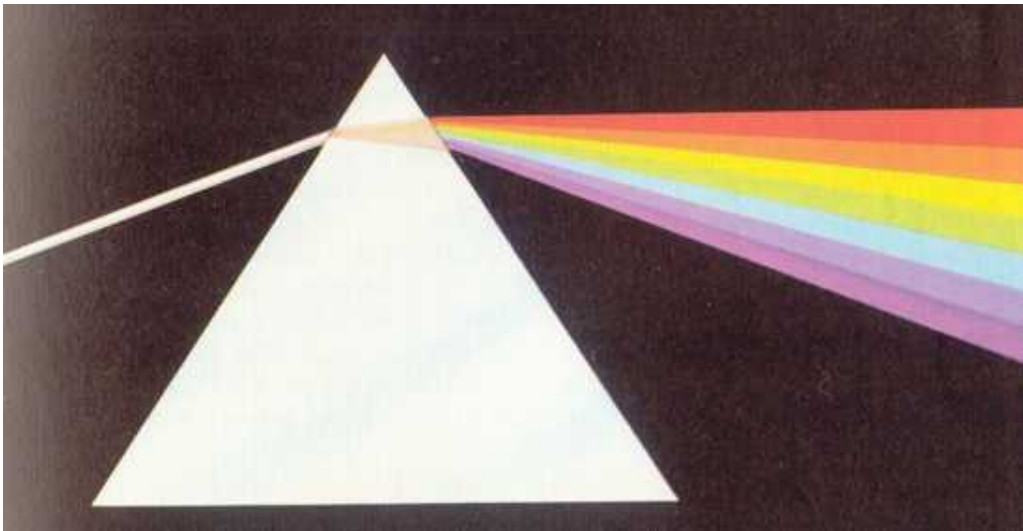
### La corteza del átomo

#### **Contenido:**

1. [Emisión y absorción de luz por la materia](#)
2. [Naturaleza de la luz](#)
3. [Líneas espectrales: una señal de identidad](#)
4. [Series espectrales del átomo de hidrógeno](#)
5. [Primeros modelos atómicos](#)
6. [Experiencias de Geiger y Marsden](#)
7. [Modelo atómico de Bohr.](#)
8. [Explicación de los espectros](#)
9. [Estructura fina del espectro](#)

#### **1. Emisión y absorción de luz por la materia**

Todos los sistemas materiales intercambian continuamente energía con el medio circundante.



*Descomposición de la luz blanca en los siete colores del espectro por medio de un prisma.*

Este fenómeno no es siempre fácilmente percibido, pero se hace patente cuando la temperatura de los cuerpos alcanza valores superiores a los 500 °C. En estas condiciones, tanto los sólidos como los líquidos y los gases tienen la propiedad de emitir luz, es decir, una de las formas conocidas de la energía, cuyo análisis reviste gran importancia para el conocimiento de la estructura de la materia.



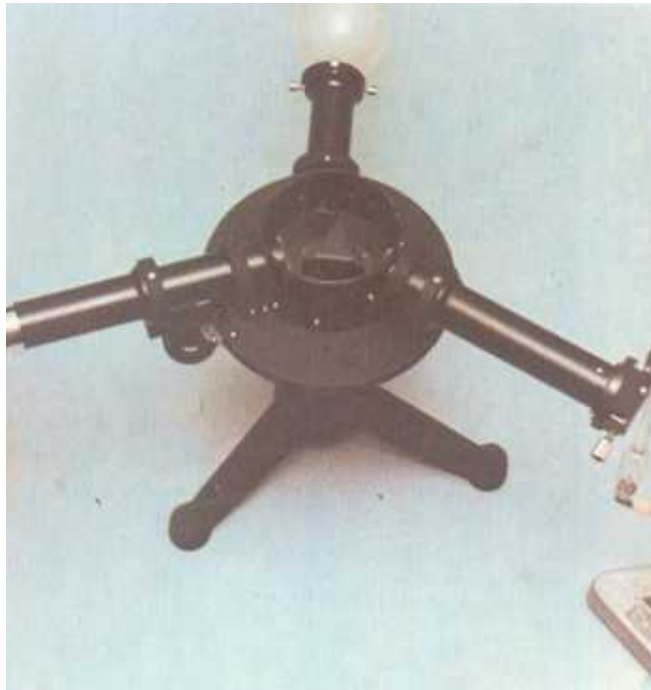
*Arco iris, meteoro que se produce por efecto de la dispersión de la luz en las pequeñas gotas de agua en suspensión en la atmósfera.*

El fenómeno de la aparición del arco iris después de las tormentas es de todos conocido. El efecto se debe al paso de la luz a través de las pequeñas gotas de agua en suspensión en la atmósfera, las cuales producen la dispersión de la luz, es decir, su descomposición en los distintos colores que la constituyen y que mezclados dan la sensación óptica correspondiente al color blanco. La descomposición de la luz puede estudiarse fácilmente con el único auxilio de un prisma de material transparente, como el vidrio o el cristal.

Cuando los rayos luminosos atraviesan un prisma, sufren dos desviaciones consecutivas, al entrar y al salir del mismo, y se abren en abanico en una sucesión de tonalidades cromáticas. El fenómeno se debe a que los distintos colores presentes en la luz inicial son diversamente desviados al atravesar el prisma. El color rojo es el que menos se desvía, mientras que el violeta tiene máxima desviación; entre ambos, y en una sucesión continuada, se distribuyen el

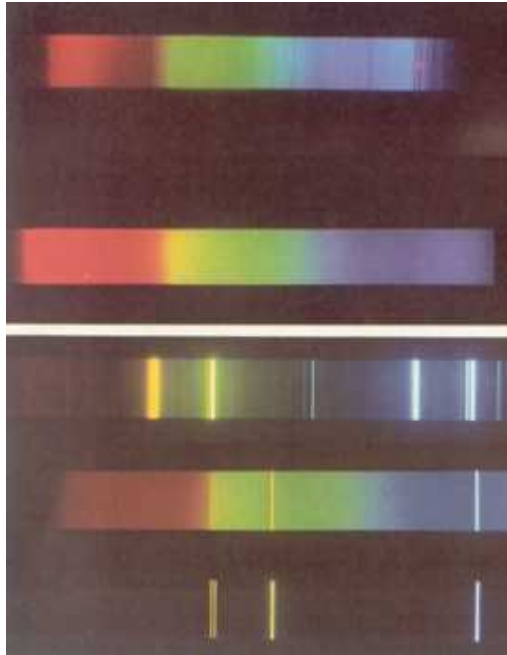
anaranjado, el amarillo, el verde, el azul y el añil. A este conjunto de colores se llama espectro de la luz y presenta diversas características, según cual sea la naturaleza del emisor de luz. Los sólidos y los líquidos incandescentes proporcionan siempre espectros continuos, semejantes a los de la luz del Sol, en los cuales aparecen todos los colores sin ninguna separación entre ellos. La situación cambia cuando la sustancia que emite es un gas; en este caso, en el espectro aparecen zonas luminosas separadas por otras oscuras.

El espectro producido por los átomos de un gas presenta una estructura caracterizada por la presencia de un número variable de líneas luminosas muy estrechas y claramente separadas unas de otras (espectro de líneas).



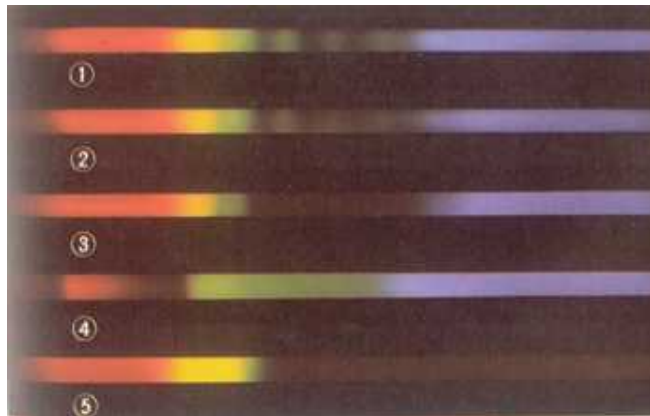
*Espectroscopio sencillo, del tipo de los usados para la enseñanza.*

Las moléculas gaseosas proporcionan un espectro de bandas, constituido por espacios luminosos, análogos a los de los espectros continuos, separados por zonas oscuras. Los instrumentos utilizados para estudiar los espectros de la luz son los espectroscopios y los espectrómetros.



*Espectros ópticos. Arriba, espectro de la luz solar en el que aparecen líneas de absorción (líneas de Fraunhofer) y espectro de la luz de una candela; abajo, espectros emitidos por lámparas de mercurio, en diferentes condiciones.*

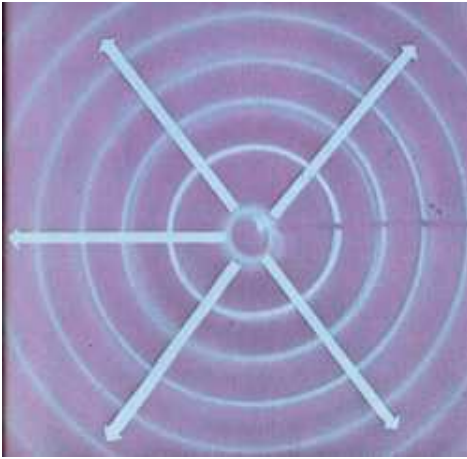
Cuando estos aparatos son de gran sensibilidad, los espectros de bandas se resuelven en un gran número de líneas aisladas pero muy próximas unas de otras.



*Espectros con bandas de absorción producidas por disoluciones de permanganato potásico a distintas concentraciones (1, 2 y 3), y por filtros de cristal coloreado (4 y 5).*

Simultáneamente a la propiedad de emitir luz, los cuerpos presentan también la propiedad de absorberla. Cuando un rayo de luz blanca atraviesa una determinada sustancia, se observa que en el espectro continuo que le corresponde faltan

precisamente las líneas o bandas que caracterizan al espectro de emisión de la sustancia. Por tanto, se trata de una situación simétrica.



*La perturbación producida en la superficie de un líquido se propaga en todas direcciones por medio de ondas esféricas; a la derecha, movimientos ondulatorios.*

Todos los cuerpos, si se les calienta o se les comunica energía por cualquier otro medio, emiten luz, y a su vez son capaces de absorber, en condiciones normales, luz de idénticas características que la emitida. Así, los sólidos y los líquidos proporcionan espectros continuos de absorción mientras que los gases dan espectros de absorción de líneas o bandas, según que la absorción de luz se deba a los átomos o a las moléculas.

## 2. Naturaleza de la luz

Imagínese el lanzamiento de una piedra sobre la superficie de un lago o de un estanque. A partir del punto en que caiga la piedra, se formarán una serie de ondulaciones concéntricas que se propagan por toda la superficie y que transmiten la perturbación producida en mi punto de la misma a todo el espacio. Se trata de un tipo especial de movimiento, el llamado movimiento ondulatorio, del que existen numerosos ejemplos en la naturaleza. Para caracterizarlo es necesario referirse a la velocidad de propagación del mismo, y también medir la distancia que separa dos crestas consecutivas, denominada longitud de onda, o el número de oscilaciones completas que una molécula líquida afectada por el movimiento realiza en 1 s, que

constituye la frecuencia. Si  $v$  es la velocidad de propagación,  $\lambda$  la longitud de onda y  $\eta$  la frecuencia, se verifica siempre la relación

$$v = \lambda \times \eta$$

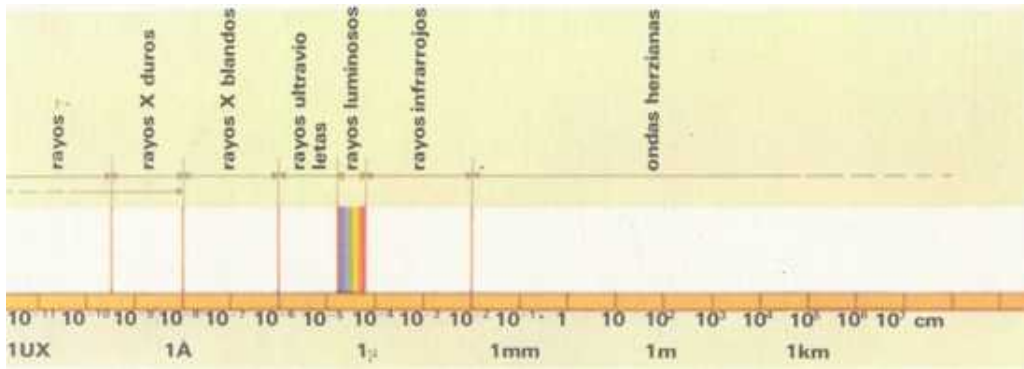
es decir, el resultado de multiplicar la longitud de onda por la frecuencia da la velocidad de propagación de la onda.



*Otro movimiento oscilatorio*

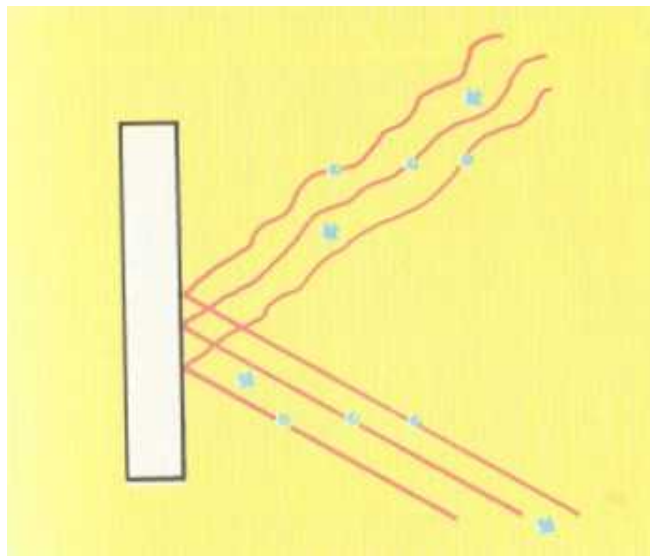
La luz constituye un tipo especial de perturbación que se propaga en forma de ondas, pero se puede intentar comprenderla pensando en el ejemplo de las ondas en el agua; su naturaleza es tan peculiar que no está ligada al movimiento de ningún tipo de partículas y puede propagarse en el vacío.





*Espectro electromagnético. Distribución de las radiaciones en función de la longitud de onda.*

En realidad, está formada por una complicada combinación de campos eléctricos y magnéticos cuya descripción necesita de un elevado número de conocimientos. A las ondas del tipo de las de la luz se las llama electromagnéticas y existe una variada gama de ellas, desde las ondas radiofónicas a los rayos X y los rayos  $\gamma$  (gamma); todas se propagan a una velocidad de 300.000 km/s y se diferencian únicamente por sus distintas longitudes de onda y frecuencia.



*El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por una sustancia sometida a un bombardeo de fotones.*

Las ondas de radio tienen longitudes que van desde varios centenares de metros hasta unos pocos centímetros; les siguen los rayos infrarrojos, comprendidos entre aquellas y la luz visible. Cada uno de los colores de la luz corresponde asimismo a

una longitud de onda distinta: el color rojo corresponde a longitudes de onda próximas a 0,00075 mm, mientras que los valores para el violeta son del orden de 0,0004 mm. A continuación del violeta se extiende la zona de las radiaciones ultravioletas, a las que siguen los rayos X, cuyas longitudes de onda son 100-10.000 veces menor que las de la luz. En virtud de la relación

$$\nu = \lambda \times \eta$$

a valores cada vez más pequeños de la longitud de onda corresponde valores mayores de la frecuencia: los rayos tienen una frecuencia mayor que los X, y éstos mayor que la de la luz, la cual es superior a la de las ondas de radio.

La atribución de propiedades ondulatorias a la luz y a las restantes radiaciones electromagnéticas es extraordinariamente útil, pero resulta insuficiente para explicar todos los fenómenos a que dan lugar tales radiaciones. Con objeto de explicar el efecto fotoeléctrico, es decir, la emisión de electrones por la materia cuando se ilumina a ésta con luz de determinada frecuencia, Einstein, en 1905, estableció la teoría según la cual la luz está constituida por unos corpúsculos elementales a los que llama fotones. Esta hipótesis es hoy universalmente aceptada.

*"En estas circunstancias, la atribución de las cualidades físicas habituales a los objetos atómicos conlleva un elemento esencial de ambigüedad, como se hace inmediatamente evidente en el dilema referente a las propiedades corpusculares y ondulatorias de los electrones y de los fotones, en donde nos encontramos con imágenes contradictorias que hacen referencia, cada una de ellas, a un aspecto fundamental de la evidencia empírica."*

NIELS BOHR

Según ella, cada fotón está asociado a una vibración de longitud de onda y frecuencia perfectamente definidas. Los fotones no tienen masa, pero transportan cierta cantidad de energía cuyo valor se obtiene mediante el producto de su frecuencia por un número, representado por el símbolo  $h$ , el valor del cual se ha

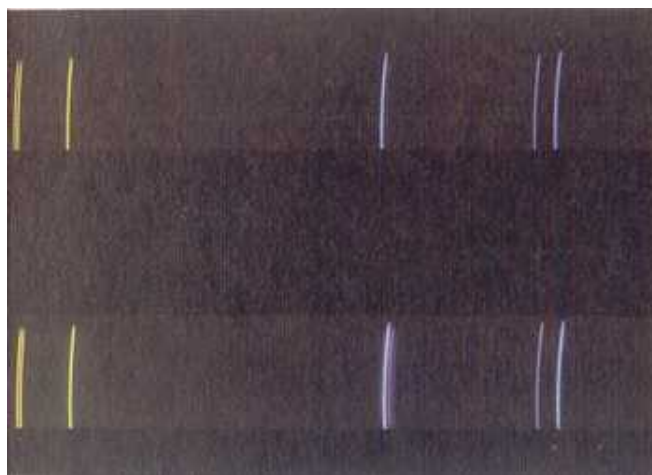
determinado experimentalmente; se trata de la constante de acción de Planck. La energía,  $W$ , de un fotón viene dada, pues, por la expresión

$$W = k \nu$$

La intensidad de una emisión luminosa depende del número de fotones que contenga, mientras que su energía es función directa de la frecuencia de éstos. La idealización de las radiaciones electromagnéticas simultáneamente en forma de ondas y de partículas es un paso obligado si se pretende entender la naturaleza de la luz a partir de conceptos comunes; los comportamientos ondulatorio y corpuscular constituyen dos aspectos complementarios de una misma realidad, que se manifiesta de distinta forma según el tipo de fenómenos que se producen en la interacción de la radiación con la materia.

### 3. Líneas espectrales: una señal de identidad

De la misma forma que cualquier persona puede ser identificada a partir de sus huellas dactilares, las rayas de los espectros de emisión de los átomos constituyen una señal de identidad que permite reconocer inequívocamente la presencia de un emisor de luz. Los átomos de una sustancia cualquiera, en estado gaseoso, cuando son excitados emiten radiaciones electromagnéticas.

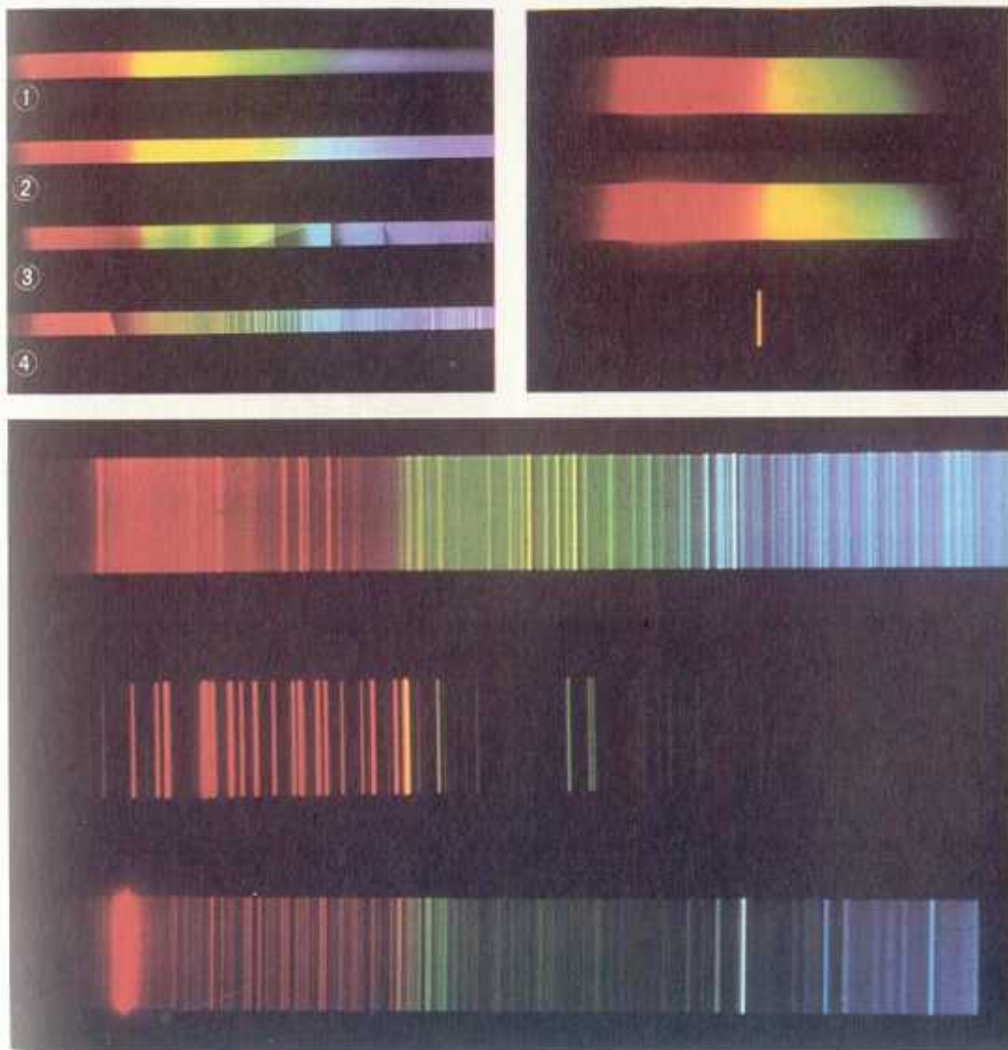


*Líneas del espectro de emisión del mercurio.*

Por medio de un espectroscopio estas radiaciones originan un espectro de rayas en el que cada línea corresponde a una longitud de onda, y por tanto a un color definido. En muchos casos los fotones emitidos tienen frecuencias pertenecientes a la zona del infrarrojo o a la del ultravioleta, por lo que son invisibles.

La simple inspección óptica no basta, en estas ocasiones, para identificar todas las líneas del espectro. Para reconocerlas es necesario sustituir el ojo por una placa fotográfica u otro dispositivo, en la que cada radiación dejará una señal con independencia de su carácter visible o invisible.

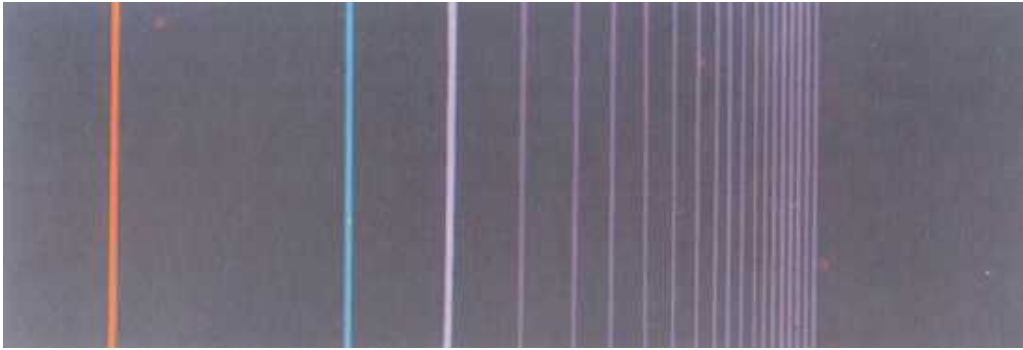
La precisión con que los espectros revelan la presencia de los elementos químicos es utilizada ampliamente en el análisis de las sustancias. La luz de sodio, por ejemplo, da una luz de tonalidad amarilla característica de ciertas lámparas utilizadas en el alumbrado público, el espectro de emisión pone de manifiesto la existencia, entre otras, de un conjunto de dos líneas muy próximas, o doblete espectral, de color amarillo y de gran intensidad, acompañado de otros dos más débiles. Uno de los éxitos más notables del análisis espectroscópico lo constituyó el descubrimiento, en 1868, de la existencia en la corona solar de un elemento químico, el helio, que era desconocido en la Tierra, y que sólo posteriormente fue identificado en la atmósfera. Técnicas similares han permitido el reconocimiento de dos elementos químicos presentes en las estrellas y en las atmósferas planetarias.



*Espectros ópticos: de una lámpara eléctrica (1), de la luz solar (2), del óxido de aluminio (3) y del acero (4). A la derecha, línea amarilla del espectro del mercurio. Abajo, en la parte inferior, espectro del hidrógeno en el cual las líneas emitidas por los átomos aparecen superpuestas a las bandas de las moléculas; en el centro, espectro de líneas del neón; en la parte superior, espectro del xenón a alta presión, en que las líneas aparecen superpuestas a un espectro continuo.*

#### **4. Series espectrales del átomo de hidrógeno**

Del hecho que cada elemento químico tenga un espectro característico deriva el que las líneas espectrales estén dispuestas con una cierta regularidad que, a su vez, se relaciona con la estructura del átomo.



*Líneas espectrales de la serie de Balmer del átomo de hidrógeno.*

En 1885, el físico suizo Balmer, al estudiar las líneas del espectro del hidrógeno en la zona visible, consiguió deducir una fórmula, que lleva su nombre, y que permite obtener, en forma sencilla, las longitudes de onda de aquéllas:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

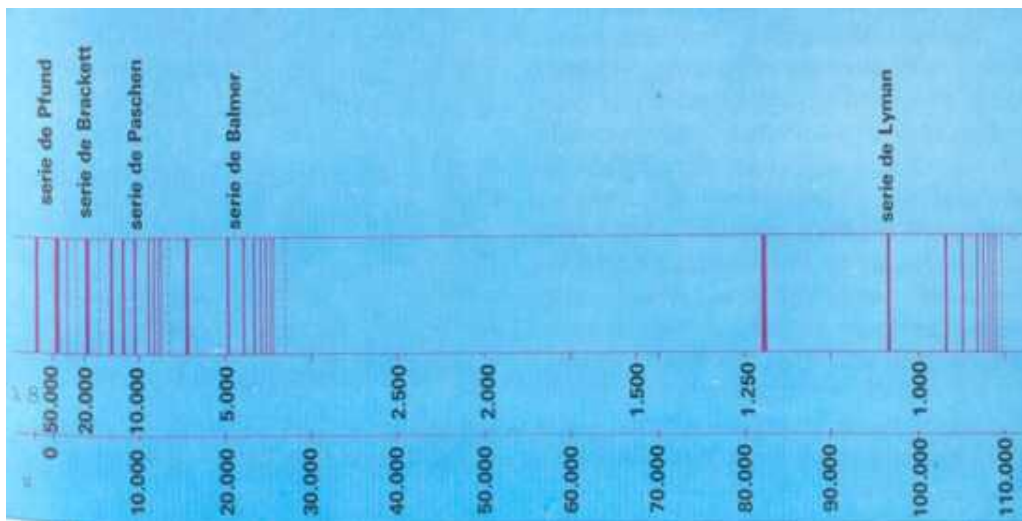
en donde  $R_H$  es la llamada constante de Rydberg, cuyo valor ha podido calcularse con gran precisión; la longitud de onda correspondiente a cada línea se obtiene haciendo que  $n$  tome los valores 3,4,5,6... El conjunto de estas líneas constituye la serie de Balmer. Cuando se estudió el espectro del hidrógeno en las zonas del infrarrojo y del ultravioleta se encontraron nuevas series espectrales a las que se dio el nombre de sus descubridores. Las longitudes de onda de las rayas de tales series se obtienen por medio de una expresión similar a la de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

en la que  $n$  puede tomar cualquier valor entero mayor que  $m$ . Para  $m = 1$ , se tiene la serie de Lyman, en la región del ultravioleta; para  $m = 2$ , la de Balmer; para  $m = 3$  y  $m = 4$ , las series de Paschen y Brackett, ambas en la región del infrarrojo, y así sucesivamente para todas las series.

