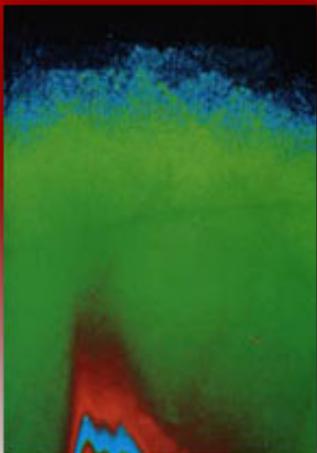


LAS RADIACIONES: RETO Y REALIDADES

Autor: JORGE RICKARDS CAMPBELL

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [PRÓLOGO](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)



© Fondo de Cultura Económica
Primera edición, 1986
Primera reimpresión, 1995
Segunda edición, 1997
ISBN 968-16-5268-1
Impreso en México

- [I. CÓMO SOMOS Y POR QUÉ SOMOS COMO SOMOS](#)
- [II. QUÉ ES LA RADIACIÓN](#)
- [III. CÓMO SABEMOS QUE ESTÁ ALLÍ](#)
- [IV. LOS RELOJES NUCLEARES](#)
- [V. ¿DE DÓNDE VIENE?](#)
- [VI. CUANTIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN](#)
- [VII. RADIACIÓN Y MEDIO AMBIENTE](#)
- [VIII. LA RADIACIÓN Y LOS SERES VIVOS](#)
- [IX. EFECTOS EN LOS MATERIALES](#)
- [X. RADIACIÓN Y ENERGÍA](#)
- [XI. LOS NUEVOS USOS](#)
- [XII. ¿HACIA DÓNDE VAMOS?](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)





COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías



la

ciencia/8

para todos

Primera edición (La Ciencia desde México), 1986

Primera reimpresión, 1995

Segunda edición (La Ciencia para Todos), 1997

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5268-1

Impreso en México



PRÓLOGO

La física es una ciencia exacta. Sin embargo, el estilo de un libro necesariamente está matizado por las experiencias del autor y su modo muy particular de ver las cosas. En este libro hay influencia de los laboratorios donde he trabajado, los maestros que me han enseñado, los libros que he leído y los colegas con quienes he hablado. He tratado de ser veraz en la presentación de hechos y realista al externar mis opiniones. La Universidad Nacional Autónoma de México es el ámbito desde el cual ha sido posible la realización de este libro. En treinta años me ha proporcionado estabilidad y ambiente académico. Fernando Alba Andrade y Marcos Mazari M. encabezan la lista de distinguidos maestros que me ayudaron a aprender ciencia. De antemano puedo decir que la lista de colegas es incompleta, pero agradezco el apoyo que me brindaron con sus comentarios, discusiones y material fotográfico Ángel Dacal, María Esther Ortiz, Vinicio Serment, Matías Moreno, Ricardo Camaras y Guillermo Espinoza. Alfredo Sánchez trabajó la mayoría de las fotografías. Finalmente, agradezco a mi esposa María Elena su paciencia durante un año de fines de semana en casa.



INTRODUCCIÓN

¿Qué está en todos lados, pero no lo podemos ver? ¿Qué cosa nos puede atravesar de un lado a otro sin que nos demos cuenta? ¿Qué nos puede curar, pero al mismo tiempo, nos puede matar? ¿Qué nos llega desde millones de años luz de distancia? ¿Qué puede proporcionar energía suficiente para encender un millón de focos? ¿Qué requiere de un aparato de 60 km. de tamaño para producirlo? ¿Qué nos aporta datos sobre lo más profundo de la materia? ¿Qué nos puede ayudar a identificar cada uno de los átomos de una substancia? ¿Qué puede mostrar nuestros huesos sin quitarnos la piel? ¿Qué nos permite guardar alimento fresco sin refrigerar? ¿Qué mantiene encendido al Sol y las otras estrellas? ¿Qué puede medir objetos de menos de un millonésimo de millonésimo de centímetro?

Aunque parezca extraordinario, hay una respuesta única a todas las preguntas: la radiación ionizante.

Como seres integrantes de la naturaleza, estamos perfectamente adaptados a la radiación ambiental. Sin embargo, nos parece una cosa misteriosa porque no siempre comprendemos cómo funciona. ¿Cuándo es una amenaza, cuándo la podemos tolerar? ¿Debemos rechazar, por su peligrosidad, todo lo que implica radiación? Éstas y muchas otras preguntas han surgido y se han contestado total o parcialmente en los cien años que la conocemos.

Se le han dedicado esfuerzos importantes en la mayoría de los países, esfuerzos de investigación básica, orientada y aplicada, de desarrollo tecnológico y de uso industrial. En consecuencia, se cuenta con un enorme acervo de información, el cual, bien empleado, puede redundar en un gran beneficio. De hecho la radiación ya participa en nuestra vida cotidiana de maneras insospechadas, amén de habernos provisto de importantes datos sobre la estructura de la materia y las leyes de la naturaleza.

Aunque su entendimiento a fondo y la habilidad para aprovecharla requieren por lo menos de una carrera profesional, no hay razón para que no se puedan conocer ampliamente algunas de sus características primordiales. Ésta es mi razón fundamental para escribir este libro, esperando, por un lado, disipar dudas o aclarar conceptos erróneos que fácilmente surgen en nuestro derredor y, por otro lado, tal vez despertar en algunos la curiosidad sobre un importante fenómeno, curiosidad que puede conducir, como en mi caso, a una trayectoria de investigación llena de sorpresas y satisfacciones.

En treinta años de trabajo en física nuclear, aplicación técnicas nucleares y física de superficies, he tenido que ver con radiaciones de todos tipos: partículas alfa y beta, rayos gamma, protones, neutrones, iones pesados, electrones y rayos X. Las he hecho incidir en metales puros y aleaciones, en películas delgadas, en polvos, en Cristales perfectos, en elementos y compuestos, en superficies limpias y erosionadas, en semiconductores, en plásticos, en vidrios, en concreto y madera, en telas, en alimentos, en muestras arqueológicas y geológicas, en monedas y hasta en el extensible de mi reloj. Con ellas he medido niveles energéticos de núcleos, he visto la estructura cristalina de sólidos, he medido películas más delgadas que las que se pueden ver en cualquier microscopio, he localizado impurezas dentro de sólidos, he creado nuevos materiales, he limpiado superficies..., en fin, he hecho toda una gama de experimentos, en cada uno de los cuales me he encontrado con novedades. La radiación, sin ser misteriosa, tiene un atractivo muy especial por sus características.

Veamos la radiación, definémosla, midámosla, apliquémosla y entendámosla.