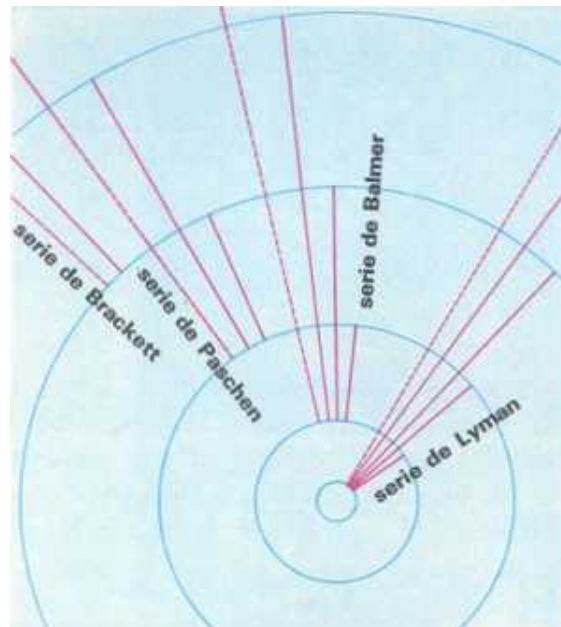
## 5. Primeros modelos atómicos

Ya se ha dicho que el átomo está constituido por un núcleo de carga positiva, formado por protones y neutrones, rodeado por una corteza o envoltura de electrones. El camino seguido para llegar a esta conclusión fue bastante laborioso. Tras el descubrimiento del electrón y de los fenómenos radiactivos, Thomson estableció la hipótesis que los átomos consistían en una esfera de carga eléctrica positiva distribuida uniformemente, en cuyo interior estaban contenidos los electrones. El número de éstos sería tal que su carga negativa compensaría a la positiva de la esfera.



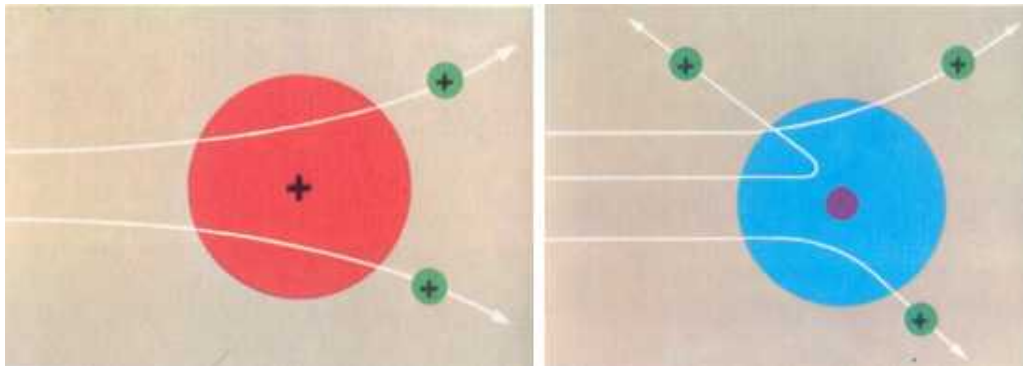
*Posición relativa de las series espectrales del átomo de hidrógeno.*

Según el modelo de Thomson, los electrones pueden emitir energía en forma de luz, pero del cálculo teórico se desprende que las longitudes de onda de los fotones emitidos han de abarcar todo el espectro sin ninguna limitación, y resulta imposible justificar la estructura discontinua de los espectros. Existe, todavía, un segundo inconveniente en este modelo. Si se bombardea una sustancia cualquiera con partículas  $\alpha$  (alfa) se produce una desviación de éstas en todas direcciones. El fenómeno se explica como consecuencia de las fuerzas de atracción y repulsión creadas entre la carga positiva de las partículas  $\alpha$  y las cargas negativas y positivas que contiene el átomo. En todas las experimentaciones realizadas se observa que algunas de las partículas  $\alpha$  sufren desviaciones superiores a  $90^\circ$  respecto de su dirección de incidencia, es decir, vuelven hacia atrás como rebotadas en los átomos.



*El modelo atómico de Bohr permite una interpretación correcta, en primera aproximación, de las líneas espectrales del átomo de hidrógeno.*

La imagen del átomo formulada por Thomson es incapaz de explicar este fenómeno; según él, la desviación de las partículas  $\alpha$  ha de ser siempre muy pequeña.

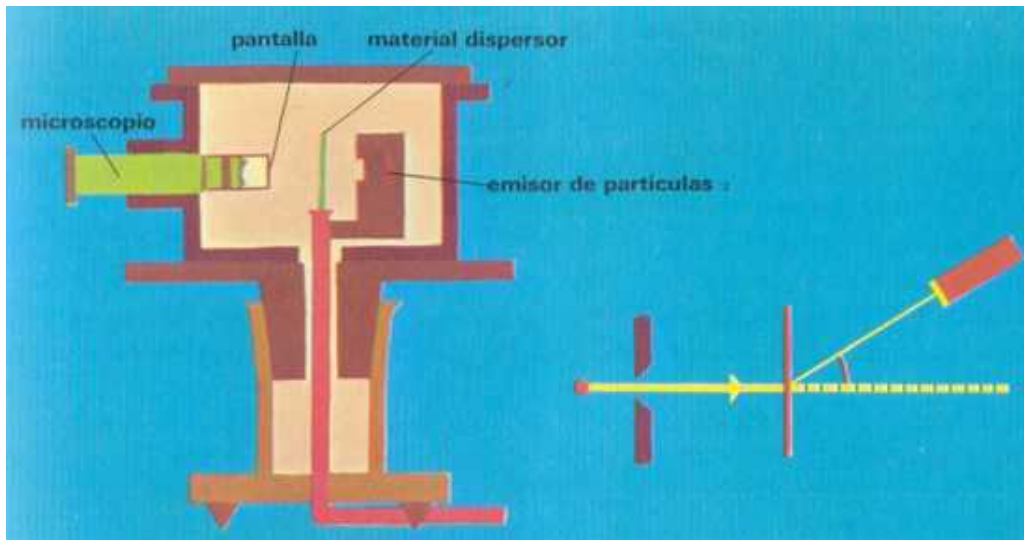


*Desviación de las partículas por un átomo, según el modelo de Thomson (derecha) y el de Rutherford (izquierda).*

Con objeto de resolver esta última dificultad, Rutherford, en 1911, elaboró una teoría basada en un nuevo modelo atómico, capaz de explicar los efectos observados en tal tipo de experimentos. Para ello supuso que en el interior del átomo existe un poderoso campo eléctrico creado por las cargas positivas, que



estarían concentradas en una diminuta región; es lo que actualmente se llama núcleo del átomo.



*Esquemas del dispositivo experimental utilizado por Geiger y Marsden. El giro del microscopio (a la derecha) permite detectar las partículas alfa dispersadas en diversas direcciones.*

De esta forma, cuando una partícula  $\alpha$  se acerca a dicha zona se encuentra sometida a una fuerza repulsiva muy intensa, cuyo valor es tanto mayor cuanto menor es la distancia a la que pasa la partícula del núcleo. En cambio, los electrones se hallan alrededor y ocupan en su movimiento todo el volumen de éste, por lo que su acción resulta muy débil, y puede considerarse que la desviación de las partículas  $\alpha$  al atravesar la materia se debe únicamente a su interacción con las cargas nucleares.

## 6. Experiencias de Geiger y Marsden

Las previsiones de Rutherford fueron confirmadas por sus colaboradores Geiger y Marsden. Para ello dispusieron de un emisor radiactivo, el radón Rn, generador de partículas  $\alpha$ , las cuales, después de pasar a través de un diafragma, incidían sobre una delgada lámina de un elemento utilizado como dispersor. A continuación de la lámina dispusieron una pantalla de sulfuro de cinc, sustancia que tiene la propiedad de emitir un destello luminoso cada vez que una partícula  $\alpha$  choca con ella.

Acoplado a la pantalla por su parte posterior se fijó un microscopio por el que se observaban los destellos. Todo este sistema estaba encerrado en una caja en la que se había hecho el vacío para evitar fenómenos secundarios que podrían presentarse como consecuencia del choque de algunas partículas  $\alpha$  con las moléculas del aire.

Tanto el emisor radiactivo como el diafragma y la lámina estaban fijos, en tanto que el microscopio, y con él la lámina de sulfuro de cinc, podían desplazarse con objeto de detectar las partículas desviadas en distintas direcciones. En una segunda serie de experiencias se dejaba fija la posición del microscopio y se variaba la velocidad de las partículas, intercalando entre el emisor y el diafragma placas de mica u otras sustancias que ejercen una acción de frenado. En todos los casos los resultados obtenidos confirmaban las predicciones teóricas realizadas a partir de la teoría nuclear de Rutherford. Poco más tarde, Geiger, usando un dispositivo experimental más refinado, comprobó que la carga eléctrica del núcleo coincidía con el número atómico del elemento usado como dispersor. De esta forma quedó confirmado el modelo atómico que considera al átomo como un núcleo de carga positiva rodeados por una nube de electrones.

## **7. Modelo atómico de Bohr**

El átomo de Rutherford resuelve parte de los problemas que plantea la estructura atómica. Con todo, presenta un grave defecto: los electrones en movimiento alrededor del núcleo deben emitir, según las previsiones de la teoría electromagnética, energía en forma continua, disminuyendo por consiguiente su velocidad. De esta forma, a causa de la atracción ejercida por las cargas nucleares, los electrones se acercarían progresivamente al núcleo hasta caer sobre él, colapsando al átomo. Además, los espectros de emisión de las diversas clases de átomos serían continuos y no de líneas, no diferenciándose unos de otros.

Todos estos inconvenientes fueron resueltos por Niels Bohr entre 1913 y 1915 mediante un nuevo modelo atómico. A pesar que tras el desarrollo de la mecánica cuántica debió ser corregido y completado, constituye una versión casi definitiva de la organización de la corteza del átomo, y como tal suele ser explicado a los alumnos de las escuelas medias. Bohr partió de la idea de Rutherford sobre la existencia de un núcleo atómico y se limitó a estudiar el movimiento de los

electrones en torno a éste. Para ello, se basó en los datos obtenidos de los espectros atómicos aplicando leyes admitidas de la física clásica junto con hipótesis de naturaleza cuántica en los puntos en que aquella es insuficiente. El modelo se fundamenta en los postulados que se describen a continuación:

a) Los electrones describen órbitas circulares alrededor del núcleo. De todas las órbitas imaginables en principio, sólo son posibles algunas de ellas, llamadas estacionarias.

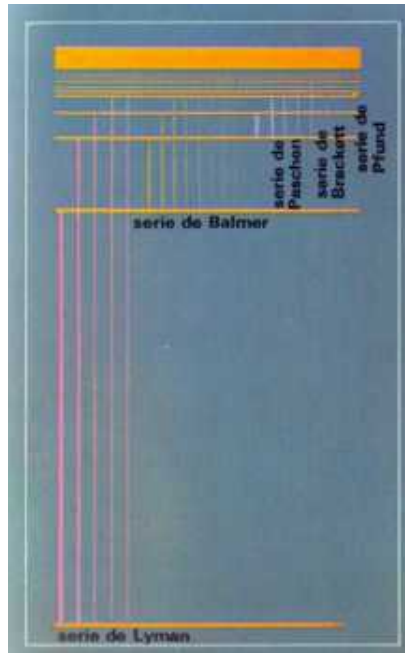
b) Los electrones en movimiento en una órbita estacionaria no emiten energía, contrariamente a lo postulado por el electromagnetismo clásico.

c) Cuando un electrón pasa de una órbita a otra emite, o absorbe, un fotón cuya energía es igual a la diferencia de energías de las órbitas entre las que tiene lugar la transición.

Cada una de las órbitas permitidas por el modelo de Bohr está caracterizada por poseer un valor definido de la energía de los electrones en la misma, la cual puede expresarse por la ley

$$W_n = -K/n^2$$

en la cual K es una constante que depende del número atómico del átomo considerado, mientras que n puede tomar cualquier valor entero positivo: 1, 2, 3, 4...



*Niveles de energía del átomo de hidrógeno. Las líneas del espectro se producen en transiciones de un nivel a otro.*

De esta forma, cada órbita constituye un nivel de energía del átomo que queda determinado por medio del número cuántico  $n$ . Para  $n = 1$ , se tiene el nivel de energía más bajo, llamado estado fundamental, siguiéndole un orden creciente de energías los niveles  $n = 2$ ,  $n = 3$ , etc. El comportamiento de los electrones en las órbitas estables se rige por las leyes de la física clásica, pero no así el paso de los electrones de una órbita a otra.

## 8. Explicación de los espectros

La naturaleza discreta de los espectros de emisión y de absorción de los átomos es interpretada, en primera aproximación, por el modelo de Bohr aplicado al átomo de hidrógeno y con pequeñas correcciones a los átomos hidrogenoides. En efecto, el paso de un nivel a otro de energía superior sólo puede realizarse si el electrón adquiere, por cualquier medio, la energía suficiente; por el contrario, el "salto" a un nivel inferior va acompañado de la emisión de energía en forma de radiación electromagnética. Cuando los átomos son excitados, es decir, cuando se les comunica alguna forma de energía, sus electrones pueden absorber parte de la misma y "saltar" a un nivel superior. Debido a su tendencia a ocupar los niveles de

mínima energía, los electrones excitados vuelven espontáneamente en un tiempo muy corto a su nivel original y, en este proceso, emiten un cuanto de radiación electromagnética o fotón. Dado que la distribución de los niveles de energía está predeterminada en cada clase de átomos, y dado que la energía de los fotones emitidos ha de coincidir con la diferencia de energías entre dos niveles, se comprende fácilmente que la energía, y con ella la longitud de onda de los fotones, no puede tomar cualquier valor, lo cual justifica la distribución discreta de las longitudes de onda de la luz u otras radiaciones detectadas.

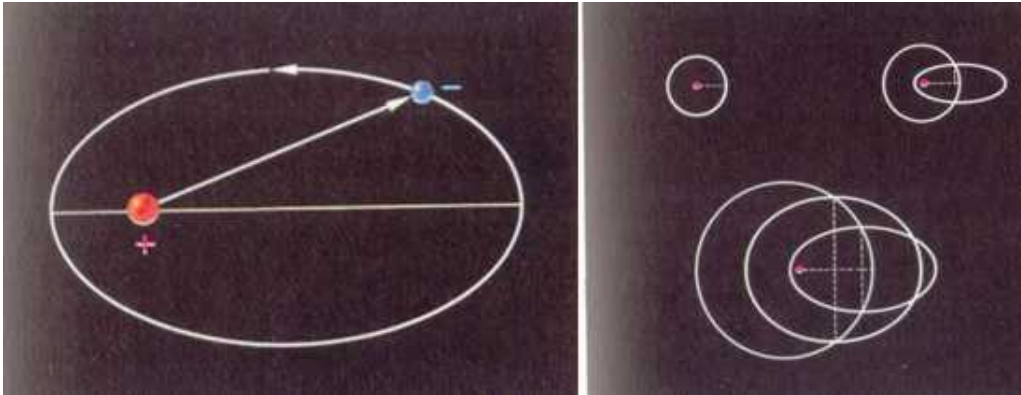
Sin embargo, el modelo va más allá de una simple descripción cualitativa, puesto que en el caso de los átomos más sencillos, el de hidrógeno en particular, permite predecir con exactitud el valor numérico de las longitudes de onda emitidas. Imagínese un electrón de un átomo de hidrógeno que pasa de un nivel cualquiera, que llamaremos  $n$ , al nivel 2; la energía del fotón que se emite en esta transición es la diferencia entre  $W_n$  y  $W_2$ , es decir

$$k = \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

expresión que recuerda la fórmula de Balmer, ya citada anteriormente que puede reproducirse sin más que sustituir la energía del fotón por su expresión en función de la longitud de onda. Cada una de las series espectrales del átomo de hidrógeno corresponde a transiciones hacia un determinado nivel de energía: las líneas de la serie de Lyman se originan en transiciones desde cualquier nivel al fundamental ( $n = 1$ ); las de la serie de Balmer a transiciones desde niveles superiores al nivel  $n = 2$ ; las de la serie de Paschen al nivel 3, y así sucesivamente para todas las series conocidas. Dado que la distancia entre dos niveles es tanto más pequeña cuanto mayores son los números cuánticos que los caracterizan, se comprende que las líneas de la serie de Lyman correspondan a fotones de mayor energía que los de la serie de Balmer, y que los de ésta sean mayores que los de la de Paschen.

## 9. Estructura fina del espectro

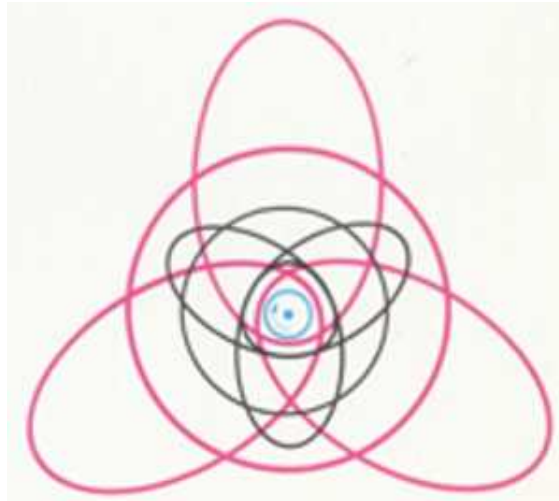
La idea de Bohr sobre los electrones describiendo órbitas circulares en torno al núcleo fue ampliada por Sommerfeld con objeto de incluir órbitas elípticas.



*Órbitas elípticas de los electrones alrededor del núcleo atómico.*

El camino seguido para obtener este resultado requiere un mecanismo matemático complejo que escapa al carácter de esta obra.

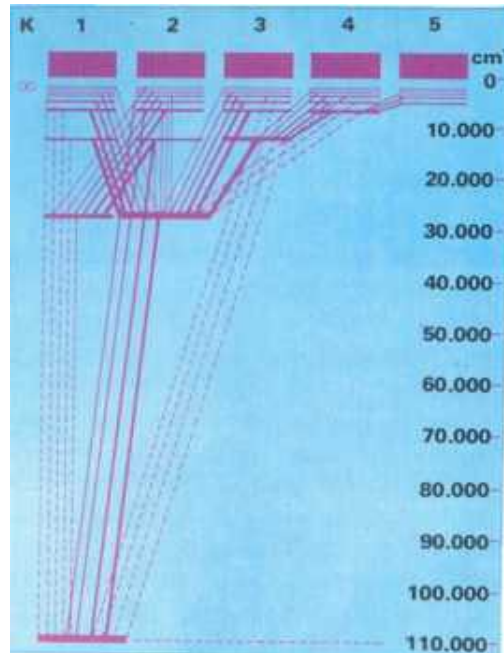
Con todo, cabe señalar la principal novedad aportada por Sommerfeld, consistente en la introducción de dos números cuánticos en lugar de uno, como sucede en el modelo de Bohr. Se trata del número cuántico acimutal,  $k$ , y del número cuántico radial,  $n$ ; ambos pueden tomar únicamente valores enteros positivos, pudiendo  $n$ , valer también cero, y de la relación entre ellos depende el que las elipses descritas por los Para  $n = 1$ , se tiene el nivel de energía fundamental, en este caso  $k$  es igual a 1,  $n$ , a cero, y la trayectoria electrónica es una circunferencia. Para el segundo nivel de energía,  $n = 2$ ,  $k$  puede tomar los valores 2 y 1, que corresponden, respectivamente, a una circunferencia y a una elipse. Para  $n = 3$ ,  $k$  puede tener los valores 3, 2 y 1, y la trayectoria del electrón alrededor del núcleo es una circunferencia para  $k = 3$ , y sendas elipses, una más alargada que la otra, para los restantes valores.



Por consiguiente, la única novedad introducida por el modelo de Sommerfeld se reduce a posibilitar diversas trayectorias de los electrones dentro de cada nivel de energía en lugar de una sola.

El perfeccionamiento técnico de los espectroscopios ha permitido observar que muchas de las líneas de los espectros que parecían unitarias están constituidas, en realidad, por dos o más líneas muy próximas entre sí. Se trata de la llamada estructura fina del espectro, la cual representa una nueva complicación que pone en cuestión la validez de los modelos atómicos que se acaban de describir.

No obstante, Sommerfeld demostró la posibilidad de modificar su modelo de forma que incluyese nuevas líneas espectrales. Para ello tuvo en cuenta las previsiones de la teoría de la relatividad, formulada por Einstein en 1905, según la cual la masa de los cuerpos varía con la velocidad, y ya no es válido, especialmente cuando esta última es muy grande, considerarla una magnitud constante, tal como se hace en mecánica clásica.



*Niveles de energía del átomo de hidrógeno, incluyendo la estructura fina. Las líneas verticales indican las transiciones posibles entre distintos niveles.*

Al incluir la corrección relativista de masa en los electrones de la corteza atómica, las órbitas dejan de cerrarse sobre sí mismas, por lo que la trayectoria de los electrones toma forma de roseta y su energía viene dada, en este caso, por la fórmula:

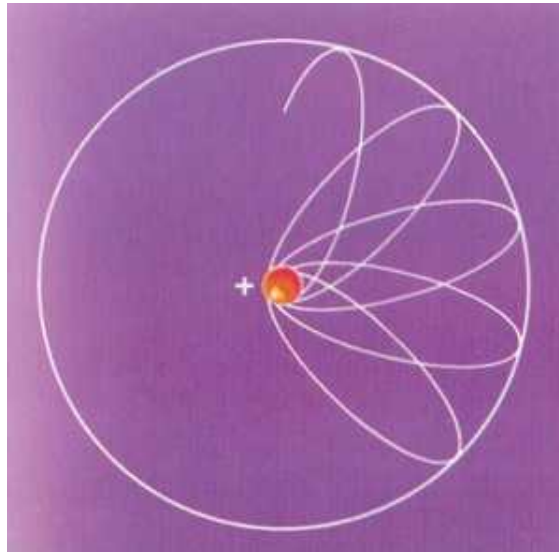
$$W_{nk} = \frac{K}{n^2} - \frac{K\alpha^2}{n^4} \left( \frac{n}{k} - \frac{3}{4} \right)$$

en la cual aparece el número cuántico acimutal  $k$ , junto con el principal. Es decir, la energía del electrón depende a la vez de  $n$  y de  $k$ ; por consiguiente, cada una de las órbitas elípticas distintas consideradas antes corresponden a valores distintos (aunque muy próximos para un mismo  $n$ ) de la energía. Se plantea de esta forma la posibilidad de "saltos" de los electrones entre un mayor número de órbitas y se justifica la existencia de las preocupantes líneas descubiertas en la estructura fina de los espectros. Para completar el cuadro falta todavía la introducción de una regla de selección: los electrones pueden saltar de un nivel de energía a otro cualquiera, pero en estos saltos el número  $k$  sólo puede variar en una unidad. Esta restricción,



en principio de origen empírico, ha de añadirse al modelo para evitar la aparición de más líneas espectrales de las observadas realmente por medio de los espectroscopios.

La teoría de Sommerfeld, que se aplica con buenos resultados al átomo de hidrógeno, encuentra serias dificultades cuando intenta explicar los espectros de átomos con 2 ó más electrones, y es incapaz de justificar el desdoblamiento de las líneas del espectro en átomos sometidos a la acción de un campo magnético (efectos Zeeman y Paschen-Back). Para ello, hay que recurrir a un nuevo número cuántico, el número cuántico magnético, e introducir la hipótesis del spin del electrón, efecto especial que puede atribuirse a un movimiento de rotación del electrón sobre sí mismo.



*Las órbitas de los electrones tienen forma de roseta cuando se incluye la corrección de la masa postulada por la teoría de la relatividad.*

En realidad, la correcta descripción de los espectros y, en general, de todos los fenómenos atómicos, sólo puede conseguirse en el marco de la mecánica cuántica, de la que se tratará más adelante.

## Capítulo 3

### El núcleo atómico

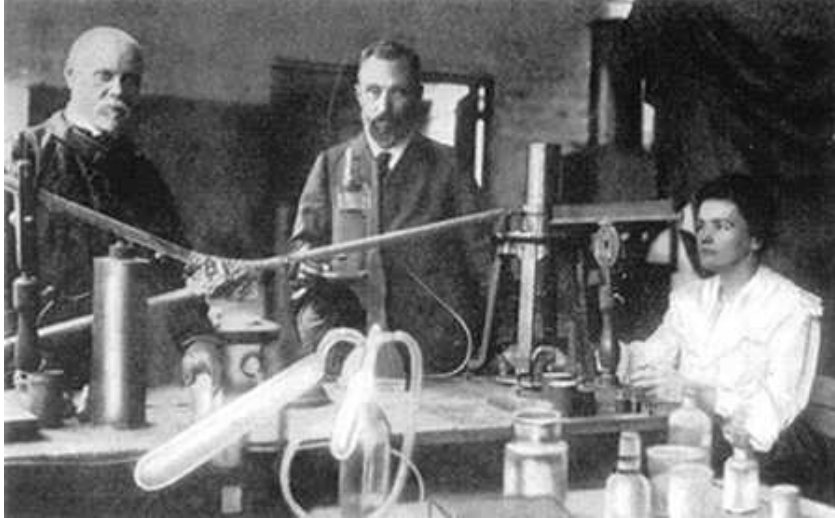
#### **Contenido:**

1. [Radiactividad natural](#)
2. [Clases de radiación](#)
3. [Transmutaciones radiactivas](#)
4. [Período de semidesintegración](#)
5. [Familias radiactivas](#)
6. [Equilibrio radiactivo](#)
7. [La serie del neptunio](#)
8. [Isótopos radiactivos ligeros](#)
9. [Radiactividad artificial](#)
10. [Proyectiles nucleares](#)
11. [Radiactividad inducida](#)
12. [Fusión y fisión](#)

#### **1. Radiactividad natural**

Los átomos emiten radiaciones

Se ha explicado ya que los electrones corticales del átomo pueden absorber energía y cambiar de nivel. En algunos casos la energía absorbida puede ser lo suficientemente grande como para permitir que un electrón realice un “salto definitivo” y escape de la atracción del núcleo. El resultado será un ion, es decir, un átomo al que falta un electrón.



*Los esposos Pierre, en el centro, y Marie Curie, a la derecha, en el Laboratorio del Radio.*

En condiciones extremas puede conseguirse que un átomo pierda todos o casi todos sus electrones, quedando un núcleo aislado. Por consiguiente, los átomos no son indivisibles, como se creyó durante largo tiempo. Sin embargo, la ionización de un átomo no deja de ser un fenómeno circunstancial: cualquier átomo ionizado en contacto con la materia no tardará en obtener nuevos electrones, absorbiéndolos del medio circundante y reconstruyendo su estructura original. Para dividir definitivamente un átomo es necesario hacer algo más: romper su núcleo. ¿Es posible?



*Válvula de rayos X. Los rayos X emitidos por la lámpara, al alcanzar las paredes de ésta, producen luz por fluorescencia.*

La respuesta es afirmativa, como era de esperar considerando la complejidad estructural de los núcleos. Pero hay algo más: no sólo es posible romper los núcleos, sino que algunos de ellos lo hacen espontáneamente emitiendo radiaciones y transformándose a continuación en otros distintos.