I. CÓMO SOMOS Y POR QUÉ SOMOS COMO SOMOS

LA RADIACIÓN ionizante es atómica o subatómica. Proviene principalmente de los átomos y de sus componentes. También sus efectos se dejan sentir en los átomos y en sus partes. Por eso no es posible hablar de radiación sin antes haber visto aunque sea de manera general cómo es la estructura de la materia y cómo se comporta en el nivel más elemental. Habrá que aclarar que la descripción que sigue sólo pretende ser un punto de partida para analizar la radiación. Una descripción pictórica puede ser útil para visualizar los fenómenos, aun cuando no se apegue estrictamente al entendimiento actual de la física. El que quiera profundizar en el tema podrá consultar los abundantes libros especializados de física y química para estudiar en detalle el asunto específico que le interese. Sin embargo, las leyes de la naturaleza se siguen investigando en la actualidad; por eso, ninguna explicación será completa. El verdaderamente curioso podrá dedicar la vida entera a su investigación, y probablemente nunca llegue a comprenderlo en su totalidad. Baste entonces con que hagamos una descripción somera, inevitablemente incompleta, de lo que hoy en día se sabe de la estructura de la materia, conforme a lo que necesitamos, para abordar luego el tema de la radiación.

A lo largo de la explicación surgirán términos tal vez nuevos para el lector, y es posible que éstos se vayan sumando hasta volverse una maraña confusa. Por esta razón, a este capítulo se le ha dado una forma escueta, casi como de glosario, sin entrar en explicaciones que no sean pertinentes para el posterior desarrollo del libro. Los términos más importantes aparecen en *cursivas* para que el lector pueda después fácilmente recurrir a sus definiciones.

Comencemos con el *átomo*, originalmente pensado como indivisible, y que es la unidad más pequeña de un elemento que puede existir sola y conservar las propiedades químicas del elemento. Los átomos son extremadamente pequeños: miden aproximadamente 10^{-8} cm, y pesan alrededor de 10^{-24} g. Es claro entonces que cualquier objeto de uso común contiene un enorme número de ellos: una moneda de un gramo tiene cerca de 10^{24} .

Para el lector que no esté familiarizado con la notación exponencial, diremos que el número 10 elevado a un exponente significa el número 1 seguido de tantos ceros como indica el exponente. Por ejemplo, un millón (1 000 000) se puede escribir como 10^6 ; mil (1 000) como 10^3 . Cinco millones sería 5×10^6 ; ocho mil, 8×10^3 . Esta notación nos permite escribir en forma abreviada cantidades tan grandes como el número de átomos en una moneda, 10^{24} , con poco gasto de papel. Un exponente negativo como en 10^{-8} cm, el tamaño de los átomos, significa la fracción $1/10^8$, o sea $1/100\,000\,000$ de centímetro. Usaremos esta notación frecuentemente.

Regresando a los átomos, cada uno de ellos está formado por un *núcleo* y varios *electrones*; el número de estos puede llegar a sobrepasar los cien. Casi todo el peso, o más correctamente la masa, del átomo está concentrado en el núcleo, en el centro, por lo que la posición del núcleo determina la posición del átomo. El núcleo tiene carga eléctrica positiva, y los electrones negativa. Es la fuerza eléctrica (las cargas opuestas se atraen) la que mantiene a los átomos como unidad; y siendo más ligeros los electrones, éstos giran alrededor del núcleo (véase la Fig. 1).

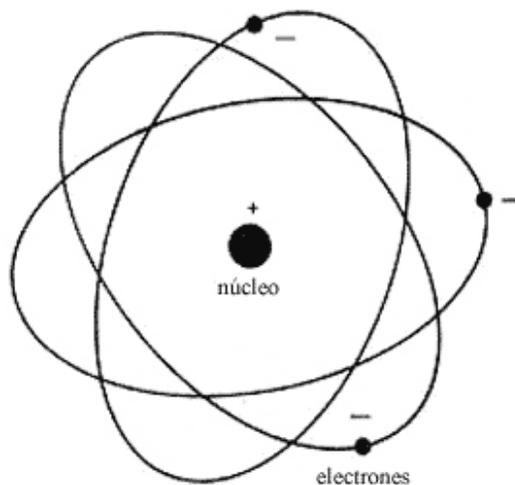


Figura 1. Una concepción del átomo.

Los núcleos están formados por protones y neutrones, juntos como en un racimo de uvas. Los protones tienen carga positiva; el número de protones (Z) en un núcleo determina de qué *elemento* químico se trata. Los *neutrones* no tienen carga eléctrica; su presencia en los núcleos en número N contribuye a la masa nuclear. Protones y neutrones se llaman genéricamente *nucleones*; el número de nucleones (A) en un núcleo es igual a la suma del número de protones (Z) y el

número de neutrones (N): $A=Z+N$.

Los núcleos atraen eléctricamente a cuantos electrones se requieran para balancear su carga. Ahora bien: las cargas de protones y electrones son de igual magnitud, pero de signo opuesto, así que un átomo neutro tiene tantos electrones como protones.

Cuadro 1. Los elementos de la naturaleza.

Elemento	Simbolo	Z	Elemento	Simbolo	Z	Elemento	Simbolo	Z	Elemento	Simbolo	Z	Elemento	Simbolo	Z
Hidrógeno	H	1	Titanio	Ti	22	Tecnecio	Tc	43	Gadolinio	Gd	64	Astatinio	At	85
Helio	He	2	Vanadio	V	23	Rutenio	Ru	44	Terbio	Tb	65	Radón	Rn	86
Litio	Li	3	Cromo	Cr	24	Rodio	Rh	45	Disproso	Dy	66	Francio	Fr	87
Berilio	Be	4	Manganeso	Mn	25	Paladio	Pd	46	Holmio	Ho	67	Radio	Ra	88
Boro	B	5	Fierro	Fe	26	Plata	Ag	47	Erbio	Er	68	Actinio	Ac	89
Carbono	C	6	Cobalto	Co	27	Cadmio	Cd	48	Tulio	Tm	69	Torio	Th	90
Nitrógeno	N	7	Niquel	Ni	28	Indio	In	49	Iterbio	Yb	70	Protactinio	Pa	91
Oxígeno	O	8	Cobre	Cu	29	Estaño	Sn	50	Lutecio	Lu	71	Uranio	U	92
Fluoro	F	9	Cinc	Zn	30	Antimonio	Sb	51	Hafnio	Hf	72	Neptunio	Np	93
Neón	Ne	10	Galio	Ga	31	Telurio	Te	52	Tantalio	Ta	73	Plutonio	Pu	94
Sodio	Na	11	Germanio	Ge	32	Iodo	I	53	Wolframio	W	74	Americio	Am	95
Magnesio	Mg	12	Arsénico	As	33	Xenon	Xe	54	Renio	Re	75	Curio	Cm	96
Aluminio	Al	13	Selenio	Se	34	Cesio	Cs	55	Osmio	Os	76	Berkelio	Bk	97
Silicio	Si	14	Bromo	Br	35	Bario	Ba	56	Iridio	Ir	77	Californio	Cf	98
Fósforo	P	15	Kriptón	Kr	36	Lantano	La	57	Platino	Pt	78	Einsteinio	Es	99
Azufre	S	16	Rubidio	Rb	37	Cerio	Ce	58	Oro	Au	79	Fermio	Fm	100
Cloro	Cl	17	Estroncio	Sr	38	Praseodimio	Pr	59	Mercurio	Hg	80	Mendelevio	Mv	101
Argón	Ar	18	Itrio	Y	39	Neodimio	Nd	60	Talio	Tl	81	Nobelio	No	102
Potasio	K	19	Circonio	Zr	40	Promecio	Pm	61	Plomo	Pb	82	Lawrencio	Lw	103
Calcio	Ca	20	Niobio	Nb	41	Samario	Sa	62	Bismuto	Bi	83			
Escandio	Sc	21	Molibdeno	Mo	42	Europio	Eu	63	Polonio	Po	84			

Se llama *número atómico (Z)* al número de protones en el núcleo o al número de electrones en el átomo neutro. Nos identifica al elemento y sus propiedades químicas. El átomo del elemento más sencillo, el hidrógeno ($Z = 1$), consta de un protón y un electrón. En el siguiente, el helio ($Z = 2$), tiene el núcleo 2 protones y 2 neutrones (4 nucleones) y, por lo tanto, 2 electrones. Así sucesivamente se va conformando la tabla de los elementos, en donde Z va desde 1 hasta más de 100 (véase el cuadro 1).

Las propiedades químicas de los elementos, o sea, su capacidad de unir sus átomos a otros compartiendo electrones, están determinadas por la *estructura de capas* de los electrones en los átomos (Fig. 2). La primera capa, llamada K, la más cercana al núcleo, admite sólo dos electrones, por lo que se dice que el helio ($Z = 2$) es de capa cerrada y no tiene actividad química. El siguiente elemento, el litio ($Z = 3$), tiene la capa K llena y el electrón adicional está en la capa L. Este electrón, más alejado del núcleo y más suelto, es fácilmente compartido con otros átomos, lo cual da lugar a reacciones químicas. La capa L se llena con 8 electrones, que sumados a los 2 de la capa K nos dan un total de $Z = 10$, el neón, otro elemento inerte. No viene al caso aquí hacer un tratado de química, así que baste con indicar en el cuadro 2 las capas más importantes y cómo están distribuidos los electrones en los elementos más ligeros.

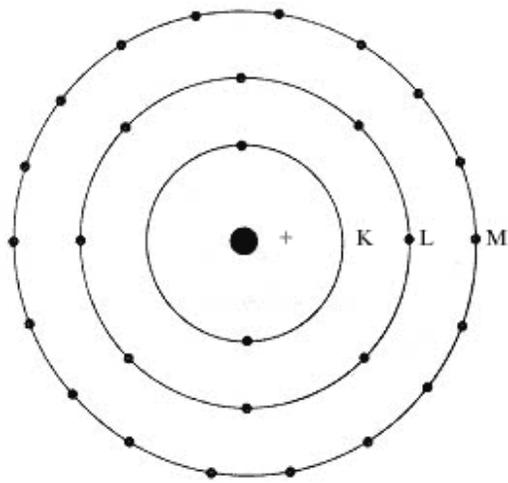


Figura 2. Estructura de las tres primeras capas electrónicas de los átomos.
Cuadro 2. Configuración de las capas electrónicas de algunos elementos.

elemento	Z	número de electrones en capa K	número de electrones en capa L	número de electrones en capa M
H	1	1		
He	2	2		
Li	3	2	1	
Be	4	2	2	
B	5	2	3	
C	6	2	4	
N	7	2	5	
O	8	2	6	
F	9	2	7	
Ne	10	2	8	
Na	11	2	8	1
Mg	12	2	8	2
Al	13	2	8	3
Si	14	2	8	4

Los electrones que se encuentran más cercanos al núcleo (por ejemplo los de la capa K) están, por esta cercanía, fuertemente ligados a él. En términos técnicos, decimos que tienen una gran energía de amarre, lo que equivale a decir que para separarlos necesitamos mucha energía. La *ionización* es la acción de separar completamente a un electrón del resto del átomo; requiere energía. La unidad de energía que se usa en estos casos es el *electrón-volt (eV)*, que es la energía cinética que adquiere un electrón al atravesar por una diferencia de voltaje de 1 volt. Por ejemplo, la energía de amarre del electrón en el hidrógeno es de 13.6 eV; para ionizar el átomo de hidrógeno debemos impartirle esta energía o más. En elementos más pesados (Z mayor) los electrones de la capa K tienen energías de amarre mayores. El hierro tiene 7.1×10^3 eV, o sea 7.1 keV (kiloelectrón-volts); el uranio, 115.6 keV.

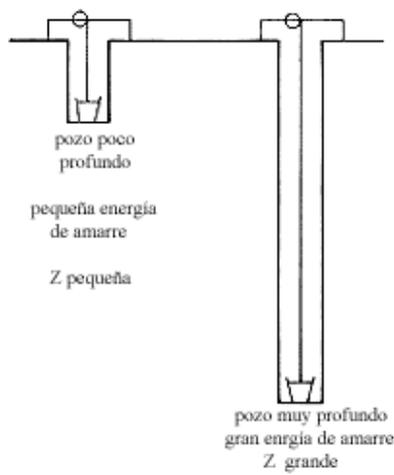


Figura 3. Podemos imaginarnos a los electrones muy amarrados como si estuvieran en un pozo muy profundo, un electrón suelto estaría en un pozo poco profundo.

A veces se hace la analogía de una cubeta en un pozo. Si la cubeta está a gran profundidad cuesta mucho trabajo sacarla del pozo; si el electrón tiene gran energía de amarre se necesita mucha energía para ionizar. Cuanto más pesado es el elemento, la atracción eléctrica de núcleo y electrones es mayor, por lo que el pozo es más profundo. La figura 3 muestra este símil.