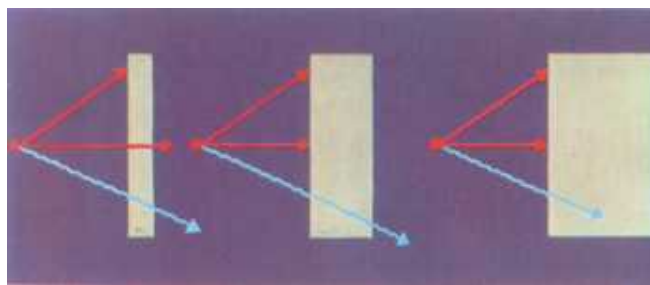
La primera prueba que determinados núcleos emiten radiaciones la obtuvo Henri Becquerel en 1896, en el curso de unos estudios sobre la fosforescencia de las sustancias. El carácter prácticamente casual de este descubrimiento, que no es único en el desarrollo de la física (Roentgen descubrió también los rayos X por casualidad), merece especial atención. Una de las experiencias realizadas por Becquerel en el curso de sus investigaciones, consistió en someter una sal de uranio dispuesta sobre una placa fotográfica envuelta en un papel grueso, a la acción de los rayos solares. Después de un tiempo de exposición conveniente, examinaba la impresión que dejaban sobre la placa las radiaciones emitidas por la sal, y que se suponían debidas a la fosforescencia. En un día lluvioso, no adecuado para tales experimentos, depositó los materiales utilizados en un cajón, a la espera de mejores condiciones climatológicas; al revelar algunas placas pocos días después descubrió que estaban parcialmente veladas. El fenómeno ya no podía justificarse como resultado de la fosforescencia excitada por la luz, dado que ésta no había actuado

sobre la sal. Becquerel realizó entonces pruebas con distintos compuestos de uranio y encontró los mismos resultados. La única explicación posible era suponer que el uranio, y no sus compuestos, tiene la propiedad de emitir radiaciones capaces de impresionar placas fotográficas.

Dos años después de este descubrimiento, los esposos Curie hallaron dos nuevos elementos radiactivos, el polonio y el radio, y se comprobó que la actividad radiactiva de este último era un millón de veces superior a la del uranio. Actualmente, se sabe que todos los átomos de los elementos cuyo número atómico,  $Z$ , es superior a 83 tienen propiedades radiactivas, así como algunos isótopos del bismuto ( $Z = 83$ ), del plomo ( $Z = 82$ ) y del talio ( $Z = 81$ ).

## 2. Clases de radiación

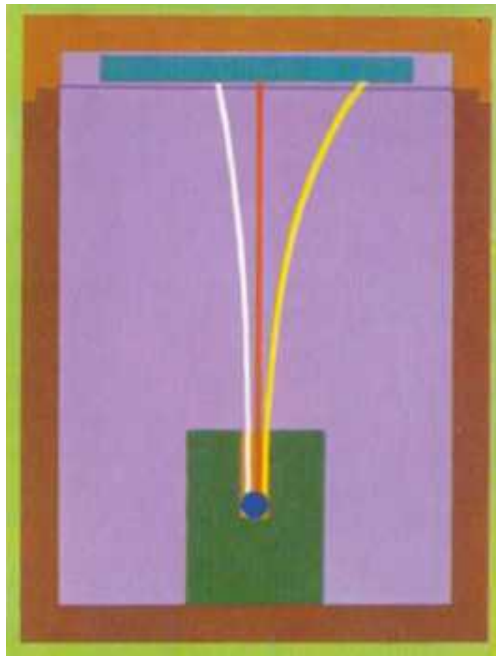
Los cuerpos radiactivos emiten tres tipos distintos de radiación, a los que, por orden cronológico de descubrimiento, se llamó rayos alfa ( $\alpha$ ), rayos beta ( $\beta$ ) y rayos gamma ( $\gamma$ ). Los tres pueden identificarse por un procedimiento relativamente sencillo: se coloca una pequeña cantidad de una sustancia radiactiva en el interior de una cavidad profunda practicada en el interior de un bloque de plomo, y encima de éste, a poca distancia, se dispone una placa fotográfica; el conjunto se deposita en el interior de una cámara en la que se ha hecho el vacío para evitar acciones extrañas debidas a la interacción de la radiación con el aire.



*Distinto poder de penetración de los rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  en la materia.*

Transcurrido cierto tiempo, se observa que la placa ha quedado velada en una zona cuya extensión es ligeramente superior a la de la abertura del orificio. Si se repite el experimento colocando un imán lo bastante potente en la zona que recorren las radiaciones aparecen tres señales distintas sobre la placa: una de ellas, bastante

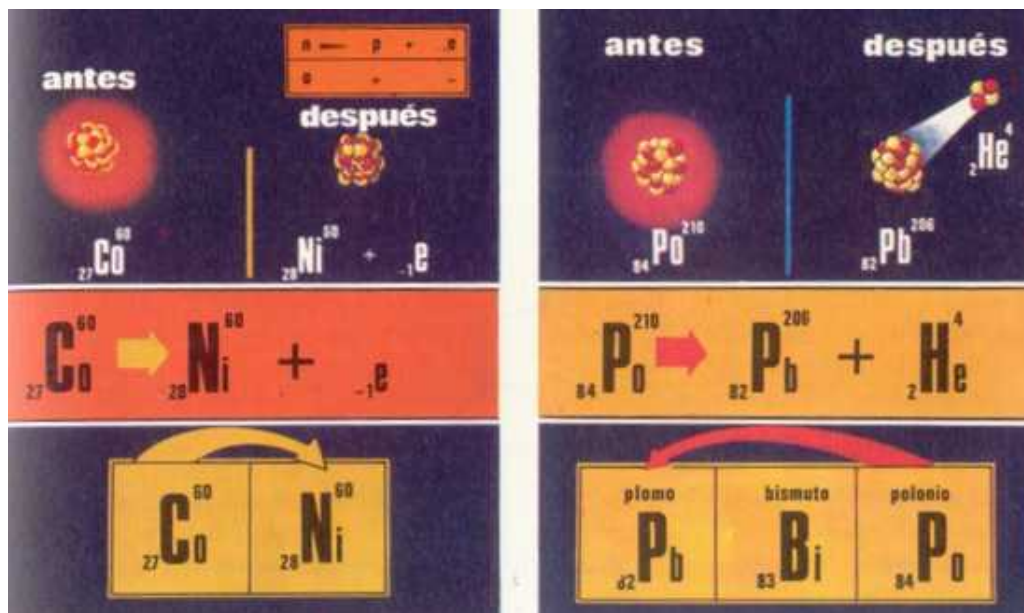
separada de la zona central, corresponde a partículas de carga negativa (los rayos  $\beta$ ); otra poco desviada, corresponde a partículas de carga positiva (rayos  $\alpha$ ), y finalmente se aprecia una impresión en la zona central, producida por los rayos  $\gamma$  que corresponde a radiaciones que no han sufrido ninguna desviación y que, por tanto, carecen de carga eléctrica. La distinta desviación sufrida por los rayos  $\alpha$  y  $\beta$  indica, por otra parte, que la masa de los primeros ha de ser mucho mayor que la de los segundos.



*Las sustancias radiactivas emiten tres tipos de radiaciones que son desviadas en forma distinta por un campo magnético.*

Un nuevo procedimiento diferenciador de las emisiones radiactivas se basa en su capacidad de penetración en la materia. Los rayos  $\alpha$  son detenidos por un simple pedazo de papel y en el aire su recorrido máximo apenas sobrepasa algunos centímetros. Los rayos  $\beta$  pueden atravesar delgadas láminas de aluminio, de hasta 1 mm aproximadamente, y en el aire pueden llegar a recorrer hasta 2 m. Los rayos  $\gamma$  son los más penetrantes: su alcance a través del aire resulta extraordinario, y para detenerlos completamente debe interponérseles un grueso bloque de plomo que, en algunos casos, ha de tener 22 cm de espesor.

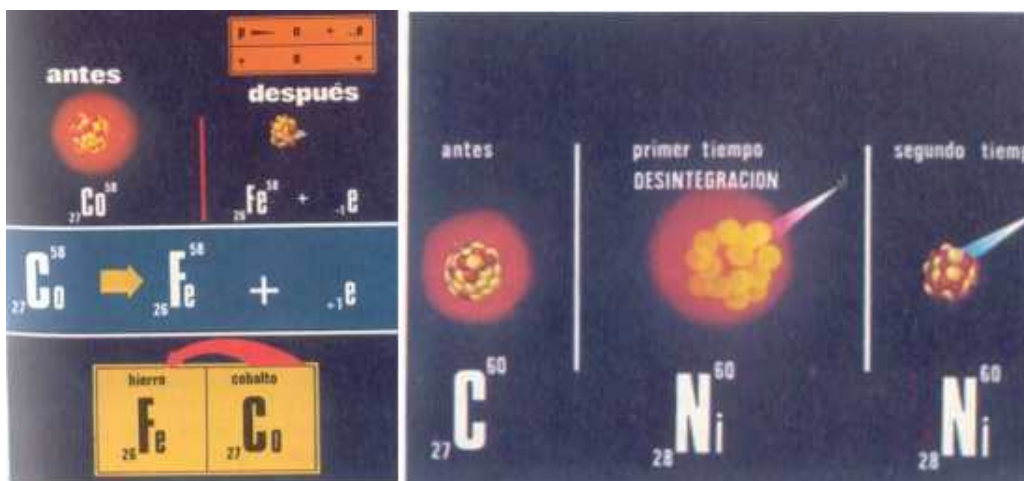
En contraste con la propiedad de penetración, la capacidad ionizadora de estas radiaciones varía en sentido inverso. Se entiende por poder ionizante la capacidad de una radiación determinada de arrancar electrones de la corteza de los átomos, convirtiéndolos en iones; se trata de un fenómeno fácilmente detectable, puesto que un gas ionizado deja de ser eléctricamente neutro y se convierte en conductor de la electricidad. Pues bien, el poder de ionización de las partículas  $\alpha$  es 100 veces superior a la de las  $\beta$ , y la de éstas, 100 veces superior a la de los rayos  $\gamma$ .



*Transmutaciones radiactivas producidas por emisión de una partícula  $\beta^-$  o  ${}_{-1}^0\text{e}$  (izquierda), de una partícula  $\alpha$  o  ${}_{2}^4\text{He}$  (derecha)*

El conjunto de estas propiedades, penetración y poder ionizador, proporciona nuevas indicaciones sobre la naturaleza de cada tipo de radiación. La escasa penetrabilidad de los rayos  $\alpha$  se relaciona con una masa y un volumen relativamente elevados, que hacen que tales partículas choquen fácilmente con los átomos que encuentran en su camino; en cada choque pierden parte de su energía, hasta quedar detenidas o ser absorbidas por algún núcleo; a su vez, si el choque tiene lugar con los electrones corticales, éstos pueden ser arrancados del átomo ionizándolos. Las partículas  $\beta$ , mucho más pequeñas, tienen una probabilidad mayor de pasar a través de la malla de núcleos y electrones que constituyen cualquier materia, separados unos de otros por distancias enormes en proporción a su

tamaño; por esta razón, su penetración es bastante grande y su poder ionizador reducido. Finalmente, los rayos  $\gamma$  deben ser como sutiles agujas, desprovistas de masa, capaces de realizar recorridos enormes antes de encontrar ningún obstáculo. En realidad la naturaleza de la radiación  $\gamma$  es muy distinta de la de los rayos  $\alpha$  y  $\beta$ . Se trata de una radiación electromagnética de naturaleza idéntica a la de la luz y los rayos X, pero con un contenido energético enormemente superior; las frecuencias de los fotones que la componen son las más elevadas de las detectadas hasta hoy y su longitud de onda es extraordinariamente reducida. En cambio, la radiación  $\alpha$  está constituida por núcleos de helio (partículas  $\alpha$ ) y su naturaleza es, por tanto, corpuscular, como la de la radiación  $\beta$ . Respecto a esta última conviene hacer una precisión: los rayos  $\beta$  están constituidos por partículas cuya masa coincide con la del electrón, la mayor parte de ellos son desviados por los imanes en sentido contrario a los rayos  $\alpha$  y  $\gamma$  su carga es negativa e igual a la del electrón. En algunos casos, tales rayos van acompañados por una componente de partículas cuya carga eléctrica es positiva; se trata de los positrones, o electrones de carga positiva, descubiertos en 1932. Para distinguir ambas emisiones se representa por  $\beta^-$  la constituida por electrones y por  $\beta^+$  la formada por positrones (cuando no se hace esta precisión suele entenderse por lo general que se habla de la primera emisión).



*Transmutación radiactiva de una partícula  $\beta^+$  o  $_{+1}e$  (izquierda) y por emisión de una partícula  $\beta^-$  seguida de la emisión de radiación  $\gamma$  (derecha).*



### 3. Transmutaciones radiactivas

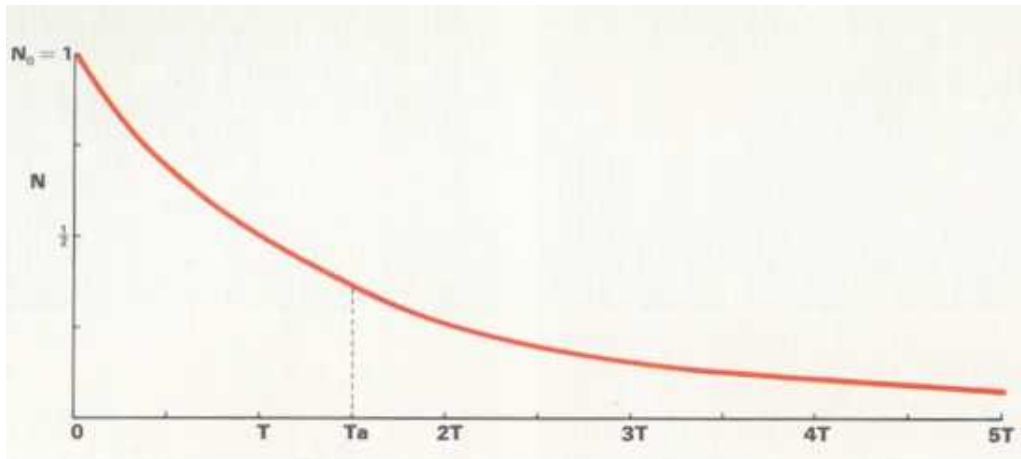
La emisión de una partícula  $\alpha$  o  $\beta$  por parte de un núcleo radiactivo lleva consigo la transformación del mismo en un núcleo de un elemento distinto. Cuando un núcleo emite una partícula  $\alpha$  (desintegración  $\alpha$ ), su carga eléctrica disminuye en dos unidades y, por tanto, su número atómico disminuye también en dos unidades, mientras que el número másico en correspondencia a la pérdida de cuatro nucleones, disminuye en cuatro unidades. Un ejemplo de esta transmutación lo constituye la desintegración del uranio I, el elemento radiactivo natural más abundante, que es un isótopo del uranio (U) de número másico 238 ( ${}_{92}\text{U}^{238}$ ); este elemento se transforma, por emisión de una partícula  $\alpha$ , en el llamado uranio X<sub>1</sub>, que es un isótopo del torio ( ${}_{90}\text{Th}^{234}$ ), de número másico 234. La masa del uranio disminuye en cuatro unidades mientras que su carga eléctrica lo hace en dos, transformándose en el elemento situado dos casillas detrás de aquél en el sistema periódico de los elementos.

La emisión de una partícula  $\beta$  por un núcleo radiactivo (desintegración  $\beta$ ) deja invariable el número másico del mismo, mientras que su número atómico aumenta en una unidad, transformándose el núcleo en el del elemento que le sigue inmediatamente en la clasificación periódica de los elementos. Este cambio se interpreta como resultado de la transformación de un neutrón del núcleo en un protón y en un electrón que es expulsado; en este proceso, la carga eléctrica del núcleo aumenta en una unidad, al quedar retenido el protón así formado. Por otra parte, el número de nucleones sigue siendo el mismo, lo cual explica la invariabilidad del número másico. El uranio X<sub>1</sub> se desintegra a través de este proceso, convirtiéndose en uranio X<sub>2</sub>, isótopo del protactinio, de número másico 234, ( ${}_{91}\text{Pa}^{234}$ ); a su vez, este elemento emite también una partícula  $\beta$ , convirtiéndose en uranio II ( ${}_{92}\text{U}^{234}$ ), que es un nuevo isótopo del uranio.

La emisión de rayos  $\gamma$  (desintegración  $\gamma$ ) no lleva aparejada ninguna variación de los números atómico y másico, se interpreta como resultado de un proceso de reajuste energético que tiene lugar a continuación de la emisión de una partícula  $\alpha$  o  $\beta$  por parte de un núcleo.

#### 4. Período de semidesintegración

Se entiende por actividad de una sustancia radiactiva el número de átomos de dicha sustancia que se desintegran por unidad de tiempo.



*La actividad de una sustancia radiactiva disminuye en forma exponencial.*

En 1 g de uranio 238 se producen, en 1 s, unas 12.000 desintegraciones; sin embargo, el uranio es una sustancia poco activa, puesto que tal cantidad resulta muy pequeña comparada con los 2.500 trillones de átomos contenidos en ese gramo. La actividad del radio es más de un millón de veces superior a la del uranio, y la del radio C' más de 100 billones de veces superior a la del radio. La unidad utilizada para medir la actividad es el curie, que corresponde a la actividad de una muestra en la que se producen 37.000 millones de desintegraciones por segundo.

La actividad radiactiva tiene un comportamiento especial. Si se mantuviera constante bastarían unos millones de años para que 1 g del uranio en cuestión desapareciera, y lo mismo sucedería con la totalidad del uranio que en un momento determinado pudiera haber en la Tierra. ¿Cómo es posible, en tales condiciones, que ese elemento sea relativamente abundante? Se debe a que la actividad radiactiva decrece con la cantidad de sustancia, cuando tan sólo quede 0,5 g, el número de desintegraciones que se producirán serán aproximadamente de 6.000 por segundo. La representación gráfica de la actividad de cualquier sustancia radiactiva da lugar a una curva exponencial que no se anula hasta el infinito.

*“Hasta qué punto el desarrollo de la física atómica ha producido un cambio en nuestra actitud respecto a la descripción de la naturaleza, queda quizá claramente ilustrado por el hecho de que el principio de causalidad, que hasta ahora había sido siempre considerado como el fundamento indiscutible de cualquier interpretación de los fenómenos naturales, se ha visto que era un esquema demasiado limitado para comprender las regularidades peculiares que gobiernan los procesos atómicos individuales.”*

NIELS BOHR

El tiempo necesario para que la cantidad de átomos supervivientes de una muestra radiactiva cualquiera se reduzca a la mitad de los átomos iniciales es una magnitud característica de los núclidos componentes, y se denomina período de semidesintegración. Para comprender mejor el significado de esta magnitud supóngase, por ejemplo, que en un momento determinado recibimos un millón de pesetas con la condición de conservarlo, devolviendo cada año la mitad de la cantidad que tengamos en nuestro poder. Transcurrido el primer año tendríamos que devolver 500.000 pesetas, 250.000 al final del segundo, 125.000 en el tercero y así sucesivamente. Por este procedimiento cada año dispondríamos de menos dinero que en el anterior, pero nunca llegaríamos a agotarlo. El equivalente del período de semidesintegración de la “muestra monetaria” sería en este caso de un año.

**Relación entre los nombres de algunas sustancias radiactivas y los correspondientes elementos químicos**

Radioelemento	Elemento	Núcleo
Actinouranio	Uranio	${}_{92}\text{U}^{238}$
Actinio D	Plomo	${}_{82}\text{Pb}^{207}$
Radio A	Polonio	${}_{84}\text{Po}^{218}$
Radio C	Bismuto	${}_{83}\text{Bi}^{214}$
Radio C'	Polonio	${}_{84}\text{Po}^{214}$
Radio C''	Talio	${}_{81}\text{Tl}^{210}$
Radio B	Plomo	${}_{82}\text{Pb}^{214}$
Radio G	Plomo	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
Radio F	Polonio	${}_{84}\text{Po}^{210}$
Torio D	Plomo	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
Uranio I	Uranio	${}_{92}\text{U}^{235}$
Uranio II	Uranio	${}_{92}\text{U}^{234}$
Uranio X <sub>1</sub>	Torio	${}_{90}\text{Th}^{234}$
Uranio X <sub>2</sub>	Protactinio	${}_{91}\text{Pa}^{234}$

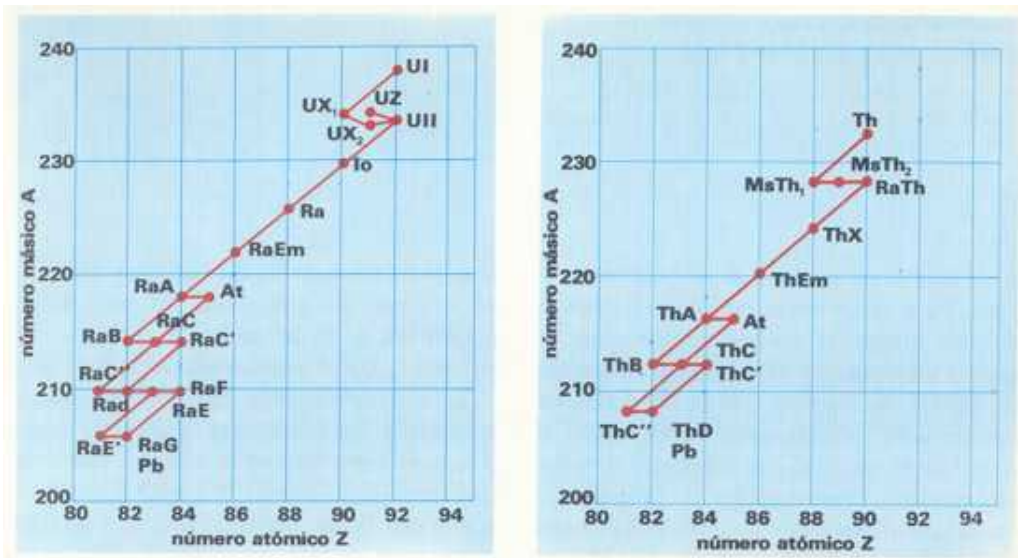
El período de semidesintegración varía extraordinariamente de unos núcleos a otros: el del uranio,  ${}_{92}\text{U}^{238}$ , es de 4.500 millones de años, mientras que el del radio,  ${}_{85}\text{Ra}^{226}$ , es de 1.620 años. El radón, que se forma a partir del radio por emisión de una partícula  $\alpha$ , tiene un período de 3,82 días, y el del radio C', isótopo del polonio ( $\text{Po}^{214}$ ) apenas supera 0,0001 s.

Los conocimientos sobre el comportamiento de las sustancias radiactivas están prácticamente limitados a estas magnitudes medias; es posible predecir el comportamiento de un gran conjunto de núcleos pero no el de uno determinado. No existe ningún método para determinar en qué instante un núcleo se desintegrará. En este sentido conviene introducir el concepto de vida media o promedio de vida de un átomo aislado, es decir, el tiempo que, por término medio, tarda en desintegrarse un átomo; el cálculo demuestra que el período de semidesintegración es igual al producto de 0,693 por la vida media. Naturalmente, la asignación de un promedio de vida no significa que todos los núcleos radiactivos tengan la misma duración: algunos se desintegrarán rápidamente, mientras que otros permanecerán estables durante tiempos muy superiores, de la misma forma que el promedio de

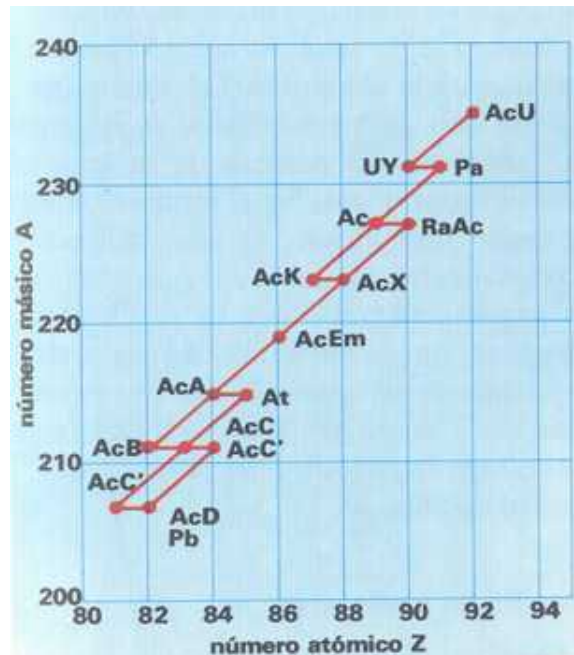
vida de una comunidad humana no implica que todos sus miembros vivan exactamente el mismo número de años.

### 5. Familias radiactivas

La edad de la Tierra se calcula en unos 4.500 millones de años, cifra que coincide con el período de desintegración del uranio 238; por consiguiente, la masa de este núclido actualmente existente en nuestro planeta será igual a la mitad de la que existía en los tiempos primitivos, y no puede extrañar que sea relativamente abundante.



*Familias radiactivas del uranio (izquierda), del torio (derecha) y del actinio (abajo). Las líneas inclinadas corresponden a transmutaciones producidas por emisión de una partícula  $\alpha$ , y las horizontales, a transmutaciones producidas por emisión de una partícula  $\beta^-$ .*



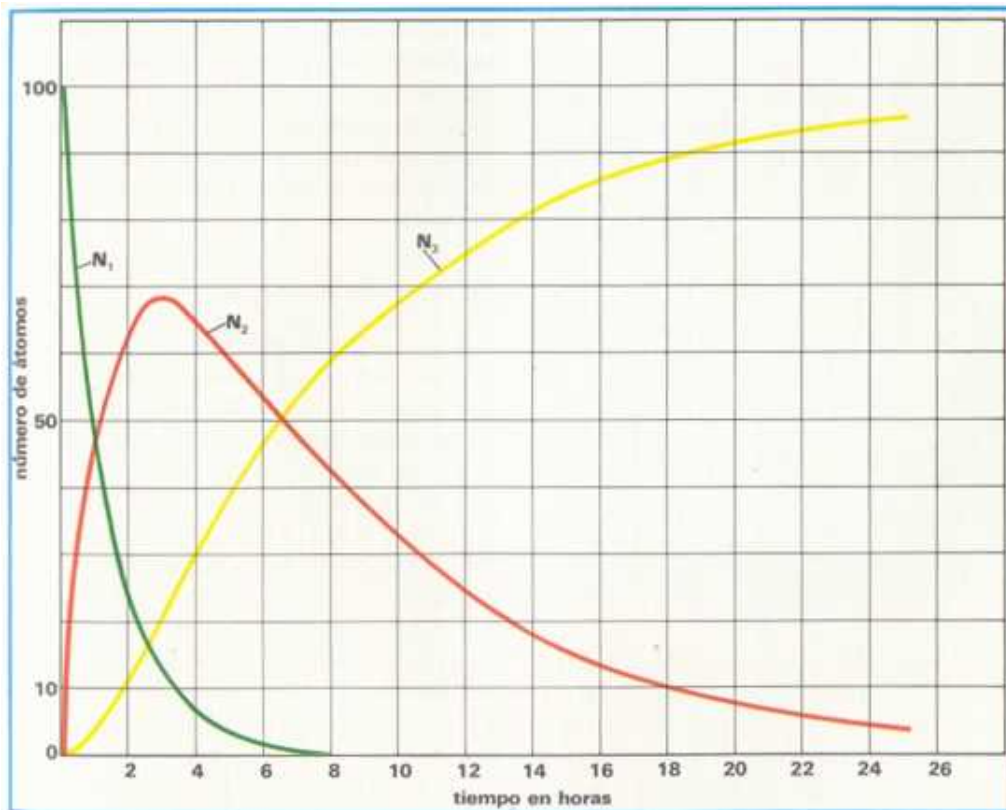
La cosa cambia con respecto al radio 226 que aun suponiendo que en el protoplaneta primitivo hubiese grandes proporciones, su masa se habría reducido a la mitad casi 2 millones de veces consecutivas y quedaría una cantidad tan ínfima que sería prácticamente imposible reconocerlo. La situación se complica más con el radio C', que debería haber desaparecido en pocos días. ¿Cómo explicar que tales elementos sigan presentes en los materiales de la corteza terrestre, aunque sea en pequeñas proporciones?