La acción de ionizar un átomo rompe su equilibrio eléctrico. Queda un electrón suelto por un lado y por otro un átomo al que le falta un electrón y por lo tanto tiene carga neta positiva; se le llama *ion positivo*. De inmediato se puede ver que este desequilibrio eléctrico afectará las uniones con otros átomos, o sea, las propiedades químicas.

La esencia de la que hemos llamado radiación ionizante es precisamente que tiene la capacidad de ionizar la materia. Para ionizar, la radiación debe llevar energía y poder transmitirla a la materia. Los principales cambios que se producen en la materia son en sus propiedades químicas.

La presencia de capas se debe a que en un átomo dado sólo pueden existir ciertas energías de amarre; cualquier otra es imposible. Éste es un resultado de la teoría cuántica de los átomos. Se dice que la energía está cuantizada, y se habla de *niveles de energía*. En el pozo del cual hablamos, equivale a que la cubeta sólo puede estar en ciertos peldaños, y el cambio de energía de amarre sólo puede hacerse de un peldaño a otro bruscamente. Cada elemento tiene su propia estructura de niveles o peldaños, por lo que identificar los niveles de energía equivale a identificar el elemento.

En un átomo dado los electrones pueden brincar de un nivel a otro. Si el nivel original es más bajo que el final, se requiere energía para lograr la transición. El paso de un nivel bajo a uno más alto se llama *excitación* electrónica. Inversamente, el paso de un nivel alto a uno más bajo se llama *desexcitación*, y en este proceso sobra energía. La figura 4 muestra esquemáticamente los niveles de energía de un átomo y algunas transiciones tanto de excitación como de desexcitación. La energía necesaria para excitar (ó para ionizar) un átomo se obtiene generalmente de absorber radiación; la energía que sobra cuando se desexcita se va en forma de radiación u otros mecanismos semejantes. Esta radiación que emiten los átomos puede ser infrarroja, visible, ultravioleta o de rayos X.

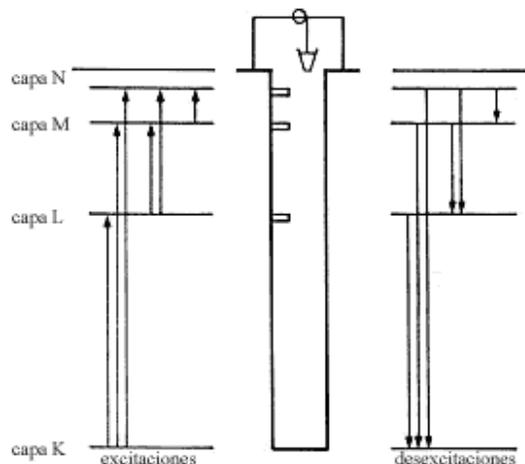


Figura 4. Las transiciones de un nivel atómico a otro son como pasos bruscos entre peldaños del pozo.

Habiendo visto cómo se acomodan y reacomodan los electrones en los átomos, regresemos ahora al núcleo, con sus Z protones y N neutrones. Si el radio de un átomo es como de 10^{-8} cm, el de un núcleo es de 10^{-12} cm, o sea 10 000 veces más pequeño. Esto equivale a que el volumen que ocupa un núcleo es 10^{12} veces más pequeño que el que ocupa un átomo. La fuerza que mantiene unidos a los protones y neutrones en el núcleo no es eléctrica, pues por un lado los neutrones no tienen carga, y por el otro los protones más bien se rechazan entre sí por tener todas cargas iguales (positivas). Esta nueva fuerza se llama fuerza nuclear, y es por lo menos suficientemente intensa para contrarrestar la repulsión eléctrica entre protones.

El número de protones (Z) y de neutrones (N) es variable en los distintos núcleos. Para empezar, Z y N suelen ser parecidos, especialmente en los elementos ligeros; en los más pesados N es mayor que Z . Esto se puede ver en la figura 5, que es un ordenamiento, respecto de Z y N , de los núcleos ligeros hasta el oxígeno. En la escala vertical aumenta Z , así que cada renglón corresponde a un elemento. En la escala horizontal está N . Cada cuadro corresponde a un tipo de núcleo, con sus correspondientes Z y N . El número en cada cuadro es el número total de nucleones, $A = Z + N$. La notación que se usa internacionalmente para identificar los núcleos es la siguiente: por un lado se usa el símbolo químico que identifica al elemento y determina su número atómico Z (el renglón en la Fig. 5); además, se pone un número pequeño en la esquina superior izquierda, que es el número A . Por ejemplo, el carbono más abundante es el ^{12}C , que corresponde a $Z = 6$ y $N = A - Z = 6$. También se encuentra en la naturaleza el ^{13}C , con $Z = 6$ y $N = 7$.

En la misma figura 5 se puede ver que a cada elemento (renglón) corresponden varios cuadros. Cada uno de éstos se llama *isótopo*, y cada elemento puede tener varios isótopos. Por ejemplo, el carbono tiene varios isótopos conocidos, del 9 al 18. De todos éstos, únicamente el ^{12}C , el ^{13}C y el ^{14}C existen en la naturaleza; los demás sólo se conocen por haberse creado artificialmente en los laboratorios. La generalidad de los isótopos naturales, que aparecen con un círculo en la figura 5, son estables; es decir, una vez que se produjeron al formarse la Tierra, no se han transformado en otro elemento. Existen en proporciones bien definidas; por ejemplo, de todos los núcleos de carbono que hay en la Tierra, 98.89% son ^{12}C y 1.11% ^{13}C .

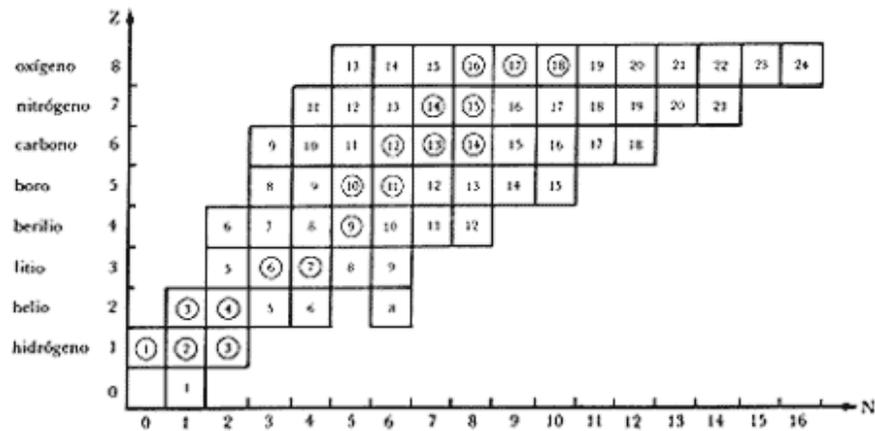


Figura 5. Tabla de los isótopos de los elementos ligeros. Cada renglón corresponde a un elemento. El número de cada cuadro es el número total de nucleones A . Los círculos indican isótopos naturales.

En cambio, los isótopos que no tienen círculo son inestables o *radiactivos*, lo cual significa que con cierta rapidez sufren cambios, siempre con emisión de radiaciones. Éstos no se encuentran en la naturaleza porque de haberse formado alguna vez, rápidamente hubieran decaído y desaparecido. Por eso sólo se conocen producidos artificialmente, en aceleradores o en reactores nucleares. De hecho, se conocen más isótopos artificiales: unos 1 850, contra 320 naturales.

El ^{14}C merece una mención especial; es natural, pero a la vez decae. Lo que sucede es que está en constante producción a causa de la radiación cósmica que nos llega; pero también decae, de manera que se equilibran su creación y su desaparición, manteniéndose siempre en la Tierra una pequeñísima cantidad. Lo mismo sucede con el tritio, que es el isótopo pesado del hidrógeno, el ^3H . Por otro lado hay algunos isótopos que se formaron con la Tierra hace miles de millones de años, pero decaen tan lentamente que todavía están con nosotros. Ejemplos son el ^{40}K y los isótopos 234, 235 y 238 del uranio.

Podemos preguntarnos ahora qué sucede cuando un núcleo radiactivo decae. No puede simplemente desaparecer, pues tiene masa y carga eléctrica que no se pueden destruir. Lo que pasa es que se transforma en otro núcleo al emitir partículas alfa o beta, o rayos gamma.

Veamos la mecánica del *decaimiento alfa* (α) con un ejemplo conocido, el del ^{235}U . Este isótopo tiene la particularidad de que fácilmente puede emitir partículas alfa, y al mismo tiempo se transforma en un nuevo núcleo. La partícula α está formada de dos protones y dos neutrones, como un núcleo de ^4He ; entonces el nuevo isótopo que queda después de la

emisión está disminuido en este número de partículas. Se representa como sigue: $^{235}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ^{231}\text{Th}$. La partícula α es despedida con energía de algunos Mev (1 Mev es 106 eV), energía que proviene de la transformación de masa en energía, según la conocida fórmula de Einstein: $E = mc^2$. Aquí E es la energía con que sale la partícula α , m es la masa que sobró entre el isótopo original (^{235}U) y los fragmentos finales ($^{231}\text{Th} + \alpha$), y c^2 es el cuadrado de la velocidad de la luz. Nótese que el proceso sólo puede suceder si sobra masa (energía). Además constituye un a verdadera transmutación de elementos.

El segundo tipo de decaimiento, el *decaimiento beta* (β), implica la emisión de una partícula β , que es un electrón pero que puede tener carga positiva o negativa. Como la masa del electrón es 1 840 veces más pequeña que la de los nucleones, la emisión β no implica cambio en A. Sin embargo, Z sí cambia. Si un núcleo emite una beta negativa (β^-), perder una carga negativa implica ganar una positiva y su Z aumenta. En cambio, si emite una beta positiva o *positrón* (β^+) disminuye

su Z. Un ejemplo es el ^{60}Co , que se usa ampliamente para irradiar $^{60}\text{Co} \xrightarrow{\beta^-} \text{Ni}$. El decaimiento β siempre va

acompañado de la emisión de una nueva partícula, el *neutrino*, que no tiene carga ni masa, pero que sí comparte la energía sobrante con la β .

El decaimiento *gamma* (γ) es un mecanismo que tienen los núcleos de expulsar energía cuando sobra ésta después de un decaimiento α o β . Esta expulsión es en forma de un *fotón*, que es la unidad de radiación electromagnética, como la luz, los rayos ultravioleta e infrarrojos y los rayos X. Al igual que en el átomo, en el núcleo existen niveles de energía. La desexcitación de un nivel alto a un nivel bajo en este caso va acompañada de la emisión de un rayo γ .

Muy recientemente se han encontrado pruebas de una nueva emisión radiactiva natural. El radio ^{223}Ra emite partículas de ^{14}C , perdiendo en el proceso 6 protones y 8 neutrones en forma de racimo. Esta radiactividad nueva es muy rara; se necesitó un experimento que duró 600 días para observarla.

Definitivamente el decaimiento más violento es la *fisión* nuclear, en que un núcleo se divide en dos partes casi iguales. Los dos fragmentos salen despedidos con gran velocidad. Estos procesos son también muy raros en la naturaleza, pero pueden ser inducidos en el laboratorio. Los fragmentos casi siempre son núcleos inestables que a su vez luego decaen por emisiones β y γ . Además de los dos fragmentos de fisión, salen 2 o 3 neutrones.

Aparte de los decaimientos nucleares que suceden espontáneamente en la naturaleza, el hombre se las ha ingeniado para inducir artificialmente transformaciones de unos núcleos en otros, mediante *reacciones nucleares*. En este caso se lanza un proyectil sobre un núcleo y se observan los núcleos que salen de esa unión. Por ejemplo, en $^{18}\text{O} + \text{p} \rightarrow \alpha + ^{15}\text{N}$ se lanza un protón energético sobre un núcleo de ^{18}O y se observa que el producto de esta reacción es un ^{15}N y una partícula α . Las reacciones nucleares han sido la herramienta más poderosa para estudiar la física de los núcleos.

A medida que se han perfeccionado las técnicas para la investigación nuclear, se han descubierto muchas partículas más, que sólo mencionaremos de paso, pues si bien son fundamentales en el entendimiento de la estructura de la materia, para nuestro objetivo desempeñan un papel secundario. Así, tenemos los *mesones* μ o *muón*, π o *pión*, **K** o *kaón*, y η o *eta*, todos de masa intermedia entre el electrón y el protón. Más pesados que el protón y el neutrón son los *hiperones* Λ , Σ , Ξ , Ω (lambda, sigma, xi y omega). Por otro lado, se sabe ahora que los nucleones están formados cada uno por tres *cuarks*.

Habiendo visto las partes del átomo y, a su vez, del núcleo e incluso de los nucleones, vayamos ahora en la dirección opuesta: cómo se agregan los átomos para formar los materiales. La forma más elemental en que se unen los átomos es por parejas, como, por ejemplo, el oxígeno, en que dos átomos se unen, compartiendo electrones, para formar una *molécula*. En el agua la molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, H_2O , que es la unidad más pequeña de este *compuesto* químico que se puede encontrar. En virtud de los *enlaces* químicos, las moléculas pueden contener hasta muchos miles de átomos, como en el caso de los *polímeros*, que consisten en gran número de repeticiones de una unidad básica, en forma de cadenas, las cuales a su vez pueden entrelazarse, unirse y trenzarse. La materia orgánica está formada por estas cadenas, en que el eslabón principal es el átomo de carbono.