La respuesta reside en el hecho que el núcleo resultante de una desintegración es a su vez radiactivo y se desintegra en un tiempo más o menos corto, dando lugar a otro núcleo que también puede ser inestable. Existen secuencias de núcleos que se transforman sucesivamente en otros hasta llegar a uno estable que no sufre ya nuevas desintegraciones. Si el radio Ra<sup>226</sup> y el radio C se originan a partir de una serie de transmutaciones que parten del uranio I no debe extrañar que se encuentren en la naturaleza, al menos mientras exista suficiente uranio.

Cada una de estas secuencias son las llamadas familias o series radiactivas, de las que se conocen tres, que incluyen la totalidad de los elementos radiactivos pesados. Cada familia se inicia en un elemento llamado padre o cabeza de la misma, que, en los tres casos es un elemento con período de semidesintegración muy grande, lo cual es lógico, puesto que, en caso contrario, tal elemento ya habría desaparecido.

La serie del uranio tiene su origen en el isótopo 238 del elemento radiactivo del mismo nombre, y su producto final estable es el radio G, isótopo del plomo ( ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ ). Algunas de las transmutaciones de esta serie (el paso de uranio I a uranio  $X_1$ , de éste al uranio  $X_2$  y finalmente a uranio II) ya se han descrito anteriormente. El uranio  $X_2$  tiene la particularidad de presentar dos componentes distintos cuyos períodos de semidesintegración respectivos son de 68 s y de 6,7 horas, (este último período es el del uranio Z); en 1921, Otto Hahn probó que representan dos estados energéticos de un mismo núcleo, es decir, dos núcleos isómeros.

Otra singularidad de la familia la constituye la bifurcación que se presenta en el radio A, el cual se desintegra en un 99,66 % emitiendo una partícula  $\beta$  y transformándose en el radio B, que se transforma en radio C emitiendo una partícula  $\alpha$ ; el 0,04 % restante emite una partícula  $\alpha$  transformándose en astato 118, el cual se convierte también en radio C por emisión de una partícula  $\beta$ . En el radio C se produce una nueva bifurcación, por idéntico mecanismo y en las mismas proporciones, que da lugar al radio C' y al radio C'', los cuales generan el radio D. Al final de la serie, el radio E da origen a una nueva separación (radio F y talio) que termina con el radio G. En el primer gráfico se han representado los elementos de esta familia indicando el período de semidesintegración en cada transformación; cada corrimiento hacia la izquierda corresponde a la emisión de una partícula  $\alpha$ , mientras que los corrimientos hacia la derecha corresponden a la emisión de una partícula  $\beta$ . La familia del torio se inicia en el isótopo de este elemento de número másico 232 ( ${}_{90}\text{Th}^{232}$ ), cuyo período de semidesintegración, 13.900 millones de años, es el mayor de entre los núcleos pesados. Las transformaciones de esta serie, que termina en el torio D (isótopo del plomo  ${}_{92}\text{Pb}^{208}$ ), son semejantes a las de la del uranio.



*Serie radiactiva de tres miembros. A medida que disminuye la sustancia original  $N_1$ , aumenta la formada a partir de la misma,  $N_2$ , y cuando ésta se desintegra aparece la  $N_3$ . El número total de átomos permanece constante aunque varíe su especie.*

La tercera familia es la del actinio; tiene su origen en el isótopo del uranio de número másico 235, también llamado actino uranio, núclido de primordial importancia por ser uno de los empleados en las bombas atómicas. El nombre de la serie se debe al hecho que fue el actinio el primer elemento identificado en ella, hallándose posteriormente el uranio 235, cuyo período de semidesintegración es de 710 millones de años y que se encuentra en la naturaleza mezclado con el uranio 238 en una proporción de 7 por mil. El producto final de la serie es de nuevo un isótopo del plomo ( ${}_{82}\text{Pb}^{207}$ ) llamado actinio D.

## 6. Equilibrio radiactivo

Supóngase que se dispone de una muestra pura de uranio 238. La actividad del mismo, inicialmente muy débil, aumenta con el tiempo. El fenómeno se debe a que, a medida que el uranio se desintegra, aparecen nuevos núcleos, como los del radio, cuya actividad es mucho mayor. Si se separa el radio así producido, la actividad del



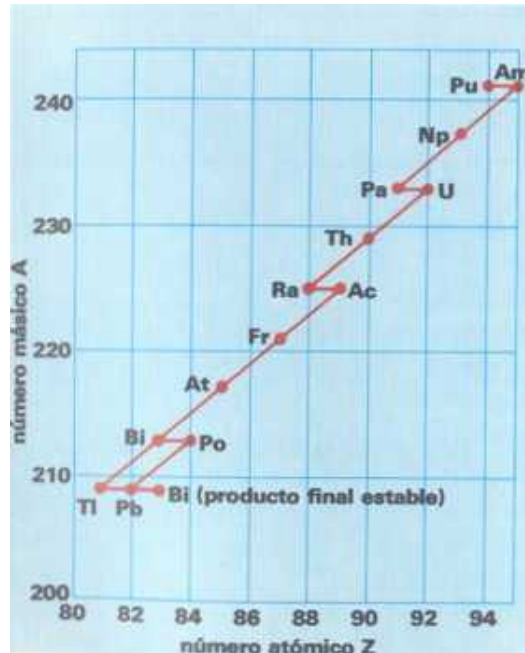
uranio queda prácticamente reducida a la inicial y empieza a aumentar de nuevo. Por el contrario, la actividad del radio resulta extraordinaria pero disminuye con rapidez. Este comportamiento se debe a que el uranio vuelve a generar radio, mientras que éste, aislado, se desintegra un millón de veces más rápido que aquél. En realidad, el fenómeno es más complicado, ya que la serie del uranio contiene 18 núclidos distintos, y todos ellos están presentes en la muestra (por lo menos mientras la cantidad de uranio sea lo suficientemente elevada para que el número de sus núcleos compense su menor velocidad de desintegración). A medida que transcurre el tiempo, la cantidad de uranio disminuye, mientras que la del último elemento de la serie, el plomo 206 aumenta. Si de alguna forma se añade uranio a medida que éste desaparece, puede demostrarse, por medio del cálculo, que la concentración de todos los elementos de la serie (exceptuando el último) permanece constante. Es lo que se conoce como equilibrio radiactivo, en el cual los átomos de un elemento que desaparecen por desintegración son generados por la desintegración del elemento que le precede en la serie.

La vida media de los padres de cada una de las series es tan grande que, aun considerando períodos de varios millares de años, la cantidad de los mismos presente en los materiales terrestres puede considerarse constante. Es decir, la situación de equilibrio radiactivo se reproduce en la naturaleza, en la cual se encuentran los distintos elementos radiactivos en proporciones perfectamente definidas de modo independiente del mineral en que sean identificados.

## 7. La serie del neptunio

Los números másicos de los núclidos de cada una de las series radiactivas se rigen según una ley numérica fácilmente reconocible. En la serie del uranio, los números másicos de los distintos núclidos son en orden decreciente: 238, 234, 230, 226, 222, 218, 214, 210 y 206. Estos números constituyen una sucesión que puede expresarse por medio de la ley general  $4n+2$ , sin más que asignar a  $n$  todos los valores enteros comprendidos entre 59 y 51. De forma similar, los números másicos de la serie del torio pueden representarse por  $4n$ , con  $n$  variando entre 58 y 52, y los de la serie del actinio por  $4n + 3$ , en la que  $n$  toma valores enteros entre 58 y 51.

Este hecho sencillo y fácilmente evidenciable hizo pensar en la posibilidad que existiese una nueva serie cuyos números másicos respondieran a la relación  $4n + 1$ . Tras el descubrimiento de los primeros elementos de número atómico superior a 92, los transuránicos, realizada por McMillan en 1940, y con el desarrollo de nuevas técnicas que permiten sintetizar dichos elementos a partir de los existentes, se llegó a la identificación de la hipotética serie.



*Elementos de la familia radiactiva del neptunio.*

Su origen conocido es un isótopo del plutonio de número másico 241, ( ${}_{93}\text{Pu}^{241}$ ), si bien se la llama serie del neptunio, dado que éste es el núclido de vida media más grande entre los componentes de ella. El producto final es, en este caso, un isótopo del bismuto, de número másico 209.

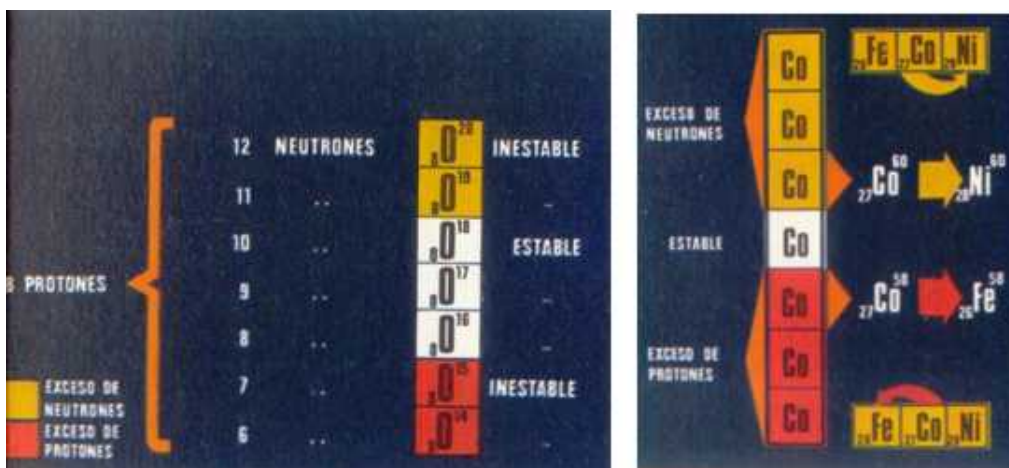
Aunque se ha conseguido detectar pequeñas cantidades de neptunio y plutonio en algunos minerales, no ha de extrañar el que esta serie fuese descubierta muy recientemente, y aun recurriendo a métodos artificiales. El período de semidesintegración del plutonio 241 es de sólo 14 años, mientras que el del neptunio es algo superior a los dos millones de años, más de mil veces inferior al del uranio 238 y casi diez mil veces inferior al del torio.

### 8. Isótopos radiactivos ligeros

Se han identificado en la naturaleza muy pocos núcleos de número atómico inferior a 81 que tengan propiedades radiactivas (véase tabla).

Elemento	Núclido	Período de semidesintegración en años	Tipo de radiactividad	Núclido resultante
Hidrógeno	${}^3_1\text{H}$ (tritio)	12,4	$\beta^-$	${}^3_2\text{He}$
Carbono	${}^{14}_6\text{C}$	5.000	$\beta^-$	${}^{14}_7\text{N}$
Potasio	${}^{40}_{19}\text{K}$	$1,8 \cdot 10^9$	$\beta^-$ , $\gamma$ captura K	${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ${}^{40}_{18}\text{Ar}$
Rubidio	${}^{87}_{37}\text{Rb}$	$6,3 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$ , $\gamma$	${}^{87}_{38}\text{Sr}$
Indio	${}^{115}_{49}\text{In}$	$6 \cdot 10^{14}$	$\beta^-$	${}^{115}_{50}\text{Sn}$
Samario	${}^{152}_{62}\text{Sm}$	$10^{12}$	$\alpha$	${}^{148}_{60}\text{Nd}$
Lutecio	${}^{176}_{71}\text{Lu}$	$2,4 \cdot 10^{10}$	$\beta^-$ , $\gamma$ (33 %) captura K (67 %)	${}^{176}_{72}\text{Hf}$ ${}^{176}_{70}\text{Yb}$
Renio	${}^{187}_{75}\text{Re}$	$4 \cdot 10^{12}$	$\beta^-$	${}^{187}_{76}\text{Os}$

Todos ellos se desintegran por emisión de una partícula  $\beta$ , a excepción del samario ( ${}^{152}_{62}\text{Sm}$ ), que lo hace emitiendo una partícula  $\alpha$ .



Los núcleos con un exceso de protones o de neutrones son inestables. Isótopos estables e inestables del oxígeno (izquierda) y del cobalto (derecha).

El núclido resultante de la desintegración es estable en todos los casos, razón por la que los elementos ligeros no originan familias radiactivas, como sucede con los

núcleos radiactivos pesados. Los períodos de desintegración oscilan entre 100 millones de años y 100 billones de años, por lo que esos isótopos son los únicos supervivientes, en cantidades apreciables, del gran número de núcleos radiactivos ligeros que, con toda probabilidad, debieron de existir en la época de la formación de la Tierra. Constituyen una excepción a esta regla el tritio ( ${}^3_1\text{H}$ ) y el carbono ( ${}^{14}_6\text{C}$ ), cuyas vidas medias son muy cortas y que se generan continuamente en la atmósfera como resultado del choque de neutrones lentos provenientes de los rayos cósmicos con los núcleos del nitrógeno del aire.



*Cámara de Wilson en la que aparecen las trazas producidas por las partículas  $\alpha$  emitidas por una fuente radiactiva.*

En los últimos veinticinco años se ha conseguido producir artificialmente gran número de isótopos radiactivos de los elementos ligeros. El primero de ellos fue un isótopo del tecnecio, sintetizado en 1937. Con el descubrimiento de este elemento y el del prometio, el cual fue producido en 1945, se cubrieron las dos únicas casillas del sistema periódico sobre las que no se había encontrado ningún vestigio en los materiales de la corteza terrestre.

## **9. Radiactividad artificial**

Rutherford fabrica átomos

Durante siglos, el sueño de los alquimistas fue conseguir oro a partir de otras sustancias. El nacimiento de la química demostró lo descabellado del proyecto, y el descubrimiento de los átomos, indivisibles y distintos unos de otros, confirmó su imposibilidad. Sin embargo, el desarrollo de la ciencia produce frecuentemente

resultados insospechados, y hoy, aunque por métodos muy distintos de los empleados por los alquimistas, se está hasta cierto punto en condiciones de hacer realidad aquellos sueños.

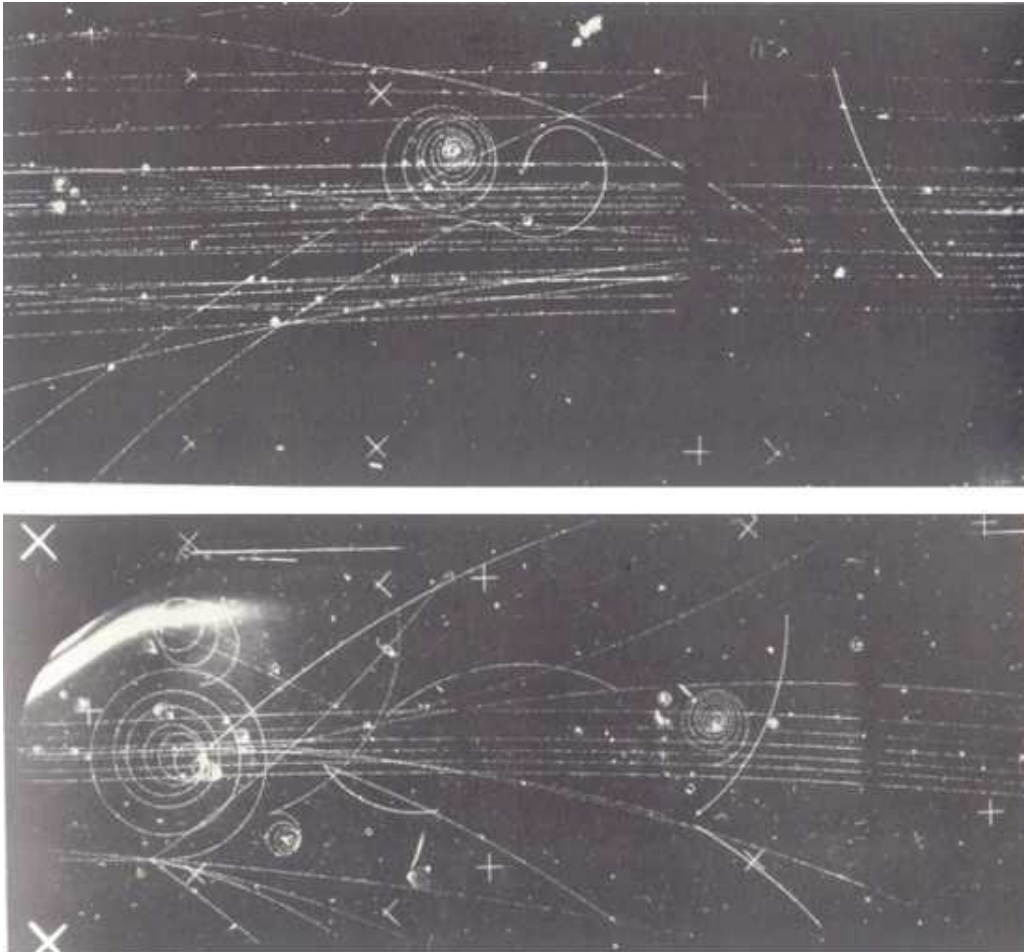


*Aunque las partículas subatómicas sean invisibles se han desarrollado procedimientos que permiten fotografiar su recorrido.*

Los fenómenos radiactivos naturales proporcionan ya los primeros casos de transmutaciones entre elementos, y la producción de tritio y carbono 14 en la atmósfera nos sitúan ante la realidad de una fabricación continua de átomos.

Fue Rutherford, en 1919, quien observó por primera vez una transmutación inducida en un laboratorio. Se sabe que el recorrido de las partículas  $\alpha$  en los gases es como máximo de muy pocos centímetros. Un procedimiento para comprobarlo puede consistir en encerrar un emisor radiactivo, como el radio, en una cámara llena de gas, colocando en la misma una pantalla detectora de tales partículas. Con gases como el oxígeno o el anhídrido carbónico basta separar 7 cm el emisor de la pantalla para que ésta no sea alcanzada por ninguna partícula, pero si el gas encerrado es el nitrógeno puede apreciarse que la pantalla detecta partículas incluso a 40 cm de distancia del radio. Para que esto ocurra, tiene que haber sucedido "algo" entre las partículas  $\alpha$  y el gas nitrógeno. Rutherford descubrió que este "algo" consistía en que algunas partículas  $\alpha$  (una entre cada millón) chocaban con el

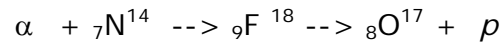
núcleo de nitrógeno y penetraban en el mismo expulsando un protón, que es el que alcanza la pantalla. El nitrógeno común tiene 7 protones y 7 neutrones, y la partícula  $\alpha$ , 2 protones y 2 neutrones; si se elimina el protón expulsado queda un núcleo con 8 protones y 9 neutrones, es decir un isótopo del oxígeno de número másico 17. En el choque, el nitrógeno se ha transformado en oxígeno.



*Trazas de partículas elementales obtenidas en una cámara de burbujas sometidas a un fuerte campo magnético.*

Un ingenioso dispositivo, la cámara de Wilson o de niebla, permite visualizar este proceso. Consiste en un recipiente lleno de aire que contiene vapor de agua en condiciones tales que, cuando es atravesado por una partícula con carga eléctrica, se condensa en pequeñas gotitas que forman un rastro visible (traza) a lo largo de su trayectoria. De esta forma, aunque las partículas  $\alpha$  sean invisibles, aun recurriendo a los microscopios más potentes, es posible ver y fotografiar su

recorrido. El choque de una partícula con un núcleo interrumpe bruscamente su traza, emergiendo de su extremo una estela ligeramente desviada y alargada, dejada por el protón, y un trazo muy grueso y corto dejado por el nuevo núcleo que también sale rechazado. La reacción se representa por medio de la fórmula:



en la cual, antes de la primera flecha aparecen la partícula  $\alpha$  y el núcleo de nitrógeno 14, y después de la segunda los productos resultantes, o sea un protón  $p$  y el núcleo de oxígeno 17. La parte intermedia,  ${}_9\text{F}^{18}$ , indica que, como resultado de la colisión, se forma un núcleo de flúor 18 que se desintegra casi instantáneamente y que constituye el denominado núcleo compuesto.

Continuando sus experimentos, Rutherford y su colaborador Chadwick consiguieron transmutar el boro y el potasio, y no tardó en comprobarse que la mayoría de los núcleos pueden sufrir transmutaciones cuando son bombardeados por partículas.

## 10. Projectiles nucleares

Para que las partículas  $\alpha$  puedan penetrar en el núcleo es necesario que su energía sea lo suficientemente elevada como para superar la repulsión que sobre las mismas ejercen las cargas positivas del núcleo.

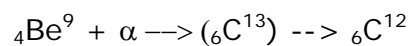


*Interior del acelerador lineal para protones de Berkeley (California).*

Los emisores radiactivos naturales sólo emiten partículas  $\alpha$  con determinadas energías, correspondiendo las mayores a la desintegración del radio C'. Esto motivó que se buscaran otros proyectiles capaces de romper el núcleo; corrientemente se emplean protones y deuterones (núcleos de deuterio), ya que ambas partículas, al poseer una carga eléctrica que es la mitad de las  $\alpha$ , tienen mayores probabilidades de alcanzar el núcleo.

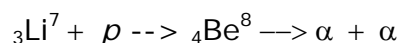
El estudio de las interacciones entre núcleos atómicos y partículas subatómicas se ha visto favorecido por el desarrollo de los aceleradores de partículas, como los generadores electrostáticos, los ciclotrones, los sincrotrones, los betatrones, etc.; se trata de potentes máquinas que, por medio de campos eléctricos y magnéticos, son capaces de aumentar la energía de las partículas cargadas hasta valores enormes, abriendo un extenso campo de posibilidades teóricas, no sólo en el estudio de las propiedades de los núcleos, sino de las mismas partículas subatómicas, hasta límites que hace unos pocos años parecían insospechados.

Las reacciones típicas producidas por el choque de partículas  $\alpha$  con los núcleos son de diversos tipos, entre ellos la formación de un nuevo núcleo con emisión de un protón y la formación de un núcleo con emisión de un neutrón. Ejemplo de estas últimas es el proceso



de gran importancia por ser el proceso a partir del cual se confirmó en 1932 la existencia del neutrón, n. En efecto, durante algún tiempo se creyó que el producto final del proceso era la formación de  ${}_6\text{C}^{13}$  acompañado de la emisión de un rayo  $\gamma$  pero el estudio de la capacidad de penetración de éste en el plomo, así como de la velocidad de rechazo del núcleo de carbono 13, permitieron confirmar la existencia de la nueva partícula.

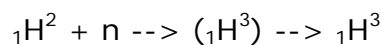
El bombardeo de núcleos con protones da lugar a reacciones en las que, con el nuevo núcleo, aparece una partícula  $\alpha$ , como la reacción





o el bombardeo del boro 11, en el que se producen tres partículas  $\alpha$  por formarse el  ${}^8_4\text{Be}$ , que por ser altamente inestable se desintegra en dos nuevas partículas  $\alpha$  que se suman a la emitida inicialmente. En otras reacciones la partícula final emitida es un neutrón. Existen también algunas reacciones en las que el protón es absorbido, formándose un nuevo núcleo y emitiéndose simplemente un fotón. Resultados similares se obtienen en el bombardeo con deuterones.

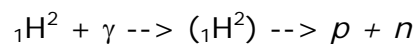
Capítulo aparte constituye el bombardeo con neutrones; estas partículas, al no poseer carga eléctrica, no son rechazadas por el núcleo, motivo por el que son proyectiles privilegiados capaces de provocar transmutaciones incluso cuando sus energías son muy pequeñas. Las reacciones típicas a que dan lugar son: formación de un nuevo núcleo y emisión de una partícula  $\alpha$ , emisión de un protón y emisión de un fotón, como en el caso



en la que se sintetiza el tritio a partir del deuterio.

El tipo de reacción que tiene lugar por el choque de una partícula con un núcleo depende, además de la naturaleza del núcleo bombardeado y del proyectil, de la energía de este último. (En la tabla adjunta se han señalado una serie de 16 reacciones distintas en las que el núcleo inicial es siempre el del aluminio.)

La desintegración del núcleo atómico puede también lograrse mediante el bombardeo con fotones muy energéticos, en la llamada fotodesintegración. Un caso de este tipo es la descomposición del núcleo del deuterio en un protón y un neutrón en la reacción

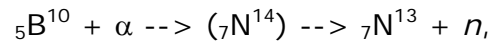


## 11. Radiactividad inducida

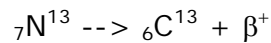
En los citados ejemplos de transmutaciones nucleares provocadas por el bombardeo del núcleo mediante partículas ligeras, los nuevos núcleos son estables. Sin embargo, en muchos casos se observa que, una vez retirado el emisor de

proyectiles, los núcleos bombardeados continúan emitiendo radiaciones. El fenómeno fue detectado por primera vez por los esposos Joliot-Curie en 1934, al proyectar partículas  $\alpha$  sobre núcleos de boro y aluminio.

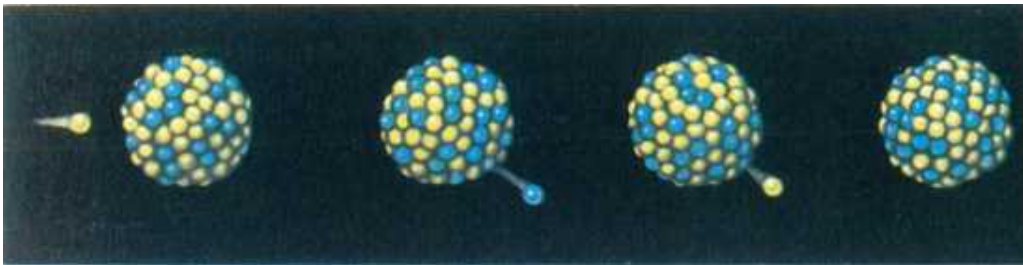
El choque de una partícula  $\alpha$  con el boro, por ejemplo, da lugar a la reacción



en la cual se genera un isótopo del nitrógeno; la singularidad de este caso reside en que el nitrógeno así producido es un elemento radiactivo, de período de semidesintegración igual a 10,1 minuto, que se desintegra emitiendo un positrón y generando un isótopo del carbono:



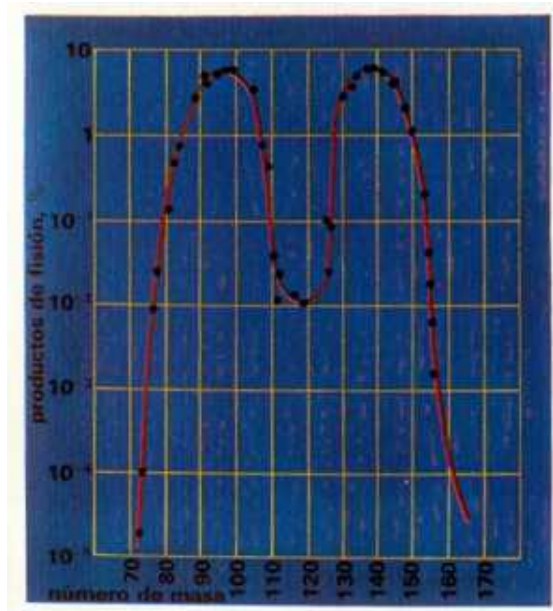
Se trata de un proceso nuevo, la desintegración por emisión de positrones, que no se da en los isótopos radiactivos naturales.



*El plutonio puede obtenerse a partir de la absorción de un neutrón por un núcleo de uranio 238, seguida de la emisión consecutiva de dos electrones ( $\beta^-$ ).*

La generalización del estudio de las reacciones nucleares inducidas ha llevado a la identificación de isótopos de todos los elementos existentes; actualmente se conocen más de 1.000 núclidos distintos, el 75 % de los cuales son radiactivos.

En general, la estabilidad nuclear está relacionada con la presencia en el núcleo de un número similar de protones y de neutrones.