La mayoría de las substancias inorgánicas están formadas por apilamientos regulares de átomos llamados *cristales*, en que los átomos se acomodan guardando entre sí una posición que se repite en todas direcciones, como si estuviesen en los vértices de la estructura de acero de un gran edificio. Hay 14 diferentes tipos de estructura en que se pueden acomodar. Esta regularidad explica por qué en los diamantes, por ejemplo, o en los granos de arena, se notan facetas bien definidas.

Es de notarse que todas las propiedades macroscópicas, y por lo tanto las posibilidades de uso de los materiales, están determinadas por las estructuras que hemos mencionado, tanto atómicas y subatómicas como multiatómicas. Peso, color, estabilidad dimensional, conductividad eléctrica, dureza, elasticidad, densidad, fosforescencia, magnetización, reactividad química, brillo, radiactividad, porosidad, transparencia y muchas características más: todas vienen a final de cuentas de la estructura. Una vez comprendido cómo somos y por qué somos así, vayamos ahora a lo que nos trae aquí: la radiación.



II. QUÉ ES LA RADIACIÓN

LA NATURALEZA está en un continuo vaivén. Unos cambios son muy notables y hasta provocados por nosotros, como el quemar un trozo de madera, que no sólo produce calor y posibles quemaduras, sino que transforma la materia en nuevas sustancias, algunas volátiles como el bióxido de carbono y otras sólidas como las cenizas. Otros cambios son tan lentos que con nuestra reducida escala de tiempo tendemos a olvidar que suceden; por ejemplo, la erosión producida por el viento y el agua, o la evolución de las especies vivas, o la formación de las cordilleras y el movimiento de los continentes. Olvidamos también que la misma presencia de los elementos en la corteza terrestre tuvo que haberse originado por la unión de unos núcleos con otros para formar más complicados, y que este proceso se debió a reacciones nucleares en las que participó directamente la radiación. En la actualidad, en la corteza terrestre los núcleos ya no se mueven, así que no pueden acercarse unos a otros para fundirse; pero en el Sol, por ejemplo, el proceso está muy activo. El hecho es que ese intercambio de energía y de materia que implica la radiación ha desempeñado un papel importante en la evolución del universo.

La característica básica de la radiación ionizante es que requiere de energía para producir la ionización, y esa energía debe estar concentrada en espacios muy pequeños para poder transmitirse a los electrones atómicos. Una vez ionizados los átomos, pueden recombinarse o formar nuevos compuestos químicos, cuyo cambio puede ser permanente o de gran duración.

Veamos como ejemplo una partícula α emitida por un núcleo de ^{235}U . Como sabemos, la partícula α es muy pequeña (del tamaño de los núcleos). Por otro lado, su energía es de 4.4 MeV, la cual alcanza para ionizar a muchos de los átomos a que se acerca, en virtud de que su carga eléctrica arranca a los electrones de su lugar. Por lo tanto, califica para llamarla radiación ionizante. En la figura 6 se representa una partícula α pasando cerca de átomos y produciendo ionización.

Por otro lado, consideremos las ondas de transmisión de la radio o televisión. Éstas contienen poca energía y están distribuidas en grandes espacios. No pueden ionizar la materia, sino cuando mucho provocar movimientos colectivos de los electrones del material, sin cambios permanentes. No califican como radiación ionizante.

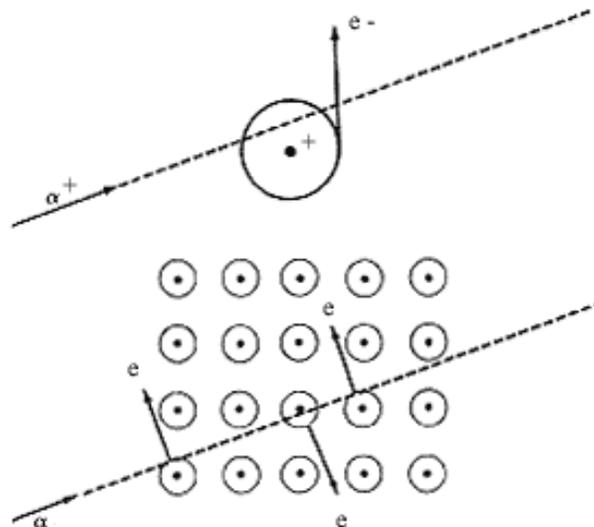


Figura 6. Esquema de la ionización que produce una partícula α en un átomo aislado y en un agregado de átomos. La ionización es el efecto más importante que produce la radiación.

Tanto las partículas α como las β y los rayos γ reúnen los requisitos. Sus energías, al provenir de los

núcleos, también son del orden de los MeV, suficiente para ionizar. Las β^- , al tener la misma carga que los electrones atómicos, los expulsan al pasar por el átomo; y las β^+ , siendo de carga opuesta, los arrancan. Por su lado, los rayos γ , aunque son ondas electromagnéticas, pueden transmitir toda o parte de su energía a un electrón.

Además de las radiaciones tradicionales, α , β y γ , hay muchas otras, naturales o artificiales. Podemos mencionar, parecidos a las partículas α por tener gran masa y carga positiva, a los protones, a otros iones pesados y a los productos de fisión. Se puede producir artificialmente un haz de radiación de protones en un acelerador de partículas ionizando hidrógeno y acelerándolo hasta que alcance un voltaje de unos millones de volts. Estos protones son radiación ionizante, y además se pueden tener en mucho mayor cantidad que las partículas α naturales. En un acelerador de alto voltaje como el mencionado es posible acelerar cualquier átomo ionizado, así que actualmente pueden hacerse experimentos con haces de hierro, de arsénico, de nitrógeno, o cualquier otro elemento, y todos califican como radiación ionizante. Finalmente, en este grupo podemos incluir a los productos de fisión, o sea, a los dos fragmentos grandes en que se rompe un núcleo de uranio al fisionarse. Los dos productos salen despedidos con gran energía, así que califican como los demás iones pesados, los protones y las partículas α .

Los electrones energéticos califican al igual que las partículas β . Son emitidos si uno pasa corriente eléctrica por un filamento, y si luego se les aplica un alto voltaje, pueden adquirir la energía requerida. Se pueden producir en grandes cantidades en aceleradores. El brillo de la pantalla de televisión se debe a la ionización que produce el haz de electrones del cinescopio, los cuales evidentemente califican.