*Distribución en tanto por ciento de los productos de la fisión de un núcleo pesado.*

Los núcleos que poseen exceso de neutrones tienden a desintegrarse emitiendo una partícula  $\beta^-$  (electrón), con lo que se aproximan a la zona de estabilidad por conversión de un neutrón nuclear en un protón. Por el contrario, los núcleos con exceso de protones se desintegran emitiendo una partícula  $\beta^+$  (positrón), proceso en el cual el número atómico del núcleo disminuye en una unidad; en la corteza electrónica existe entonces un electrón sobrante y el átomo queda ionizado. Otro procedimiento para compensar la abundancia de protones es la llamada captura K, que consiste en la absorción por el núcleo de un electrón del nivel de energía fundamental de la corteza; a consecuencia de ella, un neutrón se transforma en un protón y la compensación de los electrones corticales queda garantizada. A la captura K sigue la emisión de un fotón energético, de la región de los rayos X, provocada por el salto de un electrón de los niveles exteriores al fundamental.

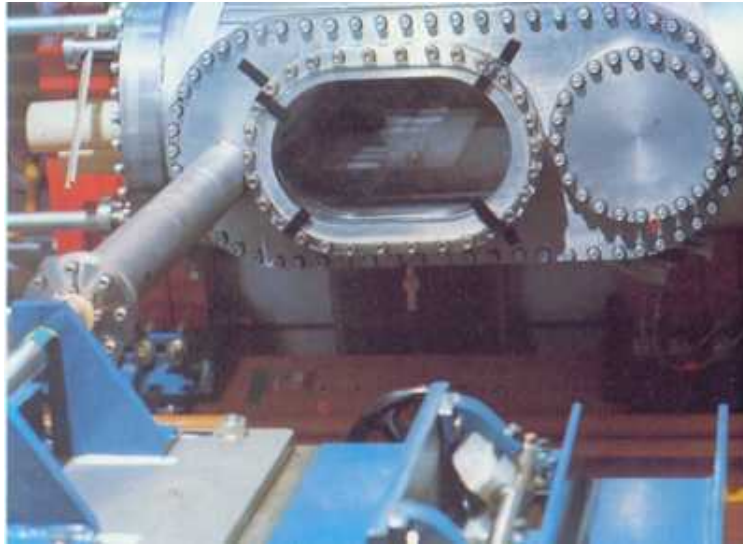
## 12. Fisión y fusión

Queda todavía por analizar un proceso nuclear de trascendental importancia, ya que constituye la base de la bomba atómica y de los reactores nucleares.



*Vista superior del reactor termonuclear Tokomat, usado para el estudio de las reacciones de fusión en plasma.*

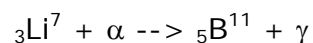
En 1939 se descubrió que determinados neutrones, al chocar contra un núcleo de uranio, lo rompen en dos fragmentos, que se distribuyen la masa de aquél, liberando algunos neutrones y gran cantidad de energía en forma de rayos  $\gamma$ . La fisión o escisión nuclear es la verdadera ruptura del núcleo, proceso frente al cual las transmutaciones artificiales son casi insignificantes. Muchos de los núcleos pesados, el uranio 238, el uranio 235, el torio y el plutonio 239, pueden presentar escisión nuclear; los núcleos resultantes de la misma tienen números másicos que oscilan entre 70 y 170 aproximadamente, y suelen ser radiactivos por contener un exceso de neutrones.



*Un objetivo de la física nuclear es mantener el control de las reacciones termonucleares. Vista de un ingenio especializado en el estudio de la fisión nuclear.*

Los mecanismos y los productos finales de la fisión pueden ser bastante complejos: un mismo núcleo puede dar lugar a diferentes pares de núcleos escindidos, y en cada caso el número de neutrones emitidos puede ser distinto; eventualmente, el núcleo inicial puede romperse en tres fragmentos en lugar de dos. Asimismo, las condiciones en que se produce el fenómeno dependen de la energía de los neutrones incidentes: el uranio 238 sólo se escinde, y muy raramente, por la acción de neutrones rápidos, mientras que en el uranio 235, escindible tanto por la acción de neutrones lentos como por la de neutrones rápidos, la probabilidad que se escinda bajo la acción de los primeros es 200 veces mayor que para que lo haga bajo los segundos.

A las reacciones de fisión pueden contraponerse en cierta forma las de fusión, que en muchos casos llevan aparejada también la producción de una elevada cantidad de energía. Se entiende por fusión la unión de núclidos o de partículas con núclidos para formar un núcleo más pesado. Las reacciones en las que tras el bombardeo de una partícula  $\alpha$  se produce la absorción de ésta y se emite un fotón, detectadas por primera vez en 1950, como la



constituyen un ejemplo de fusión. Lo mismo puede decirse de la absorción de protones o neutrones, seguidas también de la emisión de fotones.

En particular, la absorción de neutrones por núcleos pesados constituye el mecanismo por el que se han fabricado núcleos transuránicos. Así, el uranio 238 no se escinde, como ya se ha dicho, bajo el bombardeo de neutrones lentos, pero en cambio sí puede absorberlos, creando el uranio 239; este isótopo se desintegra rápidamente emitiendo una partícula  $\beta^-$  y generando el neptunio,  ${}_{93}\text{Np}^{239}$ , el primero de los transuránicos. El neptunio, a su vez, emite partículas  $\beta^-$  y se transforma en el plutonio  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ , el segundo transuránico, que con período de semidesintegración de 24.000 años puede considerarse relativamente estable.

## Capítulo 4

### Las leyes del mundo submicroscópico

#### **Contenido:**

1. [Ondas y corpúsculos](#)
2. [¿Describen órbitas los electrones?](#)
3. [Principios de conservación](#)
4. [La energía del núcleo](#)
5. [Estabilidad nuclear](#)
6. [Fuerzas nucleares](#)
7. [Modelos nucleares](#)
8. [Modelo nuclear de capas](#)

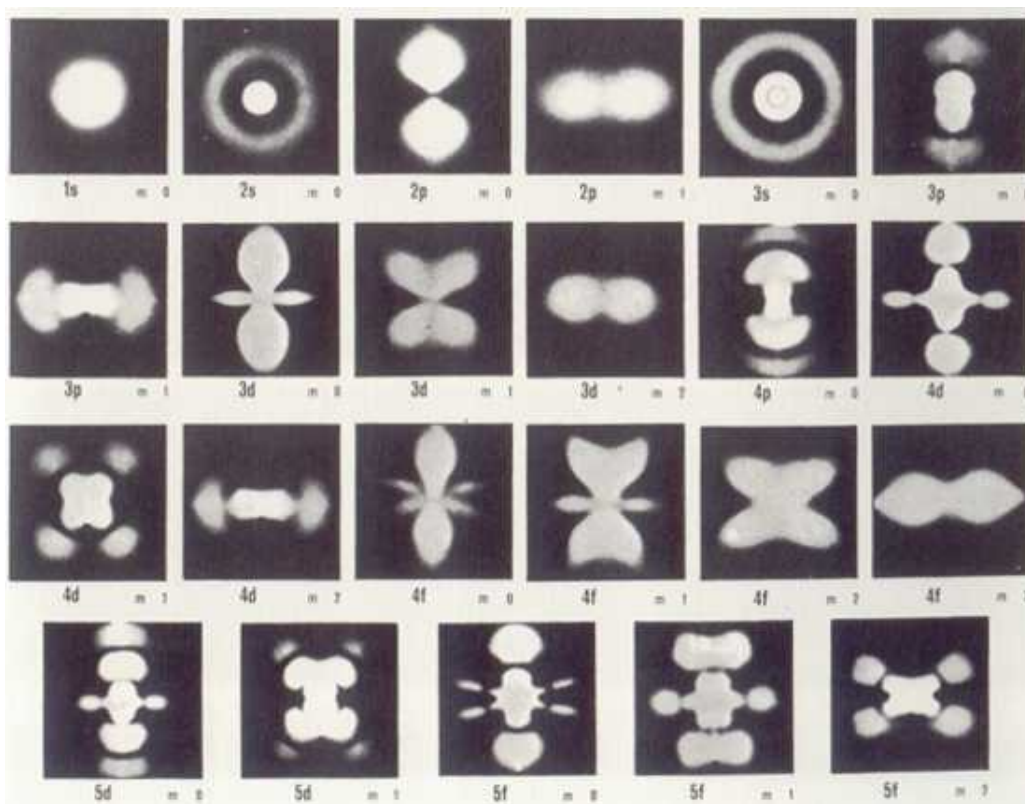


*Explosión de una bomba (H), en el atolón de Mururoa.*

## 1. Ondas y corpúsculos

Los conocimientos actuales sobre la estructura del átomo son siempre de origen indirecto. Los modelos acerca de la organización de los electrones corticales han sido elaborados a partir de los datos proporcionados por los espectros, y el conocimiento del núcleo deriva de la observación de sus propiedades radiactivas, o bien de la observación de los fenómenos que se producen cuando se le somete a un bombardeo con partículas.

En todos los casos, al interpretar lo observado se tiende a usar las imágenes que proporciona la experiencia cotidiana. Los protones, neutrones y electrones son imaginados como pequeñas bolitas extraordinariamente diminutas, el núcleo viene a resultar un agregado, supuestamente ordenado, de éstas, y para describir el movimiento de los electrones se acude a imágenes como la del sistema solar.



*En la teoría cuántica, las órbitas de los electrones quedan sustituidas por "nubes" de probabilidad alrededor del núcleo.*

Pudiera esperarse que aumentando la potencia de los microscopios se consigan ver, o por lo menos fotografiar, los átomos. Sin embargo, esto es imposible. A partir de



cierto límite la única forma de hacer más potente un microscopio es usar radiaciones cuya longitud de onda sea cada vez menor, lo que supone usar fotones cada vez más energéticos. Para llegar a individualizar un átomo se tendrían que usar rayos y de energía elevadísima, o recurrir a microscopios electrónicos o protónicos.



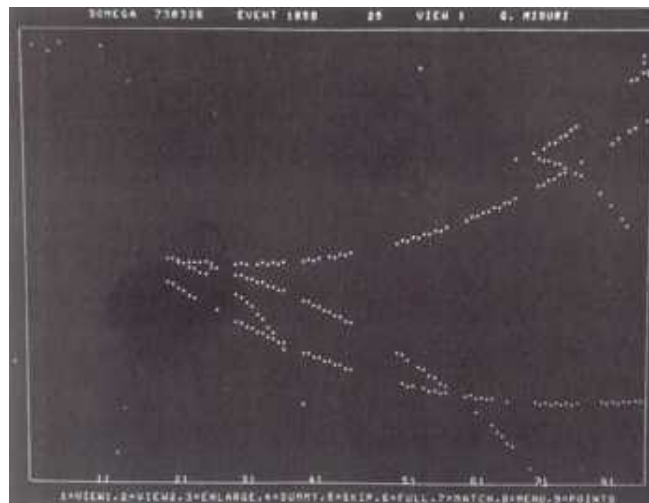
*El estudio del comportamiento de las partículas elementales puede llegar a resolverlos problemas, todavía pendientes, sobre la estructura del núcleo atómico.*

Con ello, se obtendrían precisamente resultados contrarios al buscado: tales radiaciones arrancarían los electrones corticales y probablemente provocarían la destrucción del núcleo.

*"El corpúsculo ya no es un objeto bien definido y, de acuerdo con la nueva teoría, su existencia ya no se nos revela más que por el carácter discontinuo y localizado de sus manifestaciones sucesivas. En cuanto a la onda, ya no es, en mecánica ondulatoria, la vibración de algún medio más o menos sutil. Ha adquirido un carácter simbólico y matemático cada vez más acentuado. Así, cada síntesis nueva, facilitándonos aún más nuestra penetración en las armonías del mundo físico, nos enseña también que los mismos elementos que empleamos en nuestras interpretaciones superan nuestra intuición, y que nos es más fácil establecer las relaciones entre estos elementos que comprender su naturaleza de un modo total."*

HEISENBERG

La situación sería muy similar a la que se produciría si, para averiguar lo que hay en el interior de un edificio, se empezara por dinamitarlo, procediendo luego a investigar sus escombros. Ciertamente, se averiguarían muchas cosas, pero escasas conclusiones podrían extraerse acerca de la organización que existía cuando el edificio estaba intacto.



*Reconstrucción, obtenida mediante un ordenador, de las sucesivas posiciones de partículas subatómicas en interacción.*

Al hablar de los fotones se ha visto que es imposible explicar su comportamiento, a menos que se le imagine unas veces como ondas y otras como corpúsculos. Con los electrones y demás partículas subatómicas sucede exactamente lo mismo. La observación de un destello luminoso en una pantalla de sulfuro de cinc hace pensar

inmediatamente en que algo ha chocado contra la misma, una partícula  $\alpha$  o quizás un protón. De la misma forma la fotografía de las trayectorias en una cámara de Wilson sólo puede explicarse pensando que correspondan a las trazas dejadas por algún objeto material. Sin embargo, existen fenómenos en los cuales las partículas subatómicas tienen un comportamiento que sólo puede explicarse si se supone que son ondas en movimiento.

Ahora bien, un corpúsculo está localizado en el espacio y en el tiempo, mientras que una onda es extensa y dispersa. ¿Cómo compaginar ambos hechos? La respuesta admitida por la mayoría de los científicos podría expresarse afirmando que “de ninguna forma”. La medida de cualquier magnitud física exige un aparato adecuado, y la operación de medir supone una interferencia entre el aparato de medida y el objeto a observar. Cuando se opera con grandes agrupamientos de materia (macrocosmos) la interferencia resulta despreciable, pero a nivel atómico o subatómico (microcosmos) esto no es cierto.



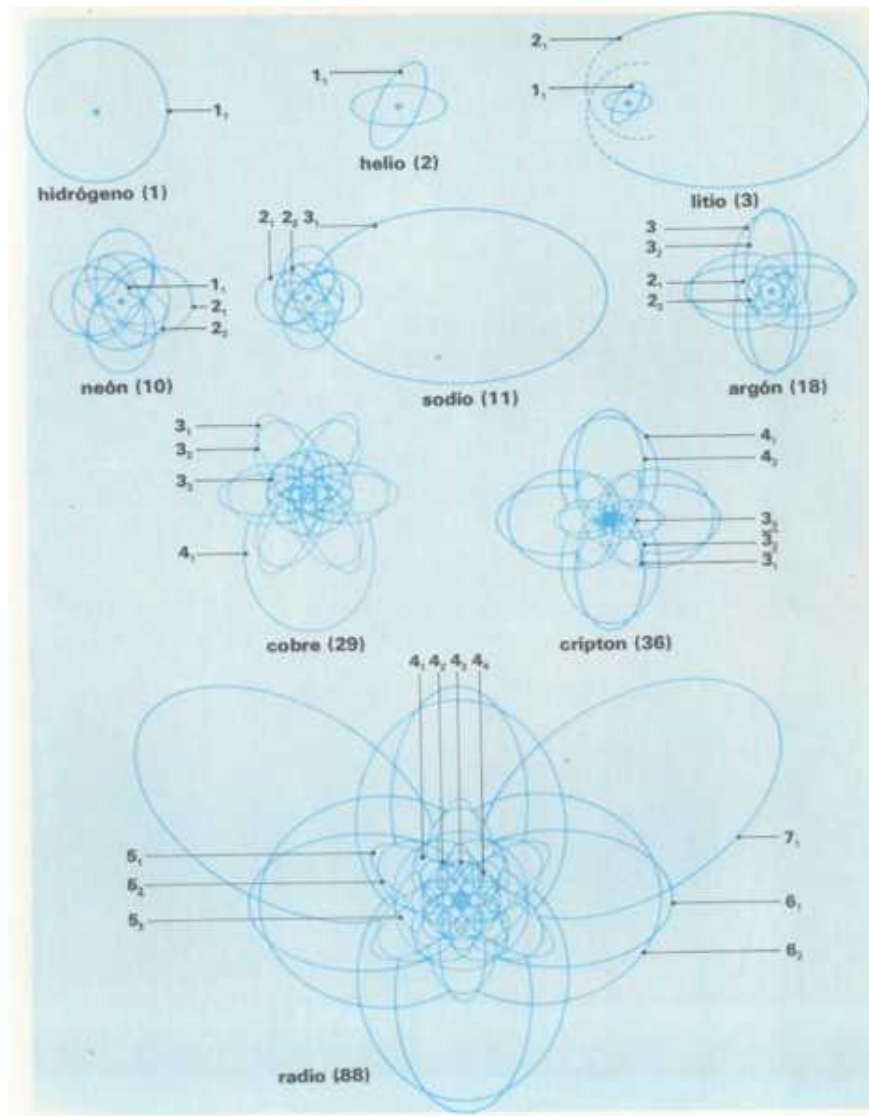
*El nacimiento de la era nuclear ha abierto el camino para la obtención de una fuente casi inagotable de energía.*

No es correcto, por tanto, decir que una partícula se comporta con una onda o como un corpúsculo, sino que el comportamiento observado, en unas determinadas condiciones, es éste o aquél. Onda y corpúsculo son aspectos complementarios, imágenes de una misma realidad inasequible, que la mente humana construye a partir de percepciones macroscópicas.

No faltan contradictores acerca de esta cuestión. Para algunos científicos la dualidad onda-corpúsculo quedaría eliminada introduciendo determinadas hipótesis: los fotones serían siempre ondas y los electrones y demás partículas con masa serían corpúsculos. Para otros se trata de un problema de parámetros, de variables desconocidas a nivel macroscópico, cuya introducción podría solventar tales problemas. Finalmente, para otros se trataría de asignar a cada corpúsculo una onda, algo semejante a la estela que acompaña a un buque que se mueve sobre el agua.

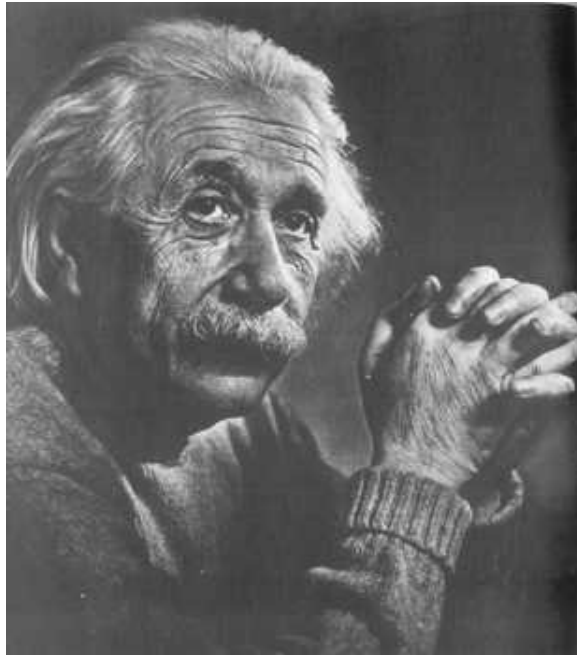
## **2. ¿Describen órbitas los electrones?**

Una de las consecuencias de la interacción entre los aparatos de medida y los objetos de la medición es la imposibilidad de determinar simultáneamente y con precisión la posición y la velocidad de una partícula subatómica (principio de indeterminación de Heisenberg).



*En el modelo de Bohr-Sommerfeld los electrones describen órbitas perfectamente determinadas alrededor del núcleo.*

Una medida exacta de la posición de un electrón, por ejemplo, supone una perturbación tal de su velocidad que hace imposible conocer su valor. Lo mismo sucede con la posición cuando lo que se mide es la velocidad.

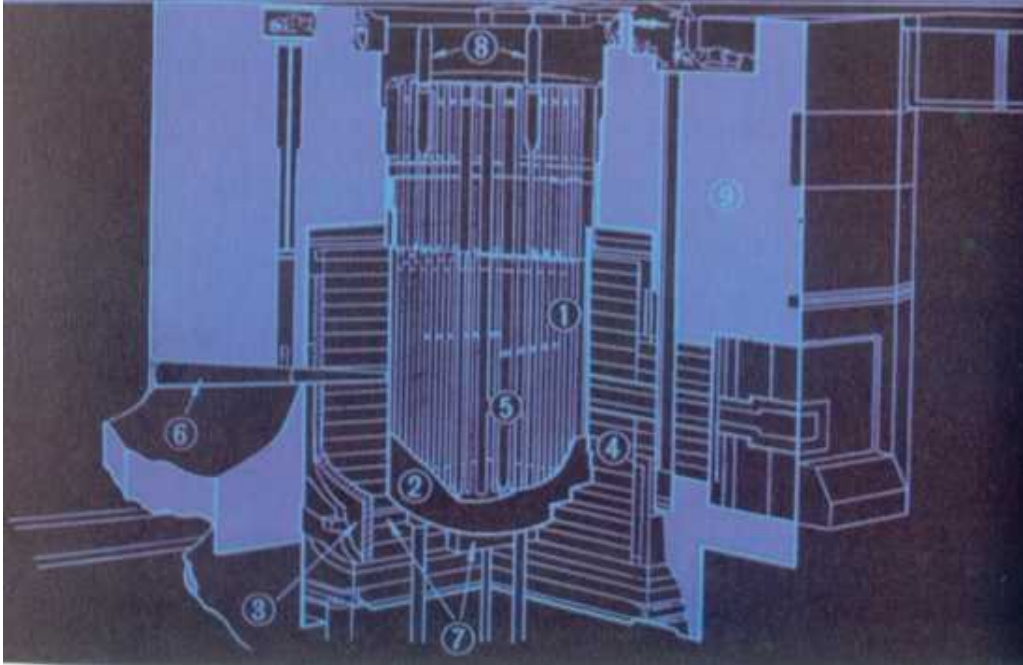


*Albert Einstein, un científico excepcional en el que coexistieron el amor a la ciencia y el amor a la humanidad.*

De aquí se sigue la imposibilidad de hablar de trayectorias: una trayectoria significa el conocimiento simultáneo de la posición de una partícula, en cada instante, y de la velocidad correspondiente a cada posición. Con esta óptica, los modelos de Bohr y Sommerfeld, muy intuitivos, han de parecer forzosamente limitados.

La hipótesis ondulatoria de la materia, propuesta por De Broglie en 1924, y el principio de indeterminación, formulado por Heisenberg en 1927, alteraron los conceptos de posición, velocidad y orbital electrónico. La solución de los problemas planteados tenía que venir por vías de una innovación, capaz de asociar los nuevos hechos con los resultados positivos de los primeros modelos atómicos. Nació así un nuevo dominio de la física, la mecánica cuántica, que explica coherentemente los fenómenos del microcosmos.

El estado de una partícula o de un sistema subatómico se describe mediante la llamada función de onda,  $\psi$ ), que obedece a la ecuación de Schrödinger, postulada en 1926. Por la resolución de esta ecuación se obtiene en cada caso una función de onda que proporciona información respecto al sistema sometido a estudio.



*Interior del reactor nuclear JJR-3. 1, barras de combustible; 2, paredes del núcleo; 3, aislador térmico; 4, reflector de grafito; 5 y 6, huecos para la práctica de experimentos; 7, isótopos; 8, barras de control; 9, pantalla protectora.*

En el caso del átomo de hidrógeno la ecuación de Schrödinger reproduce los niveles de energía de Bohr, pero nada aporta acerca de las trayectorias. La información contenida en la función de onda es de carácter estadístico; para cada nivel de energía, lo único que permite deducir es la probabilidad que los electrones estén en una o en otra posición. Las órbitas electrónicas quedan sustituidas por nubes de probabilidad distribuidas alrededor del núcleo. Todavía se pueden forzar imágenes intuitivas, aunque ello es poco correcto, y pensar que estas nubes son los propios electrones, distribuidos en una zona extensa (imagen ondulatoria), o suponer que representan simplemente las posiciones posibles de un electrón en continuo movimiento, muy densas en las posiciones más probables y difusas en las otras (imagen corpuscular).

### **3. Principios de conservación**

En todos los procesos que tienen lugar en la naturaleza se pone de manifiesto la constancia de un pequeño conjunto de magnitudes, que permanecen invariables en el transcurso de los mismos.

El más conocido de todos es el de la conservación de la materia, formulado por Lavoisier en el siglo XVIII, que establece que la materia no se crea ni se destruye, únicamente se transforma. En versión actual se hace referencia a este principio como ley de la conservación de la masa: en cualquier fenómeno, la masa que participa permanece constante. Unida a ella hay que considerar el principio de la conservación de la energía: todo sistema material tiene un contenido energético derivado de su movimiento (energía cinética), de su posición relativa (energía potencial) y de su propia estructura interna (energía interna). La energía total, obtenida como suma de las diversas contribuciones, permanece invariable a lo largo de cualquier transformación.

Con la introducción de la teoría de la relatividad, Einstein probó la equivalencia entre masa y energía, expresada por la relación

$$E = m c^2 \text{ (ecuación de Einstein),}$$

que indica que un cuerpo de masa  $m$  posee, independientemente de otros posibles factores, una energía igual a la que se obtiene multiplicando esta masa por el cuadrado de la velocidad de la luz,  $c$ .

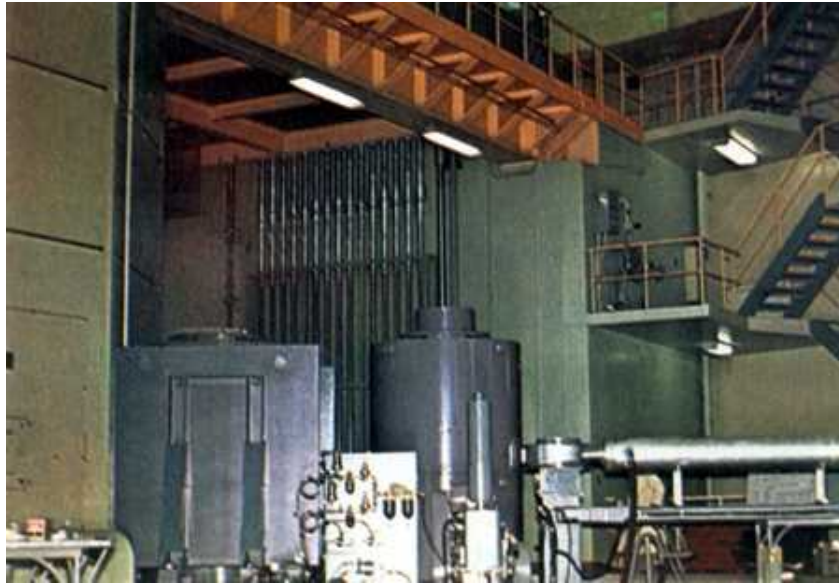
La ecuación de Einstein engloba en un solo principio las leyes de conservación de la masa y de la energía; cada una de estas magnitudes pueden no conservarse por separado, pero su suma ha de permanecer invariable. En una reacción nuclear, por ejemplo, la masa de los productos finales puede ser menor que la de los iniciales; esto supone la desaparición de una cierta cantidad de masa que debe encontrar su réplica en la generación de una cantidad equivalente de energía, como sucede realmente por vía de la emisión de fotones (rayos  $\gamma$ ) que, aunque carentes de masa, tienen energía propia.

Otra ley de conservación es la de la carga eléctrica: en cualquier proceso la cantidad de electricidad participante permanece invariable. En las páginas precedentes se ha usado continuamente este postulado.

En la desintegración nuclear acompañada de la emisión de una partícula  $\beta^-$ , el núcleo expulsa un electrón cuya carga eléctrica, negativa, no puede haber salido de la nada; para compensarla ha de aparecer en el núcleo una carga igual pero de

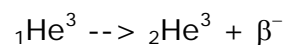


signo positivo, asociada a la conversión de un neutrón en un protón; la suma de las cargas del electrón y del protón, que es nula, garantiza, en efecto, la constancia de la cantidad de electricidad.