Los rayos X, que son ondas electromagnéticas como los rayos γ , también califican. Aunque su energía en general es menor que la de los rayos γ , es suficiente para ionizar. Se producen al chocar un haz de electrones con un material pesado, pues ionizan las capas internas de los átomos, que al recombinarse emiten rayos X. También se producen rayos X al frenarse bruscamente una partícula cargada veloz.

El espectro de ondas electromagnéticas incluye, además de los rayos X y γ , a la luz ultravioleta y a la luz visible. Estas ondas contienen menos energía y están menos localizadas, así que en general no se incluyen en la radiación ionizante, aunque algunos de sus efectos pueden ser parecidos.

Los neutrones también son considerados como radiación ionizante, aunque uno podría preguntarse cómo se produce la ionización si el neutrón sin carga no puede ni empujar ni jalar a los electrones para ionizar. El hecho es que los neutrones no pueden ionizar directamente a los átomos, sino que su efecto es secundario, pues transmiten su energía a otros agentes que a su vez se encargan de ionizar. Por ejemplo, un neutrón proveniente de una fisión —que puede tener energía de varios MeV— puede ser dispersado por cualquier núcleo del material circundante, como en un choque de bolas de billar. En el choque el neutrón le transfiere parte de su energía al núcleo, que se vuelve a su vez un ion energético y al viajar ioniza al material como los iones pesados que ya hemos mencionado. Otro fenómeno que puede suceder es que el neutrón propicie una reacción nuclear, por ejemplo, de absorción de neutrón y emisión de rayos γ ; los rayos γ entonces son el agente que ioniza.

El neutrino (ν) es otra partícula que podemos clasificar como ionizante, aunque rarísima vez lo hace, y siempre por efecto secundario. Esta partícula, sin carga y sin masa, prácticamente no interacciona con nada. El efecto mediante el cual se comprobó su existencia fue la reacción $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$, en la cual un antineutrino ($\bar{\nu}$) choca con un protón para producir un neutrón y un electrón. Para poder escribir esta reacción sin error tuvimos que hacer alusión al antineutrino, cuya relación con el neutrino es como la de una β^+ con una β^- . Pero dejemos el estudio de la antimateria a otros lugares más apropiados. Este tipo de reacción es tan raro que se calcula que un cuerpo humano continuamente es atravesado por 1014 neutrinos cada segundo provenientes del Sol, sin que sufra ningún efecto medible. Sin embargo, estrictamente tiene la facultad de ionizar.

Las demás partículas elementales (μ , π , K etc.) pueden ionizar directamente en tanto tengan carga, o indirectamente si son neutras. Por lo tanto, califican para nuestra definición, aunque poco nos referiremos a ellas.

En vista de la importancia que tiene la energía de las radiaciones por su capacidad para ionizar la materia, se elaboró el cuadro 3, en donde, corrió ejemplo de las radiaciones más importantes, se mencionan algunas energías típicas, indicando su procedencia. Para tener una perspectiva adecuada, considérese que la energía promedio para ionizar un átomo de un gas es alrededor de 35 eV. Entonces la energía de la radiación dividida entre 35 eV será el número promedio de ionizaciones que se pueden producir por cada radiación.

Vista la parte estrictamente técnica de la radiación vale la pena ahora hacer mención de algunas cosas que la radiación es y otras que no es, para tratar de aclarar algunas ideas preconcebidas que pueden existir y que entorpecen la posibilidad de usar cabalmente la tecnología nuclear.

La radiación no es misteriosa. Sus orígenes, sus leyes, sus efectos son perfectamente conocidos. Basta con consultar cualquier texto de física nuclear, de física moderna o de radioquímica para encontrar todos los detalles o las fórmulas que se requieran. El hecho de que sea invisible a nuestros ojos no debe molestarnos: también lo son las ondas de radio o televisión, los microorganismos y el oxígeno que respiramos.

Cuadro 3. Ejemplo de radiaciones, sus energías y su capacidad de ionizar.

radiación	procedencia	energía	número promedio de ionizaciones en un gas
α	^{235}U	4.4 MeV = 4.4×10^6 eV	126,000
p	c	700 KeV = 7×10^5 eV	20,000
p	acelerador Tandem del Centro Nuclear de Salazar	12 MeV = 1.2×10^7 eV	343,000
p	Tevatrón de Fermilab	800 GeV = 8×10^{11} eV	2.3×10^{10}
$^{75}\text{As}^+$	implantador de iones	200 KeV = 2×10^5 eV	5,700
^{90}Sr	fusión de ^{235}U	80 MeV = 8×10^7 eV	2.3×10^6
β^-	^{90}Sr	546 KeV = 5.46×10^5 eV	15,600

e	acelerador Van de Graaff del Instituto de Física, U.N.A.M.	1.5 MeV = 1.5 X 10 ² X 10 ⁶ eV	43,000
e	microscopio electrónico	200 KeV = 2 X 10 ⁵ eV	5,700
γ	⁶⁰ Co	1.33 MeV = 1.33 X 10 ⁶ eV	38,000
X	línea K del Fe	6.4 KeV = 6,400 eV	183
X	aparato de radiografías	30 KeV = 30,000 eV	857
n	reacción nuclear ${}^2\text{H} + {}^3\text{H}$ $\rightarrow \text{n} +$ ${}^4\text{He}$	15 MeV = 1.5 X 10 ⁷ eV	430,000

La radiación no es esotérica ni mágica; es perfectamente mundana. Cualquiera que lo desee la puede usar, aunque naturalmente es importante tener la capacitación adecuada y el entendimiento de su naturaleza.

La radiación sí es de cuidado. Puede causar daños, al igual que cualquier otra aplicación de la tecnología. En este caso los daños pueden ser quemaduras u otros cambios químicos en los tejidos y cambios genéticos. Existe un código, elaborado en base a la experiencia acumulada, sobre el uso de las radiaciones, código que recomienda diferentes niveles de dosis de radiación que no deben rebasar los diversos sectores de la población. Las precauciones que exige el uso de la radiación no son distintas, en el fondo, de las que demandan otras tecnologías: evitar derrames, diseñar protecciones adecuadas, capacitar al personal, tener monitores apropiados, seguir ciertas reglas de conducta.

La radiación sí puede ser benéfica si se usa correctamente. Han salvado incontables vidas las radiografías v otros métodos de radiodiagnóstico. También la radioterapia ha salvado o prolongado gran número de vidas. Las múltiples aplicaciones no médicas de los radioisótopos, los aceleradores y los reactores han ayudado a avances tecnológicos de maneras insospechadas; y otro lado, en la producción de energía eléctrica por reactores nucleares son las radiaciones producidas por la fisión nuclear las que calientan el fluido que mueve las turbinas. En algunos países la energía nuclear predomina sobre las otras fuentes, por lo que es indiscutible beneficio para esos países.