*Una vista del mismo reactor.*

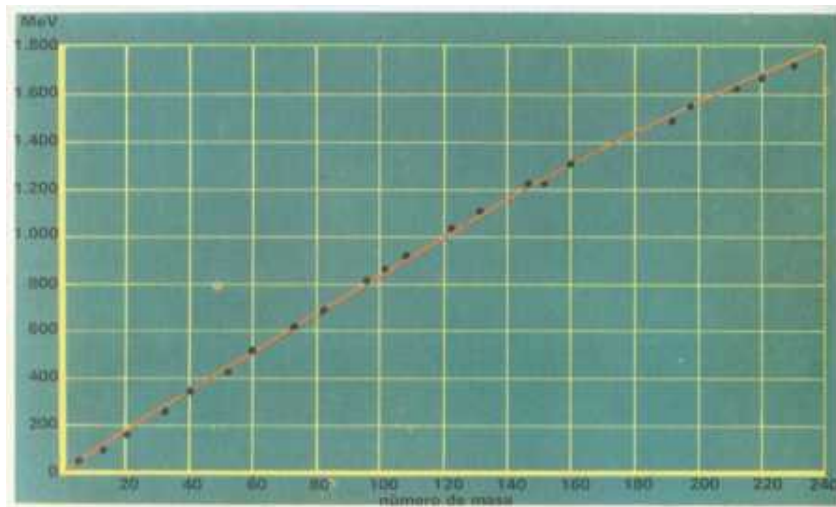
A nivel del mundo atómico existe una nueva ley de conservación, la del número másico, que no tiene nada que ver con la conservación de la masa. Este principio establece que en toda reacción la suma del número de protones y del de neutrones (llamados genéricamente nucleones) permanece constante. En la desintegración  $\beta^-$  del núcleo del tritio, por ejemplo, éste emite un electrón y se transforma en un isótopo del helio:



El núcleo del tritio contiene un protón y dos neutrones, mientras que el isótopo del helio resultante contiene dos protones y un neutrón; el número másico, o número de nucleones, de ambos núclidos es el mismo, aunque la cantidad de protones y de neutrones, por separado sea distinta en el  ${}_1\text{H}^3$  que en el  ${}_2\text{He}^3$ .

#### 4. La energía del núcleo

El cálculo de las masas de protones y neutrones pone de manifiesto una pequeña diferencia entre los valores de ambas. El patrón utilizado para estas mediciones no es el átomo de hidrógeno, sino  $1 / 16$  de la masa del isótopo del oxígeno, de número másico 16. Con esta unidad la masa del protón es 1,0075 y la del neutrón 1,0089, es decir, los neutrones son ligeramente más pesados que los protones. (En 1960, la Unión Internacional de Física Pura y Aplicada acordó tomar como patrón, en la medida de masas atómicas,  $1/12$  de la masa del carbono 12; con este patrón, los anteriores valores resultan ligeramente inferiores.)

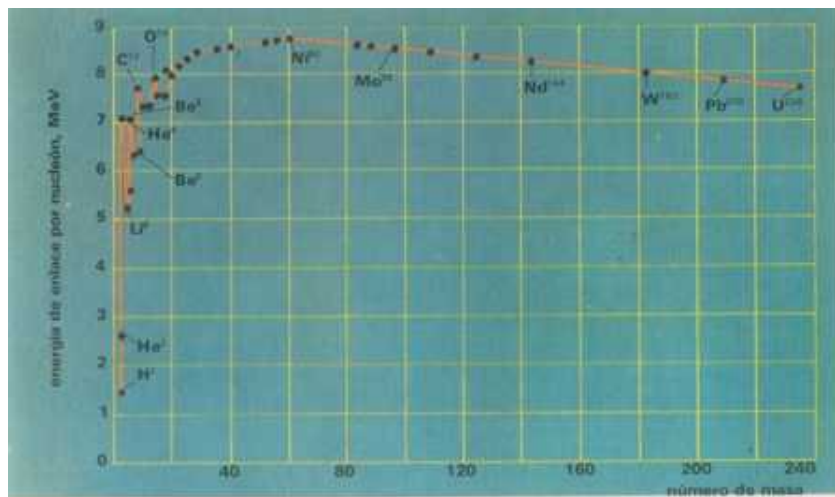


*La energía de enlace de los núcleos aumenta casi linealmente con el número másico.*

En principio, la masa de cualquier núcleo debería ser igual a la suma de las masas de las partículas que lo constituyen; sin embargo, basta observar una lista de masas atómicas para comprobar que éstas son siempre ligeramente inferiores a dicha suma. Ello indica que cuando protones y neutrones se reúnen para constituir un núcleo, la masa total de éstos se reduce en una cierta cantidad  $\Delta_m$ , llamada defecto de masa.

Naturalmente, el principio de conservación masa-energía implica que la masa desaparecida se haya convertido en una cantidad de energía cuyo valor  $\Delta_{mc^2}$  viene dado por la ecuación de Einstein, es decir: en la constitución de un núcleo cualquiera se libera siempre energía. Al término  $\Delta_{mc^2}$  se le denomina energía de

enlace o energía de empaquetamiento, y aumenta casi linealmente con el número másico de los núcleos (véase figura), lo cual resulta lógico, dado que a mayor número de partículas en un mismo núcleo mayor será la energía liberada por éstos. Más significativa es la energía de empaquetamiento por nucleón, obtenida dividiendo aquélla por el número de nucleones que contiene el núcleo, y que constituye una valiosa medida de la estabilidad nuclear: cuanto mayor sea su valor mayor será la energía que debe transferirse a un núcleo para conseguir arrancar nucleones del mismo.



*La energía de enlace por nucleón alcanza un máximo relativo para el helio,  $He^4$ , y el máximo absoluto para los elementos centrales del sistema periódico.*

La formación de un núcleo a partir de protones y neutrones aislados puede intuirse como algo semejante a la precipitación de estas partículas en el interior de un pozo, cuya profundidad coincidiera con la energía de enlace por nucleón. En un pozo muy profundo, sería necesario un trabajo considerable para extraer alguna partícula del mismo, mientras que para pozos superficiales el trabajo requerido sería mínimo. La energía de empaquetamiento por nucleón es nula para el hidrógeno, cuyo núcleo contiene solamente un protón y aumenta muy rápidamente hasta alcanzar un máximo para la partícula  $\alpha$ , lo cual hace que esta partícula sea muy estable y explica que aparezca continuamente en los procesos nucleares; sufre a continuación algunas oscilaciones rápidas y luego aumenta uniformemente, alcanzando sus máximos valores para los elementos centrales del sistema periódico, como el hierro

y el níquel, a partir de los cuales disminuye a medida que aumenta en número másico. Conviene tener en cuenta que la energía de enlace no es exactamente la misma para todos los nucleones. A partir del máximo, las partículas que se añaden al núcleo están menos ligadas que las otras, lo que permite una explicación parcial del hecho que todos los elementos pesados sean radiactivos.

## 5. Estabilidad nuclear

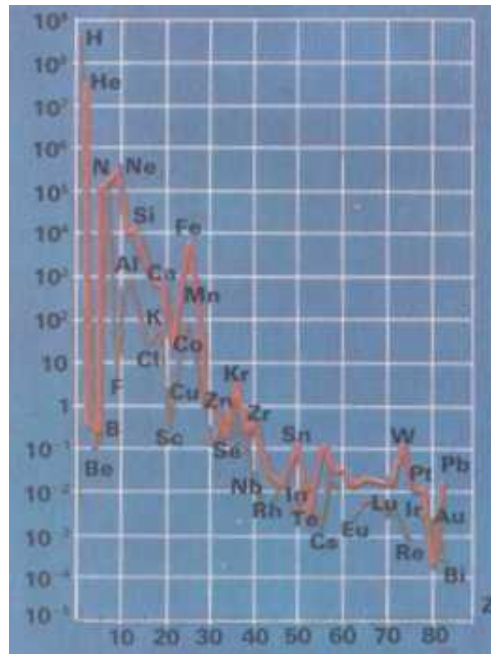
El estudio de la constitución de los núcleos no radiactivos conocidos pone de manifiesto una serie de regularidades que permiten extraer una valiosa información acerca de su estabilidad.



*Centro experimental instalado en torno a un reactor en el Brookhaven National Laboratory de Nueva York.*

Excluido el hidrógeno,  ${}_1\text{H}^1$ , cuyo núcleo contiene un protón, todos los núclidos poseen un número de neutrones por lo menos igual, casi siempre mayor, al número de protones. Los núcleos con un número par de protones ( $Z$  par) son más abundantes y tienen más isótopos que los que presentan un número impar. Los

núcleos con  $Z$  impar nunca tienen más de 2 isótopos no radiactivos; en este sentido, no resulta extraño que los dos únicos elementos no identificados en la Tierra sean el tecnecio y el promecio, constituidos por 43 y 61 protones respectivamente. Los núcleos con un número par de neutrones ( $N$  par) son también más abundantes que los otros, constituyendo excepciones a esta regla el berilio,  ${}^9_4\text{Be}$ , que tiene 5 neutrones y el nitrógeno,  ${}^{14}_7\text{N}$ , que tiene 7. Con el número másico sucede lo mismo: los núcleos más abundantes tienen  $A$  par. Por tanto, de un conjunto de 284 núcleos estables, entre ellos algunos radiactivos de vidas medias extraordinariamente largas, tan sólo 8 tienen un número impar tanto de protones como de neutrones, mientras que otros 163 están constituidos por un número par de tales partículas.



*Abundancia relativa de elementos en el Universo. Este dato proporciona una valiosa información sobre la estabilidad nuclear.*

Los datos más importantes acerca de la estabilidad se deducen de los valores máximos de la energía de enlace por nucleón, de la abundancia relativa de determinados elementos en el universo y del número de isótopos no radiactivos por elemento en función del número de protones o de neutrones. A partir de estos datos se ha comprobado una particular estabilidad en los núcleos cuyo número de

protones o de neutrones coincide con alguno de los siguientes: 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126, denominados, por esta razón, números mágicos, y a los que pueden añadirse, aunque con menos relevancia, los 14, 40, 64, etc.

En lo referente a la energía de enlace los núcleos del helio, con 2 protones y 2 neutrones, y del oxígeno 16, con 8 protones y 8 neutrones, alcanzan valores máximos respecto a sus vecinos inmediatos.



*Con objeto de reducir el coste de los reactores se realizan numerosas investigaciones para obtener materiales más resistentes y duraderos.*

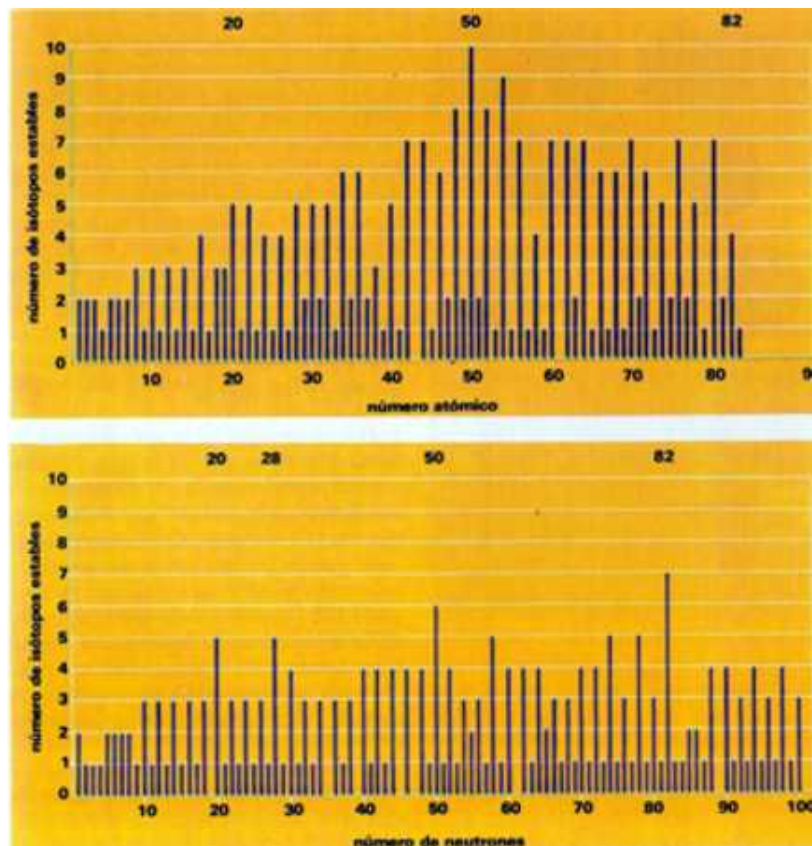
El estroncio 88 y el estaño, que tienen 50 neutrones el primero y 50 protones el segundo, así como el cesio 140, que posee 82 neutrones, y el plomo 208, que tiene 82 protones y 126 neutrones, repiten la misma característica, y lo mismo sucede con los núcleos con 20 y 28 protones o neutrones.

Entre los núcleos más abundantes en el universo figuran: el oxígeno 16, el calcio,  ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ , constituido por 20 protones y 20 neutrones; el estaño 118 (50 protones), el estroncio 88, el itrio 89 y el circonio 90, todos ellos con 50 neutrones; el bario 138, el lantano 139 y el cesio 140, que poseen 82 neutrones, y el plomo 208 (82 protones y 126 neutrones).

En cuanto al número de isótopos, el oxígeno 16 es el elemento más ligero de los que poseen 2 de ellos estables; el primero con 5 isótopos estables es el calcio, y el único que posee 10 es el estaño. En las gráficas que indican la abundancia de núclidos con el número de neutrones se aprecian picos muy señalados para los que poseen 20, 28, 50 y 82 neutrones.

## 6. Fuerzas nucleares

Las experiencias de bombardeo de núcleos con partículas  $\alpha$ , de las que ya se ha hablado, revelan que cuando estas partículas pasan a distancias mayores a  $10^{-13}$  cm del núcleo experimentan sólo la acción repulsiva ejercida por la carga eléctrica positiva de éste, desviándose de su trayectoria, mientras que para distancias menores pueden ser atraídas y absorbidas por el núcleo ( $10^{-13}$  cm es un número que equivale a la billonésima parte de 1 mm y se denomina fermi).



*Número de isótopos estables de los distintos elementos en función del número de protones y de neutrones que contiene el núcleo.*

Ambos efectos son los que permitieron a Rutherford establecer la teoría nuclear del átomo (el primero) y observar las primeras transmutaciones nucleares (el segundo). El comportamiento singular del núcleo con la distancia obliga a aceptar la existencia de un tipo de fuerzas características del mismo, de gran intensidad y que actúan únicamente en pequeñas regiones del espacio; se trata de las fuerzas nucleares, cuya naturaleza es todavía desconocida. Se sabe que su intensidad es unas 40 veces mayor que la de las fuerzas electrostáticas, y trillones de veces superior a la fuerza de la gravedad. Su radio de acción es del orden de 1 fermi y su intensidad disminuye rápidamente con la distancia: a 4 fermis quedan igualadas con las electrostáticas, que son ya un millón de veces superiores cuando la distancia aumenta hasta 25 fermis. Para valores de 1 fermi o más son atractivas, mientras que para distancias menores se hacen repulsivas. Otra característica singular consiste en el hecho que las fuerzas nucleares se ejercen entre protones y neutrones exclusivamente; un protón y un electrón enfrentados experimentan sólo la acción atractiva derivada de sus cargas eléctricas.

Las fuerzas nucleares son las únicas capaces de explicar la elevada energía de cohesión de los núcleos atómicos, así como su estabilidad. En las reducidas dimensiones del núcleo están concentrados determinado número de protones que por poseer el mismo tipo de carga eléctrica se repelen y tienden a separarse, acción que es contrarrestada por la atracción que, derivada de las fuerzas nucleares, ejercen entre los protones y neutrones.

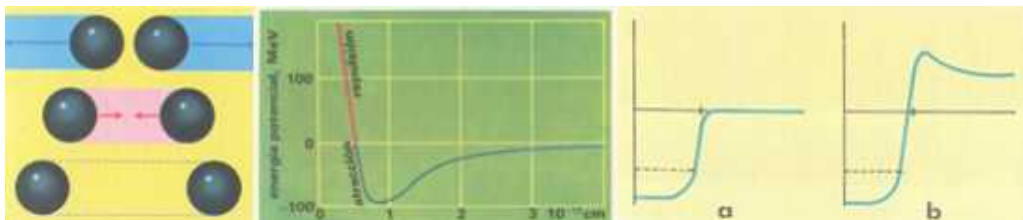
## **7. Modelos nucleares**

El conocimiento de la naturaleza de las fuerzas nucleares con la misma precisión con que se conoce la de las eléctricas y las gravitatorias, permitiría, probablemente, elaborar una teoría del núcleo con el mismo rigor que la que explica la estructura de la corteza atómica. Sin embargo, y aunque se han establecido diversas hipótesis, el resultado obtenido hasta ahora resulta poco satisfactorio. En su defecto, la explicación de las propiedades del núcleo se aborda a partir de modelos que, basados en los datos experimentales más sobresalientes, constituyen aproximaciones más o menos afortunadas de una realidad de la que sólo tiene un conocimiento parcial.



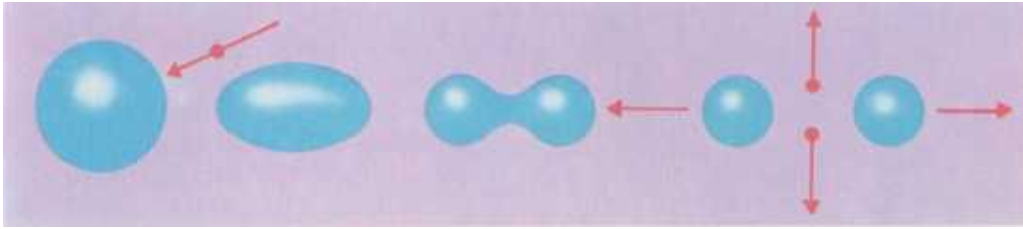
El modelo nuclear de la partícula se basa en la gran estabilidad de tales partículas y en el hecho que muchos de los núcleos estables tengan números másicos múltiplos de 4. La idea de ese modelo consiste en suponer que los núcleos están constituidos por partículas  $\alpha$  que forman grupos independientes y poco ligados entre sí. Presenta cierta utilidad para los núcleos pesados, pero falla bastante con los ligeros. Por ejemplo, el berilio,  $4\text{Be}_8$ , debería estar constituido por 2 partículas  $\alpha$  y ser muy estable, cuando en realidad es altamente inestable.

El modelo de las partículas uniformes, ideado por Wigner, parte de la idea que es imposible fijar las cualidades individuales de los nucleones, sometidos a la intensa acción de las fuerzas nucleares, y propone un estudio estadístico del conjunto de los mismos. Los problemas de índole teórica que plantea son considerables, y aunque permite explicar bastante correctamente las energías de enlace, muchas de las conclusiones a que llega están en desacuerdo con la experiencia.



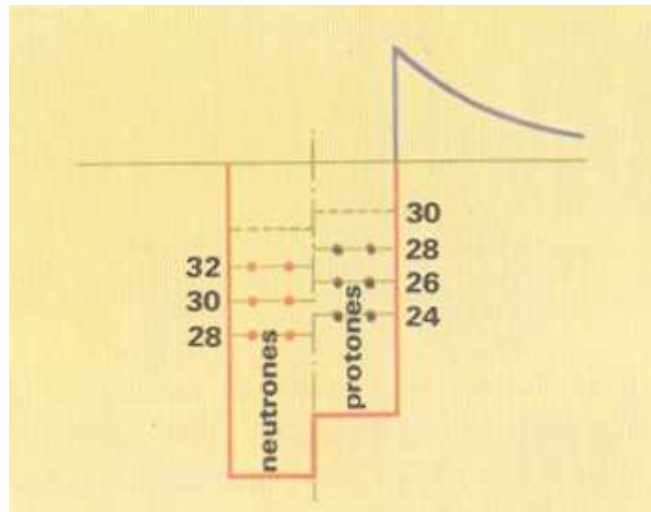
*La acción de las fuerzas nucleares varía con la distancia entre las partículas afectadas. En la parte derecha, gráfico en el que se indica el potencial para una partícula exterior: A) sin carga eléctrica; B) con carga eléctrica, debido al campo de fuerzas nucleares.*

Más sugestivo resulta el modelo de la gota líquida, propuesto por Bohr y Wheeler en 1937. Su fundamento reside en el corto radio de acción de las fuerzas nucleares, y la variación relativamente lenta de la energía de enlace al pasar de unos núcleos a los inmediatos. De ahí deriva el que cada nucleón ejerce su acción únicamente sobre los más inmediatos y asimila el comportamiento de protones y neutrones al de las moléculas de los líquidos.



*El modelo de la gota líquida permite una interpretación aproximada de la fisión nuclear.*

El modelo permite explicar bastante bien aquellas reacciones nucleares en las que se forma un núclido intermedio entre el estado inicial y el final, así como la fisión de los núcleos pesados; da buenos resultados cuando los números atómicos son superiores a 25, pero falla para los núcleos más ligeros. La resultante de las fuerzas que actúan sobre las partículas interiores del núcleo se supone nula, por lo que el movimiento de éstos será desordenado; por el contrario, los nucleones situados en la parte externa son atraídos hacia el interior, lo que hace que la superficie del núcleo se comporte, por un fenómeno paralelo al de la tensión superficial, como una especie de membrana.



*En el modelo nuclear de capas, protones y neutrones se distribuyen en niveles de energía en una forma comparable a como lo hacen los electrones en la corteza.*

Cuando una partícula penetra en el interior del núcleo la energía que posee excita el movimiento de los nucleones hasta provocar la expulsión de algunas partículas de la superficie, de un modo que podría asimilarse al fenómeno de la evaporación. La

fisión se interpreta, en este modelo, como la consecuencia de un estado de vibración que se produce tras la absorción de alguna partícula, y que provoca la deformación de la gota y su fragmentación en dos partes.

### 8. Modelo nuclear de capas

La distribución de los electrones corticales en órbitas o niveles de energía ha hecho pensar en la posibilidad de una organización semejante en el interior del núcleo. Entre 1948 y 1950 Maria G. Mayer, Jensen, Suess y otros científicos, postularon, en diversos trabajos, que los protones y neutrones están dispuestos en diferentes capas, a cada una de las cuales corresponde un nivel de energía. Como en el caso de los electrones, cada capa admite un número máximo de protones o de neutrones en la misma, y cuando está completo el núcleo correspondiente tiene una estructura particularmente estable. La evidencia de los números mágicos confirma esta hipótesis: las sucesivas capas nucleares pueden contener 2, 8, 28, 50, 82 ó 126 nucleones. Se supone que cada nucleón está sometido a una acción que es el promedio de las fuerzas ejercidas entre él y los restantes nucleones; como consecuencia de ello, cada nucleón puede considerarse afectado por un campo de fuerzas nucleares con el que entra en interacción.



*Aspecto de las instalaciones y construcción de un reactor nuclear.*

El número de nucleones que contiene cada nivel depende de este campo, y a causa de la diferencia de masas entre los protones y los neutrones los niveles de energía de los segundos son ligeramente distintos de los de los primeros. El modelo de las capas, también llamado de las partículas independientes, permite describir cualitativamente diversos problemas de la física del núcleo, como la existencia de estados nucleares excitados que pasan a un estado estable mediante la emisión de radiación  $\gamma$  así como en la medida de la posibilidad que un núcleo sufra un determinado tipo de desintegración; sin embargo, no permite una correcta interpretación de la fisión nuclear, ni la obtención de números correctos para las energías de enlace.

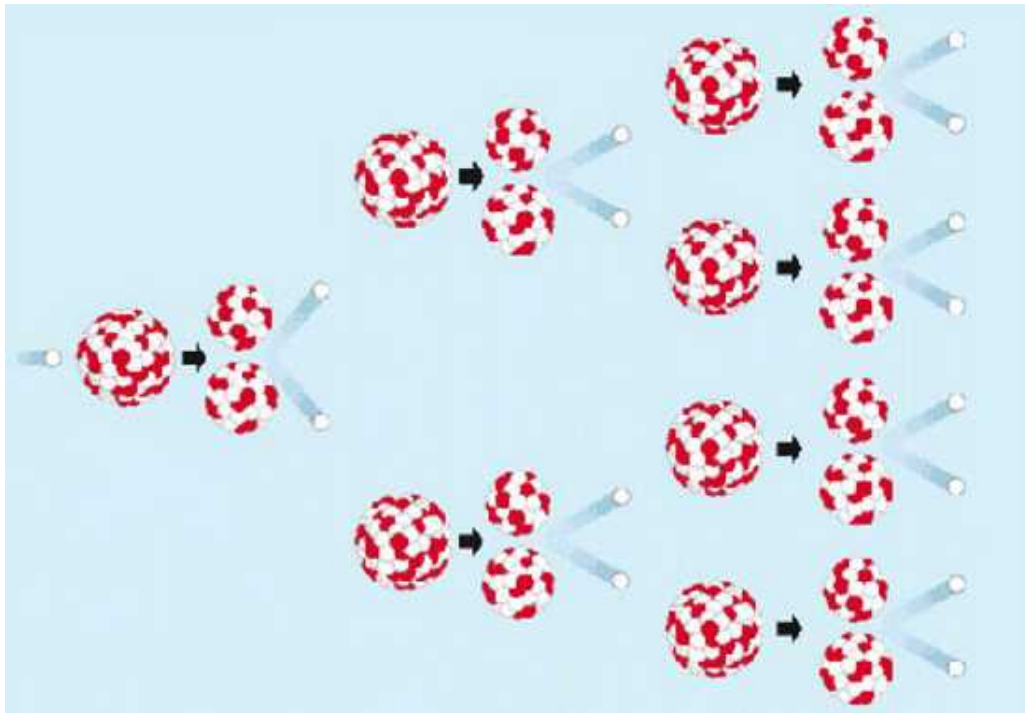
El modelo de capas y de la gota líquida no son mutuamente excluyentes, por lo que se ha elaborado el modelo colectivo del núcleo, que supone que éste puede sufrir alteraciones que afectan a su forma y tamaño, y modifican la independencia de los nucleones, que continúan manteniendo una estructura en capas.

## Capítulo 5

### Aplicaciones

#### Contenido:

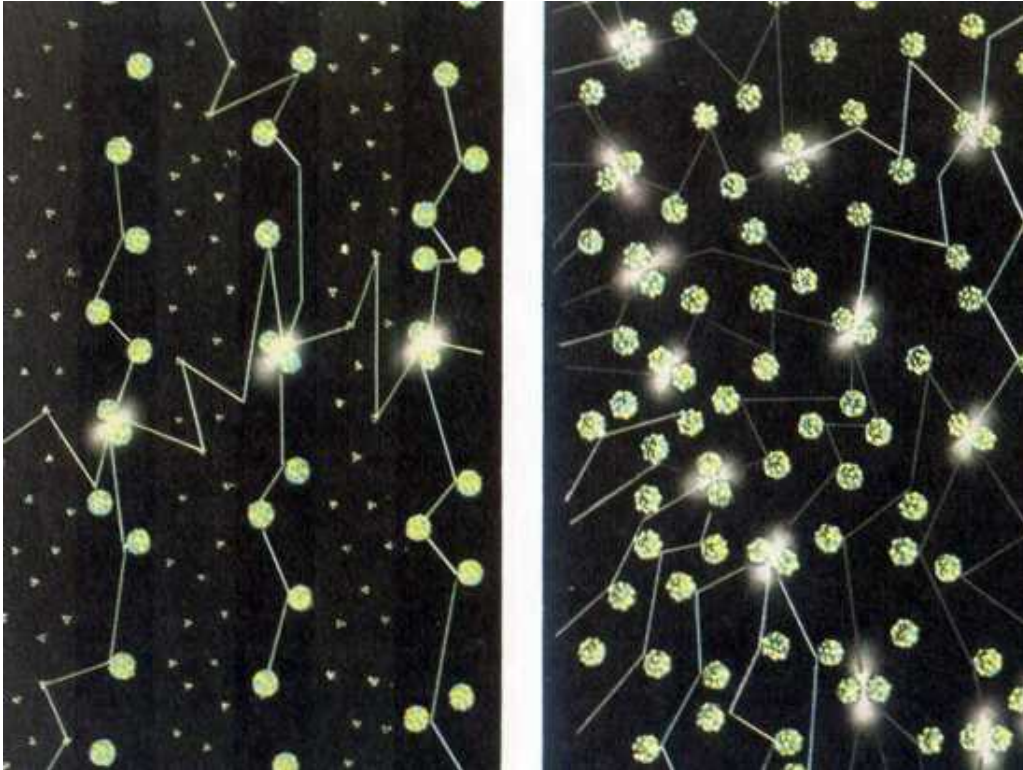
1. [Reacciones en cadena](#)
2. [Materiales fisionables. Masa crítica](#)
3. [Bomba A](#)
4. [Reactores nucleares](#)
5. [Utilización de los reactores](#)
6. [Origen de la energía solar](#)
7. [Bombas H](#)
8. [La bomba N](#)
9. [Control de la fusión nuclear](#)



*Reacción en cadena. Cada núcleo libera al escindirse 2 ó más neutrones que a su vez escinden nuevos núcleos.*

## 1. Reacciones en cadena

Cuando se produce la fisión de un elemento pesado aparecen, junto con 2 núcleos de tamaño intermedio, un número variable de neutrones que a su vez pueden chocar con nuevos núcleos produciendo su fisión.



*En las reacciones en cadena controladas (izquierda) la presencia de un moderador limita el número de escisiones. En las reacciones no controladas (derecha) la reacción se propaga rápidamente a toda la masa.*

Supóngase que se dispone de un material fácilmente fisionable (o fisible), como el uranio 235, y que uno de sus núcleos se escinde liberando 2 neutrones; si éstos escinden a su vez sendos núcleos de uranio, quedarán libres 4 neutrones (2 por cada núcleo escindido), que a su vez podrán provocar la fisión de otros núcleos. Un proceso que funcionase de esta forma se auto-mantendría debido a la generación continua de neutrones hasta producir la fisión de todo el uranio disponible. El fenómeno descrito es un ejemplo de reacción en cadena, en la cual basta una desintegración inicial a partir de la cual se produce una avalancha de neutrones capaces de escindir todo el material fisible.

La energía liberada en la fisión es, con mucho, superior a la producida en todos los demás tipos de reacciones nucleares. La razón de esto se comprende analizando la curva de variación de la energía de enlace por nucleón. Los núcleos resultantes de la fisión pertenecen a la región de máxima energía de enlace; he aquí que, en cada fisión, se produzca una pérdida de masa que genera una cantidad considerable de energía. Un 85 %, aproximadamente, de esa energía se transforma en energía cinética de los nuevos núcleos, que se desprenden a velocidades considerables, mientras que el 15 % restante se invierte en energía cinética de los neutrones emitidos y en la producción de rayos  $\gamma$ .



*Los isótopos radiactivos artificiales encuentran múltiples aplicaciones en el campo de la química, biología, medicina y tecnología.*

En la fisión completa de 1 kg de uranio 235, la pérdida de masa es del orden de 1 g, y la energía correspondiente a la conversión de este gramo en energía proporciona

un efecto equivalente al que se obtendría de 20.000 toneladas de trinitrotolueno (TNT).

La escisión a velocidad constante de 1 kg de uranio durante 1 día podría producir, si su energía se aprovechara íntegramente, una cantidad de electricidad igual a la generada por una central térmica en la que se quemasen diariamente más de 8.000 toneladas de carbón. No puede extrañar que la posibilidad de liberar cantidades tan grandes de energía haya provocado gran interés en el estudio y control de la fisión nuclear y de las reacciones en cadena. Desgraciadamente, los primeros pasos en la aplicación de este campo se dieron con el, único propósito de obtener un arma bélica definitiva, la bomba atómica, y sólo posteriormente se pensó en las posibles aplicaciones pacíficas.



*Una instalación nuclear en Nortfield (EE.UU.)*

El nacimiento de la era nuclear ha producido el doble efecto de abrir las puertas a una fuente casi inagotable de energía y simultáneamente cernir el espectro de una



catástrofe atómica capaz de hacer desaparecer cualquier vestigio de vida de nuestro planeta.

## 2. Materiales fisionables. Masa crítica

Para que se pueda producir una reacción en cadena depende de múltiples factores, entre ellos la naturaleza de los núclidos utilizados, el número de neutrones emitidos en cada fisión y su capacidad para provocar nuevas fisiones.

En una muestra del isótopo del uranio más abundante en la naturaleza, de  $U^{238}$ , esa reacción nunca se producirá, debido fundamentalmente a que tal núclido sólo puede ser escindido por neutrones rápidos; los neutrones producidos en una fisión pertenecen, en su mayor parte a esta categoría, pero hay que tener en cuenta la posibilidad que los neutrones libres provoquen reacciones distintas a las de fisión, o bien que realicen choques elásticos contra los núcleos. En cada choque pierden parte de su energía, lo que hace que su velocidad disminuya rápidamente hasta valores inferiores a los necesarios para provocar la fisión. Por esta razón, aunque en una fisión se produzcan 2 o más neutrones, la probabilidad que éstos alcancen a un núcleo en las condiciones adecuadas para escindirlo son muy pequeñas; la fracción de neutrones útiles es muy escasa y el proceso, en lugar de multiplicarse, se extingue rápidamente.



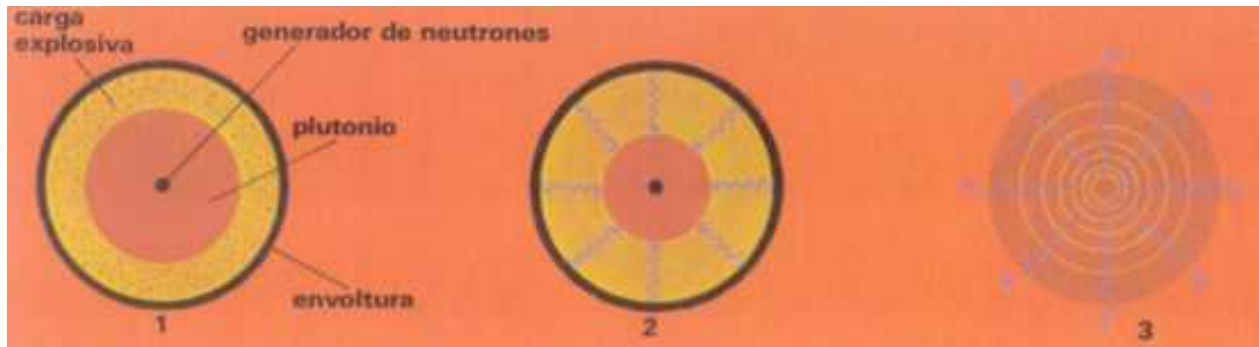
*El futuro de la aplicación pacífica de la energía nuclear reside en el estudio, en forma controlada de las reacciones termonucleares.*

Los materiales útiles para que se produzca en ellos una reacción en cadena son aquellos que pueden sufrir fácilmente la fisión por bombardeo de neutrones: los isótopos del uranio  $U^{235}$  y  $U^{233}$ , y el isótopo del plutonio  $Pu^{239}$ . Todavía debe tenerse en cuenta el hecho que los neutrones, en lugar de chocar con algún núcleo pueden salir a través de la superficie del material perdiéndose definitivamente. La posibilidad que un neutrón pueda escapar depende de la relación entre el volumen ocupado por la muestra fisionable y la superficie de la misma. Para volúmenes pequeños o grandes superficies gran parte de los neutrones escaparán, sucediendo lo contrario cuando la superficie es relativamente pequeña respecto al volumen total. Esto impone un límite a la masa mínima de materia fisible que debe concentrarse para que se produzca una reacción en cadena; se llama masa crítica al menor valor de masa que cumple tal condición. La masa crítica depende de la forma que se dé a la muestra, correspondiendo su valor mínimo a la forma esférica, por ser la que permite concentrar un mayor volumen con una superficie externa mínima.

### **3. Bomba A**

Las bombas atómicas son ingenios en los que se produce una reacción en cadena de una sustancia fisionable, que suele ser el  $U^{235}$  o el  $Pu^{239}$ . La combustión de todo el material se realiza en un tiempo brevísimo, del orden de una cienmillonésima de segundo. El material fisible puede estar constituido por dos bloques de masa inferior a la crítica que se mantienen separados; para provocar la explosión uno de los bloques se proyecta violentamente contra el otro por medio de la detonación de un explosivo convencional, iniciándose la reacción en cadena en el instante en que ambas entran en contacto.

En otros casos, el uranio o plutonio forman una única masa que se mantiene en condiciones no críticas gracias a su estructura porosa; rodeándola, está dispuesto un explosivo convencional que al estallar comprime a la sustancia radiactiva convirtiéndola en crítica. La potencia de este tipo de bombas está limitada por el hecho que no puede incrementarse indefinidamente la cantidad de uranio o plutonio, evitando, al mismo tiempo, que se inicie la reacción en cadena.



*Esquema de una bomba A, en la que el plutonio forma una masa porosa. La compresión de ésta la convierte en crítica y se inicia la explosión.*

La bomba lanzada sobre Hiroshima en 1945 tenía una potencia de 20 kilotones; su explosión destruyó más de 60.000 edificios y ocasionó unos 80.000 muertos y otros tantos heridos. Las bombas más potentes de este tipo alcanzan actualmente una potencia de 500 kilotones, o sea que son 25 veces más potentes que la que destruyó Hiroshima.

#### 4. Reactores nucleares

El problema fundamental que se plantea para la utilización no bélica de la inmensa cantidad de energía liberada en la fisión de los núcleos radica en el control de las reacciones en cadena.

*“Los científicos y los técnicos no forman parte de una pequeña élite desligada de las contingencias prácticas. Deben, como ciudadanos de la gran comunidad de los trabajadores, militar con éstos para asegurar una plena utilización de la ciencia con vistas a la paz y al bienestar de los hombres. Exigimos la prohibición absoluta del arma de agresión y exterminación masiva de los pueblos. Exigimos el establecimiento de un riguroso control internacional para asegurar la aplicación de esta medida de prohibición. Consideramos criminal al primer gobierno que utilizara el arma atómica contra otro país cualquiera.”*

**F. JOLIOT-CURIE**

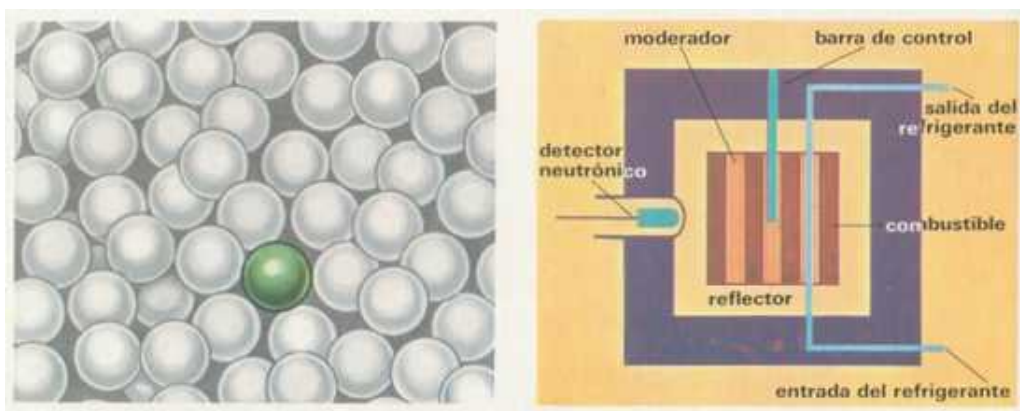
En una bomba atómica la reacción tiene lugar espontáneamente y toda la energía se libera en un lapso de tiempo brevísimo; la clave del aprovechamiento de la misma

está en conseguir limitar la velocidad de reacción de forma que la energía, liberada paulatinamente, pueda utilizarse para fines previstos de antemano, como puede ser su conversión en electricidad. Los dispositivos en los que tienen lugar tales reacciones controladas son los reactores nucleares, de los que existen diversos tipos según la velocidad de los neutrones que provocan la fisión, el material utilizado y otros detalles técnicos de su construcción.

La mayoría de los reactores actuales en funcionamiento utilizan como combustible el uranio natural (mezcla del  $U^{238}$  y del  $U^{235}$  en las mismas proporciones en que se encuentra en la naturaleza, es decir, 99,28 % del primero y 0,72 % del segundo), o bien uranio natural enriquecido con una proporción algo mayor de  $U^{235}$ . La parte fundamental de un reactor, en la que se produce la fisión, recibe el nombre de núcleo del reactor, y está constituido por el combustible, el moderador, el refrigerante y la parte estructural.

El combustible, en estado sólido, aparece distribuido en forma de placas o cartuchos separados por el material moderador, cuya función es la de reducir la velocidad de los neutrones; puede tratarse de agua, agua pesada (agua químicamente igual a la ordinaria, pero en la cual el hidrógeno es sustituido por el deuterio), grafito o berilio.

Entre ellos pasa el refrigerante: agua, agua pesada, gases a gran presión, como el anhídrido carbónico, refrigerantes orgánicos o metales de bajo punto de fusión, como el sodio en estado líquido; su función es limitar la temperatura del reactor y transportar la energía producida para su posterior utilización.



*A la derecha, el uranio 235 está mezclado con el uranio 238 en unas proporciones muy pequeñas. A la izquierda, esquema del núcleo de un reactor nuclear.*

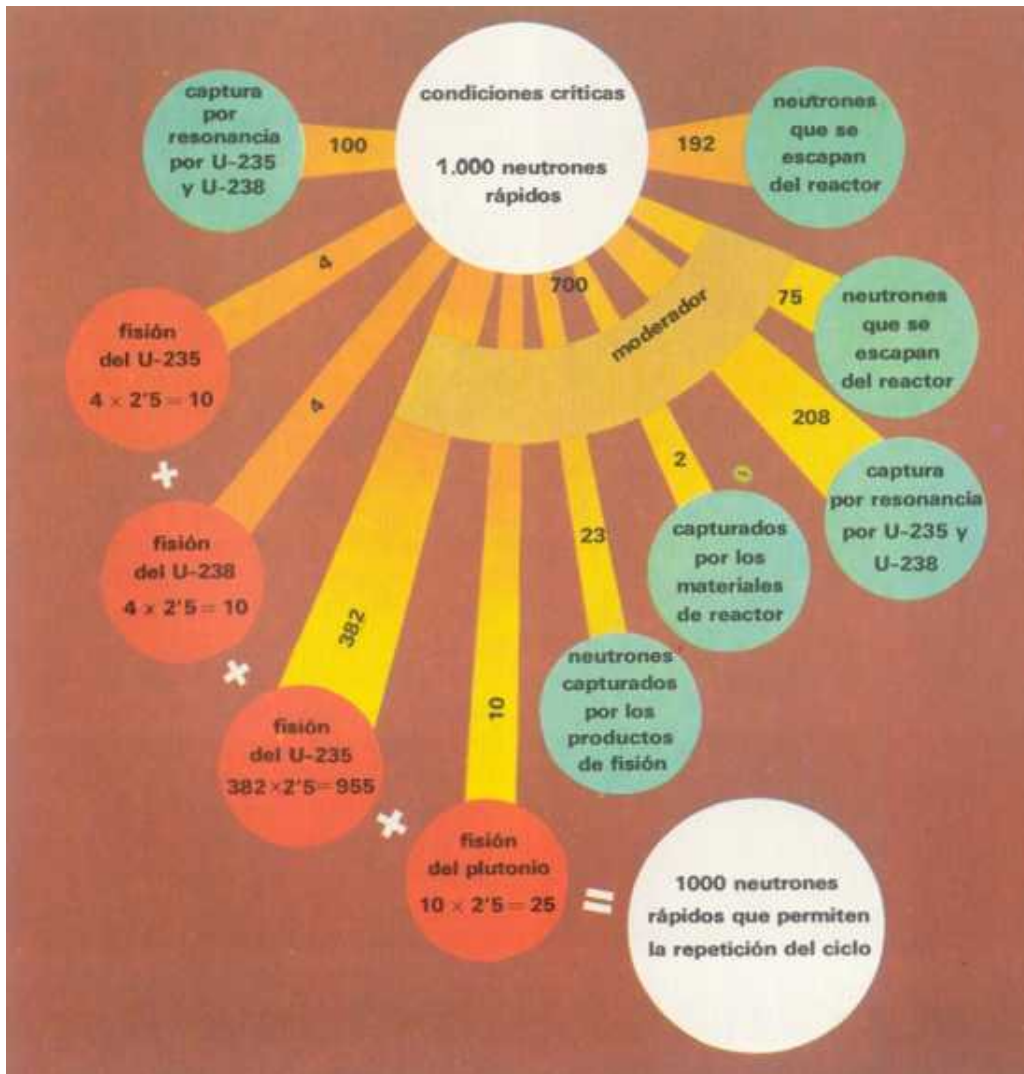
En el interior del núcleo se introducen las llamadas barras de control, constituidas por materiales muy absorbentes de neutrones, como el cadmio, el boro o el indio.



*La manipulación de materiales radiactivos hace imprescindible la adopción de severas medidas de protección de los operarios contra las radiaciones emitidas.*

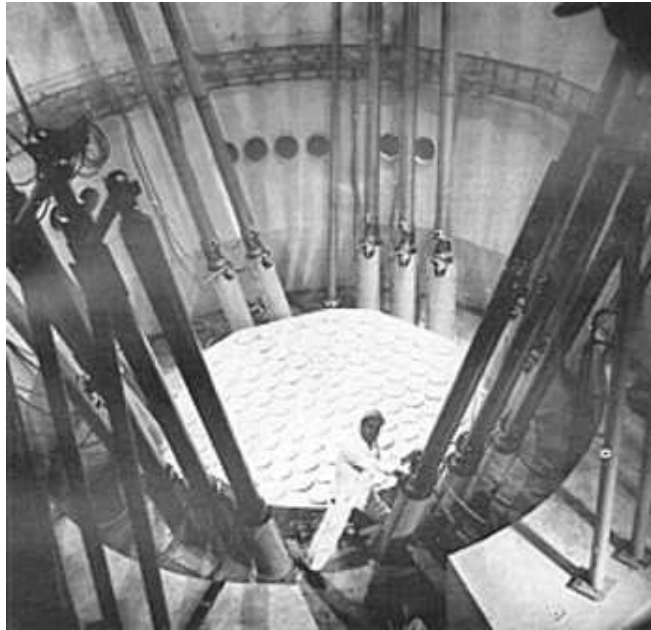
Según la penetración de estas barras en el interior del reactor, se absorben más o menos neutrones, se limita la velocidad de la reacción en cadena y se controla la misma, pudiéndose, además, si es necesario, detenerla completamente.

Rodeando al núcleo está dispuesta una capa de material reflector (agua o grafito) cuya misión es limitar en lo posible las pérdidas de neutrones, y una serie de cubiertas capaces de impedir que las radiaciones producidas en el núcleo puedan llegar al exterior.



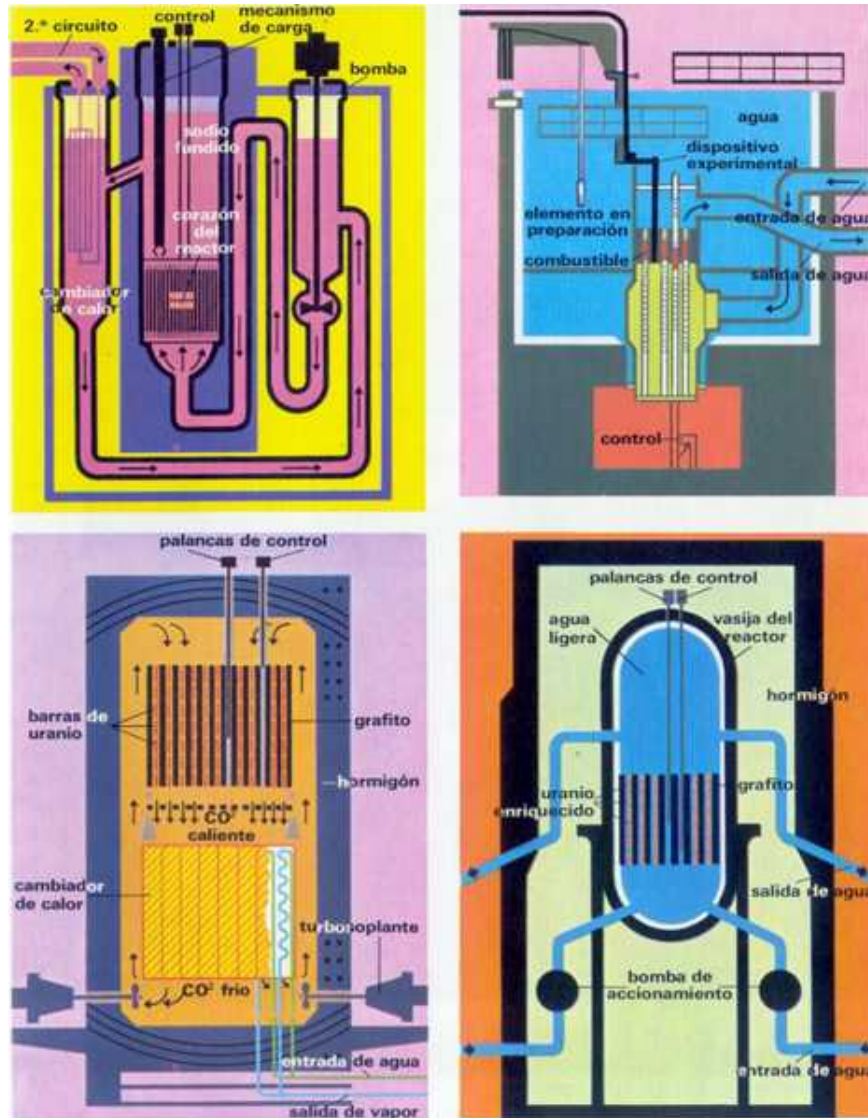
*Los neutrones liberados en un reactor nuclear pueden dar lugar a múltiples reacciones. El reactor funcionará cuando el número de neutrones capaces de escindir núcleos se mantenga, como mínimo, constante.*

Como en el caso de las bombas, el funcionamiento del reactor depende que los neutrones producidos en cada fisión sean capaces de generar fisiones o bien se pierdan. La diferencia radica en el material utilizado y en la presencia de los moderadores, pues, como ya se ha dicho, en una masa de uranio natural jamás puede producirse espontáneamente una reacción en cadena.



*Barras de control en un reactor nuclear de piscina,*

A continuación se analiza el proceso de la reacción en cadena en un reactor nuclear. Como promedio, en la fisión de un núcleo de  $U^{235}$  se producen 2,5 neutrones, generalmente muy rápidos. En ocasiones, algunos de estos neutrones pueden escindir un núcleo de  $U^{238}$ , lo que da lugar a un mayor aporte neutrónico. Los neutrones rápidos producidos en estos procesos pueden perderse al salir del núcleo de material fisible, al ser absorbidos por el  $U^{238}$  convirtiéndose en  $Pu^{239}$ , o al dar lugar a otras reacciones nucleares que no son de fisión. Interesa reducir rápidamente su velocidad hasta llegar a transformarlos en neutrones lentos (neutrones térmicos), dado que entonces están en óptimas condiciones para escindir un nuevo núcleo de  $U^{235}$  sin que sean absorbidos por el  $U^{238}$ , más abundante. Es aquí donde desempeña su papel la sustancia moderadora; los materiales utilizados para este fin son muy poco sensibles a la absorción de los neutrones o a la producción de otras reacciones, pero ejercen una acción de frenado muy eficaz.



Arriba: a la izquierda, reactor refrigerado por sodio fundido; a la derecha, reactor experimental del tipo piscina. Abajo: a la izquierda, reactor refrigerado por gas; a la derecha, reactor refrigerado y moderado por agua.

Los neutrones rápidos producidos en las barras o cartuchos de uranio escapan velozmente de éstos, pero entonces penetran en el interior de los moderadores, donde pierden velocidad, por lo que, al volver al uranio, tendrán una probabilidad muy grande de producir una nueva fisión y generar a su vez nuevos neutrones.

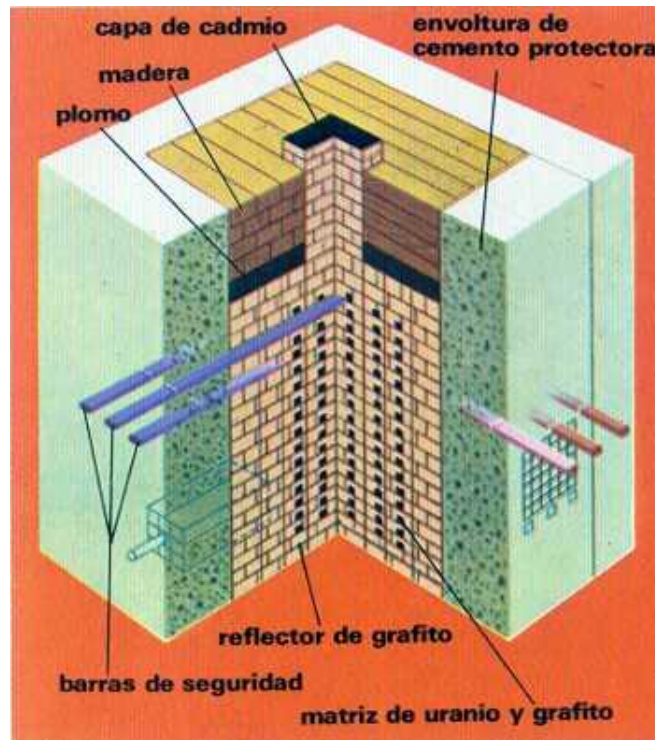




*Piscina y operario protegido con traje especial, saliendo del interior del reactor nuclear de potencia de Vandellós (Tarragona).*

Un reactor en el que uno de los neutrones producidos en cada fisión llega a escindir otro núcleo se dice que se encuentra en estado crítico; cuando el número de neutrones útiles por fisión es inferior a la unidad el reactor está en estado subcrítico, y en estado hipercrítico cuando se produce más de un neutrón útil en cada fisión. El que se llegue a alcanzar las condiciones críticas depende de la masa de combustible que constituya al reactor, así como de su distribución y de la del moderador y, desde luego, del grado de penetración de las barras de control.

El proceso descrito corresponde a los reactores lentos térmicos, en los que la fisión se produce por neutrones lentos. Existen también reactores rápidos, en los que la fisión se produce por neutrones muy energéticos. Un modelo muy simple de éstos podría consistir en una esfera de 5 a 10 cm de  $U^{235}$  o de  $Pu^{239}$ , de masa inferior a la crítica, rodeada de un refrigerante y de una capa reflectora; la moderación de los neutrones, si existe, es muy limitada y la fisión se produce directamente por los neutrones rápidos liberados en las fisiones anteriores. Finalmente, existen reactores intermedios en los que la fisión tiene lugar por la acción de neutrones de energías medias; están constituidos por uranio muy enriquecido, y en ellos el moderador tiene una acción más atenuada que en los reactores lentos.



*Esquema del núcleo de un reactor de uranio natural y grafito.*

Conviene, asimismo, distinguir entre los reactores heterogéneos, cuya estructura es la descrita al inicio de este apartado, y los reactores homogéneos, en los que el combustible, siempre enriquecido, puede estar formado por pequeñas partículas distribuidas uniformemente en el seno del moderador, o en forma de sal disuelta en agua o en agua pesada.

## 5. Utilización de los reactores

Los reactores nucleares son empleados fundamentalmente con tres fines: la producción de energía eléctrica (reactores de potencia), la investigación científica y la producción de materiales fisionables.

En los reactores de potencia el refrigerante toma calor del núcleo del reactor y lo transmite, en un cambiador, al agua de un segundo circuito; esa agua se transforma en vapor, que mueve las turbinas de los generadores eléctricos. Existen modelos heterogéneos que emplean grafito de moderador, y en los que el refrigerante es anhídrido carbónico, como el de Calder Hall, en Gran Bretaña, que fue el primer reactor de potencia que se construyó.

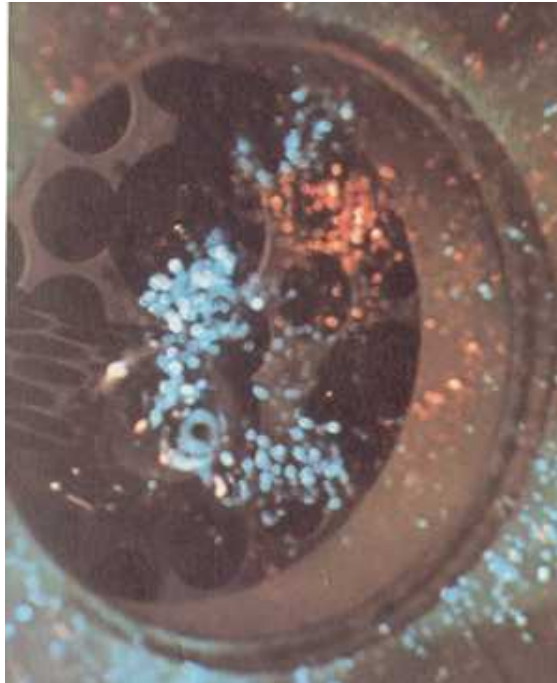


*Construcción de un reactor nuclear en Illinois (EE.UU.)*

Los más utilizados en la actualidad son de uranio enriquecido, moderados y refrigerados con agua, como los PWR o reactores de agua a presión, en los que el agua refrigerante se envía a una presión de 140 atmósferas, y los BWR, o reactores de agua hirviente, en los que ésta es enviada a 70 atmósferas y entra en ebullición en el núcleo del reactor, pasando el vapor directamente a la caldera.

Los reactores de investigación pueden ser empleados para el estudio de los materiales destinados a la construcción de reactores de potencia, a la medición de las radiaciones producidas, a las experimentaciones con ellas y a la producción de isótopos radiactivos. Para estos fines se utilizan reactores homogéneos, heterogéneos y de piscina. Estos últimos, de uranio muy enriquecido, están moderados y refrigerados por agua con circulación natural; para ello, los bloques del combustible están sumergidos en profundidad en una especie de piscina.

Los materiales fisionables por excelencia se encuentran en muy poca proporción en la naturaleza, como el UZ, o bien no existen, como el Pu<sup>239</sup>.



*Núcleo de un reactor nuclear. Las manchas oscuras son los huecos en los que están colocadas las barras de uranio.*

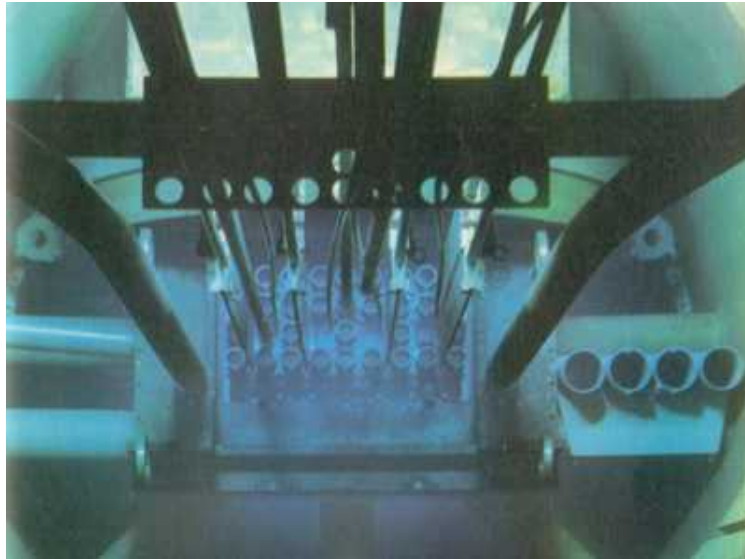
Los primeros reactores nucleares fueron pensados precisamente para la producción de  $\text{Pu}^{239}$ , con objeto de utilizar este elemento en la fabricación de la bomba atómica. Muchos reactores se utilizan, aparte de otros fines, para la producción de estos núclidos: basta disponer en su interior una sustancia fértil que por la acción de los neutrones se transmute, produciendo núclidos. Las sustancias fértiles pueden ser el  $\text{U}^{238}$ , que da origen al  $\text{Pu}^{239}$  por medio de una reacción ya citada, y el tóno  $\text{Th}^{232}$ , que tras la absorción de un neutrón y la emisión consecutiva de dos electrones pasa a convertirse en una nueva sustancia, el  $\text{U}^{233}$ .

## **6. Origen de la energía solar**

El Sol, como todas las estrellas, emite continuamente al espacio una cantidad enorme de energía; el origen de la misma ha constituido, durante largo tiempo, uno de los problemas más intrigantes.

Tiempo atrás se sostuvieron hipótesis según las cuales tal energía era producida en procesos químicos, como la combustión del carbón u otros análogos, ideas que tuvieron que abandonarse dado que de ser así tales combustibles se agotarían en

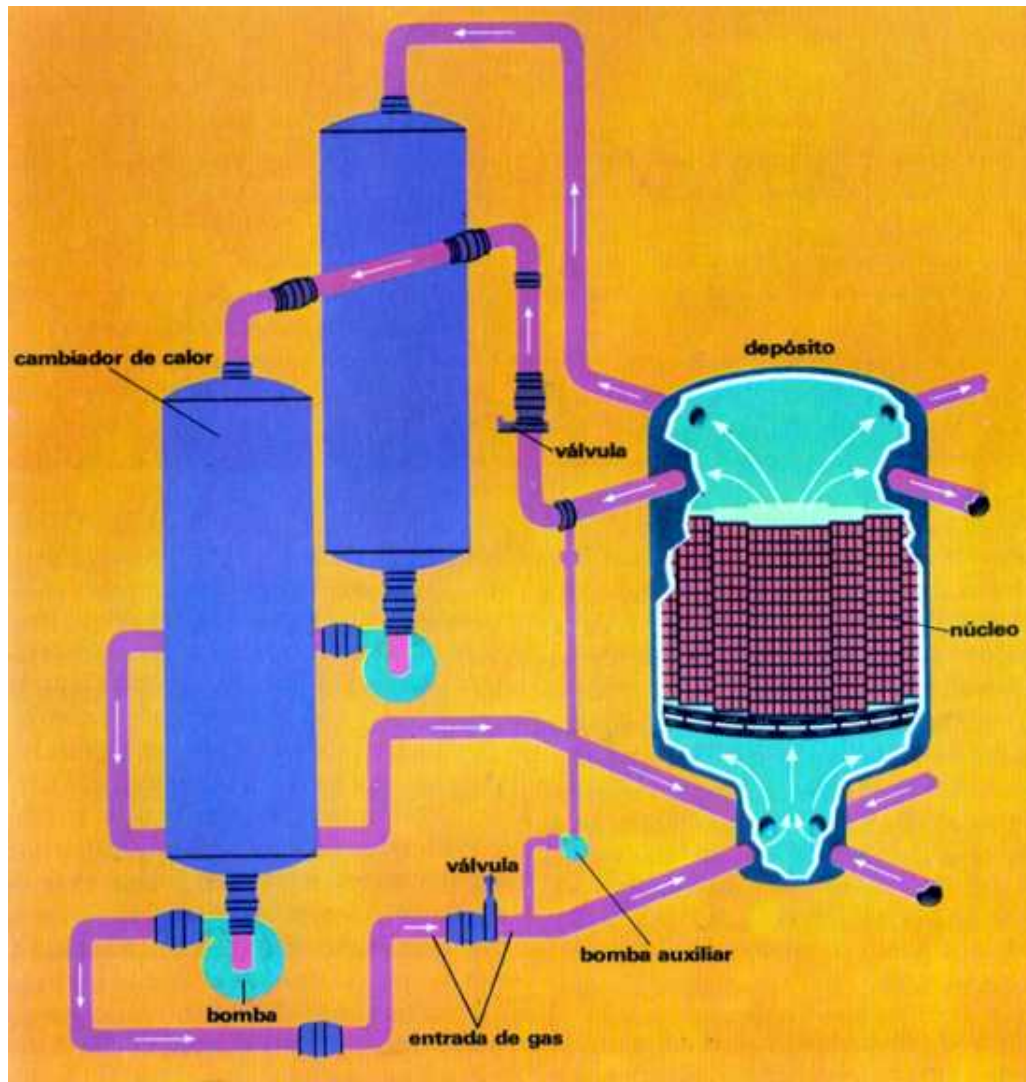
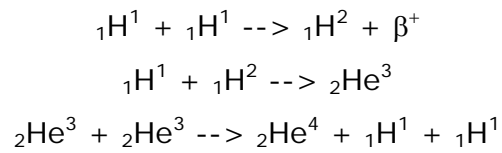
un tiempo brevísimo. Por otra parte, la escasa concentración de núcleos en el Sol hace imposible el recurso de reacciones nucleares de fisión.



*Reactor Omega West, Los Álamos (California).*

Jean Perrin fue el primero que sugirió, en 1921, que la energía solar se producía como resultado de la fusión de cuatro protones para formar una partícula. En efecto, un procedimiento para liberar la energía nuclear consiste en recurrir a reacciones de fusión de dos núcleos atómicos, siempre y cuando se verifique la condición que la masa del núcleo así formado sea inferior a la suma de las masas de los núcleos iniciales, caso en el cual durante la reacción se pierde una reacciones no tienen lugar en condiciones normales. Para que se produzcan es necesario que los núcleos iniciales tengan la suficiente energía para poder aproximarse, venciendo la repulsión eléctrica mutua, hasta distancias del orden de 1 fermi, en las que se manifiesta la acción atractiva de las fuerzas nucleares. Por esta razón, sólo puede conseguirse que dos núcleos choquen, en estas condiciones, cuando la temperatura del material utilizado es del orden de varios millones de grados, razón por la que a las reacciones de fusión se las llame también termonucleares. La abundancia de elementos ligeros y las altas temperaturas existentes en el interior de las estrellas hacen que sean precisamente las reacciones termonucleares las responsables de la energía emitida por aquéllas. Se han propuesto diversos ciclos de tales reacciones adecuadas a los diferentes tipos y estadios de la evolución estelar. Parece ser que

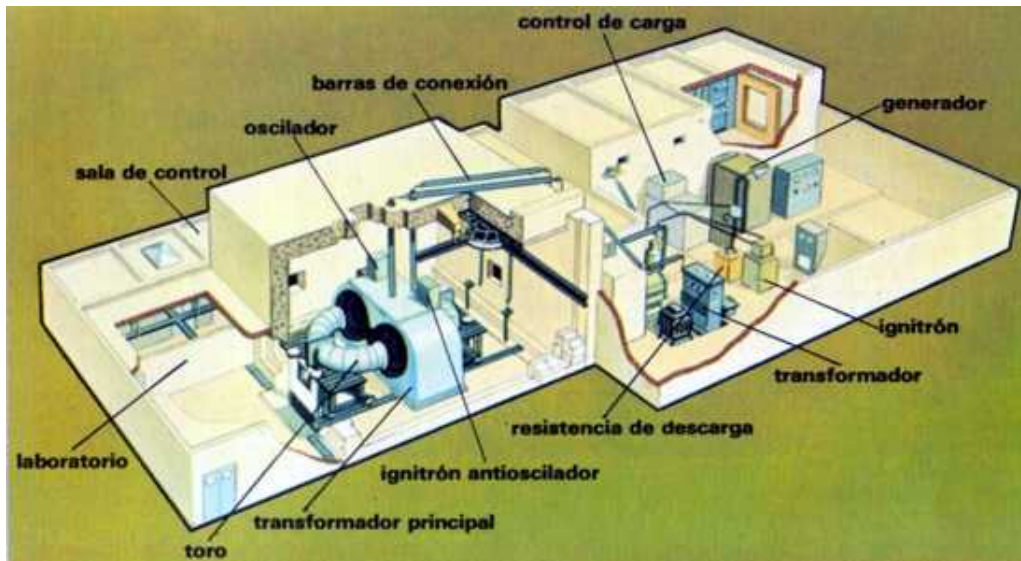
para el Sol y estrellas semejantes el mecanismo predominante está constituido por la siguiente reacción en cadena de protones:



*Esquema del reactor nuclear de Calder Hall (Escocia) de uranio natural moderado con grafito.*

En competencia con esa serie está el ciclo de Bethe, o ciclo del carbono y del nitrógeno, que parece tener una importancia mayor en estrellas más luminosas y de

temperaturas mayores que las del Sol (si bien la mayor importancia de un proceso no excluye al otro).



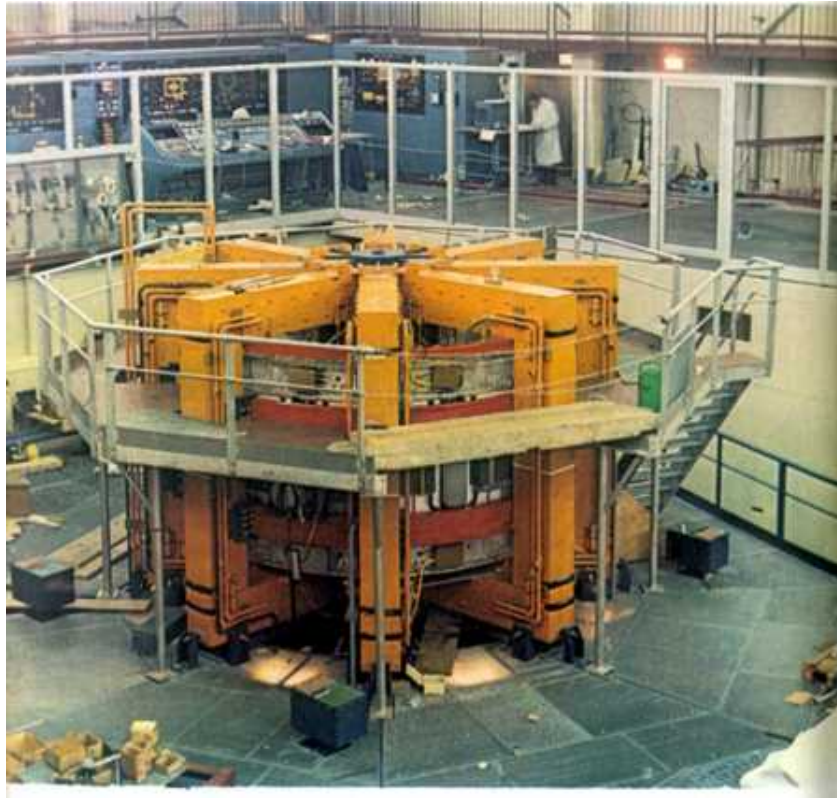
*En la actualidad están en desarrollo diversas instalaciones para la producción, control y estudio de las reacciones termonucleares. Esquema del ZETA (Gran Bretaña).*

El resultado final de las reacciones del ciclo de Bethe puede resumirse en la fusión de 4 protones, para formar una partícula  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ ), acompañada de la emisión de 2 positrones ( $\beta^+$ ).

## 7. Bombas H

Las bombas de hidrógeno son ingenios basados en la fusión de núcleos ligeros, generalmente de hidrógeno, o de sus isótopos pesados, como el deuterio y el tritio, o de litio. Su nombre se ha generalizado en la actualidad para armas de este tipo, aunque en su constitución no intervenga el hidrógeno. Para que se produzca la fusión es necesario que la temperatura de estos elementos alcance varios millones de grados, lo que se consigue utilizando como cebo una bomba atómica convencional de fisión. Su potencia explosiva es teóricamente limitada, puesto que depende únicamente del material fusionable utilizado; sin embargo, en la práctica, la explosión de la bomba A provoca la dispersión del material fusionable antes que haya reaccionado en su totalidad. Para limitar tal inconveniente, se ha desarrollado

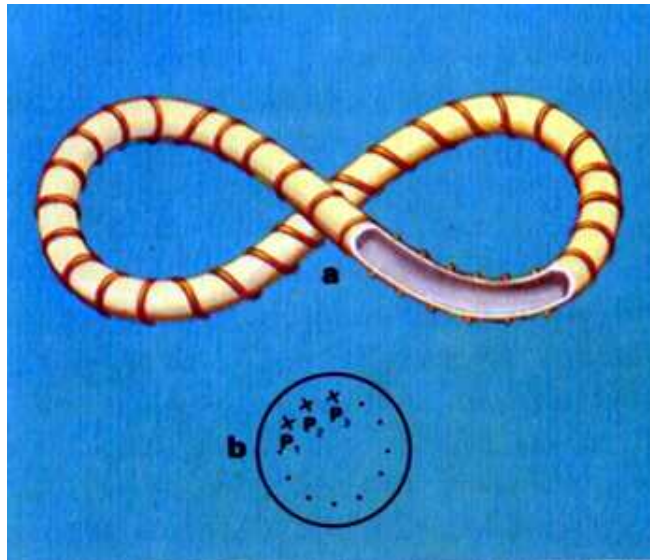
el procedimiento llamado fisión-fusión-fisión, consistente en rodear una bomba de hidrógeno de una capa de  $U^{238}$  que, al ser bombardeada por los neutrones rápidos producidos en la fisión, se escinde proporcionando nuevos neutrones así como la energía necesaria para completar el proceso de fusión.



*Instalaciones del reactor Tokomat (URSS).*

Una variante de este procedimiento consiste en recubrir la bomba con una capa de plomo, el cual, aunque no es fisible, tiene la ventaja de disminuir considerablemente el peso del dispositivo y contribuye asimismo a mejorar su poder. Finalmente, cabe realizar un recubrimiento de cobalto 59 (bomba de cobalto) que, por efecto de los neutrones emitidos, se transforma en un isótopo el cobalto, cuyo período de semidesintegración es de 5 años; la explosión de un dispositivo de este tipo dejaría recubierta la zona afectada por una capa de cobalto radiactivo que haría imposible la vida en la misma durante largos años. Las bombas termonucleares más potentes probadas hasta la fecha han alcanzado la potencia de 50 megatones.





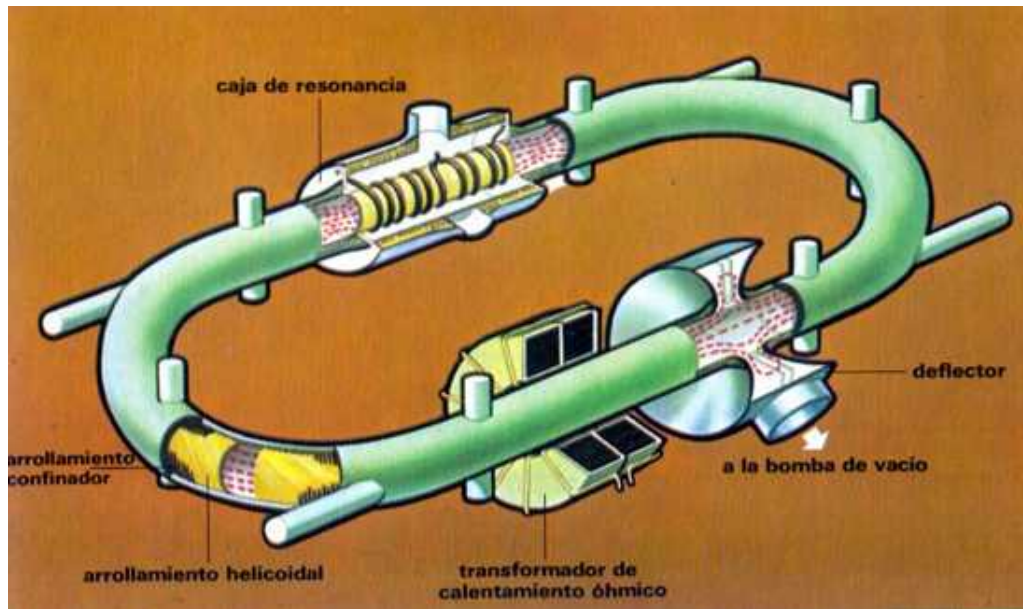
*En el Stellator, el confinamiento del plasma se logra mediante potentes campos magnéticos externos. Arriba: a) recinto en forma de "ocho" utilizado en algunos de estos aparatos; b) sección transversal del mismo.*

## 8. La bomba N

Después de más de 20 años de investigaciones secretas, los Estados Unidos han empezado recientemente a producir una nueva bomba ("Enhanced Radiation Warhead"), llamada bomba N, que ha sido objeto de controversias a nivel mundial. El arma, cuya principal utilidad consiste en matar a las personas sin destruir los edificios, considerada por ello como un arma "limpia", está constituida simplemente por una pequeña cabeza de hidrógeno. Básicamente es una bomba H muy pequeña, quizá con un kilotón de fuerza explosiva, mínima en comparación con las bombas H experimentadas con anterioridad. A unos 90 metros, la explosión apenas produciría daños, pero su mortal fusión de neutrones penetraría en edificios, búnkers, etc., matando a la mayor parte de soldados enemigos, en un radio de 1 km<sup>2</sup>.

## 9. Control de la fusión nuclear

El futuro de la aplicación pacífica de la energía nuclear reside en la reproducción, en forma lenta y controlada, de las reacciones que tienen lugar en el interior del Sol o que se producen en la explosión de una bomba H.



*Esquema de un Stellarator en forma de pista de carreras*

Las ventajas que presentarían los reactores nucleares de fusión sobre los actuales son indudables. Por una parte, los combustibles a utilizar, especialmente el deuterio, son prácticamente inagotables, y aunque el coste de su obtención sea muy elevado, la energía que potencialmente pueden producir los hace en realidad mucho más económicos que todos los empleados hasta la fecha; 1 g de deuterio puede dar un rendimiento equivalente a la combustión de 10.000 kg de carbón. Sin embargo, la faceta más seductora de estos ingenios reside en la posibilidad de extraer directamente energía eléctrica de la materia en fusión, sin necesidad de convertidores, en los que se producen siempre pérdidas y que complican de manera extraordinaria las instalaciones. Con todo, los problemas técnicos planteados son enormes. Para producir la fusión nuclear es necesario confinar en un recinto cierta cantidad de materia sometida a enormes presiones y a temperaturas del orden de millones de grados, es decir, reproducir a escala reducida las mismas circunstancias que se dan en el Sol. En estas condiciones, los átomos pierden prácticamente todos sus electrones y se obtiene una nube formada por núcleos atómicos y electrones que se mueven a enormes velocidades (plasma). Es necesario, además, que este plasma no entre en contacto con las paredes del recinto que lo contiene, puesto que no existe ningún material capaz de soportar tan elevadas temperaturas. Los distintos dispositivos construidos hasta la fecha se diferencian en la forma de

confinar el plasma y en el procedimiento seguido para elevar su temperatura; todos ellos tienen carácter experimental y de estudio de las propiedades del plasma. En algunos aparatos, como el ZETA (Harwell), el NRL (máquina del Naval Research Laboratory) y el Scilla (Los Álamos), el confinamiento del plasma se realiza mediante la acción del campo magnético creado por las corrientes eléctricas que se producen en él (auto constricción).



*El plasma puede ser confinado mediante el fenómeno de la constricción.*

*Movimiento*

*de la columna de plasma en un experimento realizado para investigar el fenómeno.*

En otros aparatos, como el DCX (*Oak Ridge National Laboratory*) y el OGRA (Instituto Kurchatov, Moscú), campos magnéticos especiales actúan a modo de espejos, reflejando las partículas del plasma incidentes y obligándolas a volver al interior. Finalmente en el Stellator (*Plasma Physics Research Institute*) y en el Tokomat (Kurchatov) el confinamiento, se logra por medio de campos magnéticos externos que actúan sobre un recinto cerrado. Las conclusiones derivadas del empleo de estos aparatos, que por ahora consumen más energía que la que producen, hacen pensar que un plazo de 10 años se habrá solucionado el problema de obtener electricidad directamente del plasma. El camino hacia su utilización industrial es más largo; muchos científicos consideran que habrá que esperar bastante para obtener en gran escala la energía producida en la fusión nuclear.

<b>Vocabulario</b>	
<b>Campo</b>	Región del espacio afectada por la perturbación creada por una distribución de masas, cargas eléctricas u otros agentes físicos. Los campos constituyen modelos elaborados para representar la acción de fuerzas entre cuerpos que no están en contacto.
<b>Campo eléctrico</b>	El creado por cargas eléctricas.
<b>Campo electromagnético</b>	Conjunto de campos eléctrico y magnético creados por una distribución de cargas eléctricas.
<b>Campo magnético</b>	El creado por imanes o por cargas eléctricas en movimiento.
<b>Carga eléctrica</b>	Cualidad de la materia responsable de las propiedades eléctricas de los cuerpos. Medida de la cantidad de electricidad que posee un cuerpo.
<b>Cátodo</b>	Polo negativo de un generador de electricidad o batería eléctrica.
<b>Condensador</b>	Sistema de dos conductores, llamados armaduras, en general de gran superficie, y que están separados por una sustancia aislante. Sirven para almacenar cargas eléctricas.
<b>Corona solar</b>	Aureola brillante que rodea el Sol; se hace visible durante los eclipses.
<b>Corpuscular</b>	Dícese de las teorías que consideran la materia como constituida por partículas independientes y perfectamente localizadas (corpúsculos), es decir, de naturaleza discontinua.
<b>Cortical</b>	Relativo o perteneciente a la corteza del átomo.
<b>Desintegración</b>	Transformación, espontánea o inducida, de un núcleo atómico, debida a la emisión de alguna partícula o a su escisión en diversos fragmentos.
<b>Electromagnético</b>	Dícese de las ondas o radiaciones de naturaleza análoga a la de la luz, constituidas por un sistema de campos eléctrico y magnético que pueden propagarse en el vacío.
<b>Elemento químico</b>	Sustancia que no puede descomponerse por procedimientos químicos en otras más sencillas. Están constituidos por átomos de una misma especie.

<b>Energía</b>	Causa capaz de transformarse en trabajo mecánico. Existen diversas formas de energía (mecánica, eléctrica, nuclear, etc.) que pueden transformarse unas en otras en presencia de materia; en ausencia de ésta, la energía sólo puede existir en forma de radiación.
<b>Espectro</b>	Resultado de la separación de los distintos componentes de la luz o de cualquier otra radiación.
<b>Fosforescencia</b>	Propiedad de emitir luz en la oscuridad durante un cierto tiempo que presentan determinados cuerpos, como el fósforo, cuando han sido iluminados natural o artificialmente.
<b>Hidrogenoide</b>	Dícese de los átomos e iones que tienen un solo electrón en su última órbita o nivel de energía.
<b>Ion</b>	Átomo o grupo de átomos cargados eléctricamente, bien por pérdida de uno o varios electrones, en cuyo caso su carga es positiva, bien por captación de los mismos, siendo entonces negativa su carga total.
<b>Ionización</b>	Transformación de un átomo o grupo de átomos en un ion por captación o pérdida de electrones.
<b>Kilotón</b>	Unidad de medida de la potencia de un ingenio nuclear; corresponde a la potencia desarrollada en la explosión de 1.000 toneladas de TNT.
<b>Megatón</b>	Unidad equivalente a 1.000 kilotonnes.
<b>Molécula</b>	Parte más pequeña de una sustancia que puede existir independientemente conservando las propiedades originales. Está constituida por uno o más átomos iguales o distintos.
<b>Neutro</b>	Dícese del cuerpo que no manifiesta propiedades eléctricas.
<b>Núclido</b>	Átomo o núcleo atómico de una especie concreta. Queda determinado por el número de protones y neutrones que contiene, así como por su estado energético.
<b>Órbita</b>	Trayectoria descrita por un cuerpo que se mueve alrededor de otro.
<b>Orbital</b>	Dícese de los electrones pertenecientes a la corteza del átomo.
<b>Protoplaneta</b>	Planeta recién formado.
<b>Radiación</b>	Emisión y difusión de energía a partir de una fuente o foco emisor. La radiación puede estar constituida por partículas materiales (radiaciones alfa, beta, etc.) o por ondas (radiación electromagnética).

<b>Radiactividad</b>	Propiedad que poseen determinados núcleos atómicos de desintegrarse espontáneamente emitiendo radiaciones.
<b>Radiactivo</b>	Dícese de los cuerpos o sustancias que presentan el fenómeno de la radiactividad.
<b>Reacción</b>	Acción recíproca entre dos o más cuerpos, de la cual resultan otro u otros diferentes de los primeros.
<b>Tensión superficial</b>	Acción de las fuerzas moleculares por la cual la capa exterior de los líquidos tiende a contener el volumen de éstos dentro de una superficie mínima.
<b>Transición</b>	Paso de un electrón de una órbita o nivel de energía del átomo a otro.
<b>Transmutación</b>	Conversión de un elemento químico en otro distinto debida a la desintegración del núcleo atómico.