Al final de nuestra descripción de qué es y qué no es radiación ionizante se plantea la siguiente pregunta: ¿la radiación es una onda o una partícula? La respuesta es sí, ambas. Toda materia tiene dualidad onda-partícula. A veces aparece más como onda, a veces más como partícula. Tornemos como ejemplo las ondas electromagnéticas. Las ondas de radio o televisión son de longitud de onda grande, y sus efectos se dejan sentir en objetos grandes, como antenas. Pero a medida que la longitud de onda disminuye (progresivamente en luz infrarroja, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X y rayos γ) sus efectos están más localizados y adquieren propiedades de partículas. Los rayos γ, v. gr., pueden chocar con electrones

atómicos como si fueran pequeñas pelotas.

Por otro lado, los electrones o los neutrones, que generalmente se visualizan como partículas, manifiestan propiedades de ondas en ciertos experimentos. El fenómeno que se produce se llama difracción y consta de una reflexión preferente en ciertas direcciones, semejante a la que producen las ondas de luz al encontrar un enrejado fino. Cada longitud de onda se refleja en una dirección propia, descomponiéndose en los colores del arcoiris.

La dualidad onda-partícula es un fenómeno real y parte de la naturaleza. La física moderna la describe con toda claridad. Que no extrañe entonces que a veces digamos que los neutrones y protones tienen longitud de onda, o que los rayos γ rebotan como pelotas.



III. CÓMO SABEMOS QUE ESTÁ ALLÍ

LA CARACTERÍSTICA de la radiación que más dificulta su comprensión es que es invisible. Sus efectos no se sienten de inmediato a menos que sea de muy alta intensidad; sin embargo, algunos de estos efectos pueden aflorar con el tiempo. Entonces puede uno estar expuesto a radiación sin saberlo y posteriormente podrán sentirse o no sus efectos, de acuerdo con las condiciones de la irradiación. Por ejemplo, cuando uno se saca una radiografía no se siente absolutamente nada. Las dosis recibidas en las radiografías en general son tan pequeñas y esporádicas que el paciente no sufre efectos posteriores. Las personas que están expuestas a radiaciones más frecuentemente deberán vigilar que no sea excesiva la exposición, pues a veces los efectos pueden aparecer muchos años después.

El que la radiación sea invisible la coloca en una categoría de riesgos que requieren algunos cuidados especiales. Por ejemplo, al gas combustible, normalmente incoloro e inodoro, se le añade una substancia que le da un olor característico y así poder detectar fugas. Cuando se supo de la existencia de los microorganismos patógenos se tomaron las precauciones de desinfectar los alimentos y de evitar otros tipos de contagio. En fin, muchas cosas a las que estamos acostumbrados, como el humo del tabaco (por cierto, éste si es visible y oloroso), pueden tener efectos nocivos a largo plazo, por lo que, si se han identificado, conviene tomar medidas inmediatas para evitar problemas posteriores. En esta categoría podemos ubicar a la radiación ionizante; por lo tanto necesitamos idear modos de saber dónde está y en qué cantidad.

Ya sabemos que la radiación afecta a la materia, produciendo principalmente ionización de sus átomos. Entonces es lógico pensar que si uno logra ver esa ionización puede darse cuenta de que allí hubo una radiación. Por lo tanto, es importante conocer cómo la radiación interacciona con la materia, pues esto nos permitirá diseñar adecuadamente los detectores.

Cada tipo de radiación interacciona con la materia de modo distinto, dependiendo también de su energía y del material en que incide. Sin embargo, en términos generales podemos decir que las radiaciones producen los siguientes fenómenos:

a) Teniendo en cuenta que cualquier materia consiste sólo de núcleos y electrones, las radiaciones chocan con ellos al azar. Como hay Z veces más electrones que núcleos, es mucho más probable que las radiaciones se encuentren con electrones que con núcleos, y por lo tanto la ionización predomina.

b) Transmiten energía al material. Esta energía casi siempre es inicialmente en forma de ionización, pero los efectos secundarios terminan por calentar el material como lo hacen una estufa o un horno. Una radiación aislada, por ejemplo una partícula α , produce un calentamiento minúsculo (alrededor de 10^{-13} calorías), por lo que para sentir su calor se necesitan muchas radiaciones.

c) Ionizan o excitan a los átomos que se encuentran en su camino. Después de esto hay dos efectos secundarios. Por un lado, el átomo que queda ionizado se recombina o desexcita emitiendo rayos X, rayos ultravioleta, luz visible o electrones, cuyas radiaciones a su vez pueden ionizar. Por otro lado, los electrones secundarios emitidos, algunas veces llamados rayos delta, también tienen suficiente energía para ionizar. Parte de la energía de la radiación original se distribuye a varios otros agentes que podemos llamar radiación secundaria. Estas radiaciones secundarias siempre tienen menos energía que la primaria, pero su interacción con la materia es cualitativamente igual, por lo que su importancia al afectar el material es grande (véase la Fig. 7).

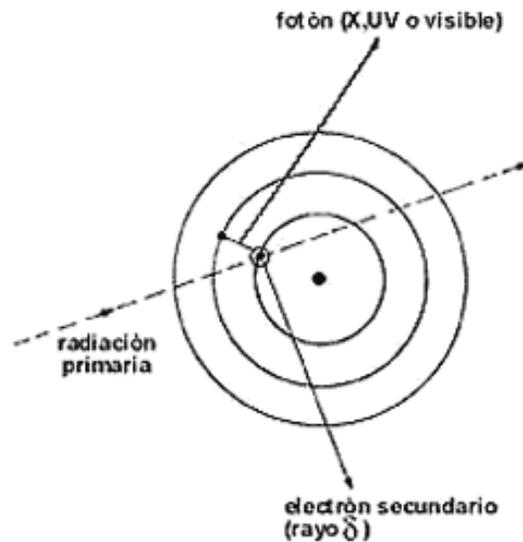


Figura 7. Ejemplo de una ionización y sus productos: electrón energético y fotón.

d) En algunos casos pueden desplazar átomos de su lugar. Estos átomos, al moverse, también producen efectos secundarios; pero lo más importante es que al alejarse dejan un sitio vacío, o vacancia, en la red cristalina. Además, deben detenerse en algún otro lado, generalmente una posición intercalada en la red, llamada intersticial. Estos defectos que produce el desplazamiento atómico en los cristales pueden alterar las propiedades de los sólidos de manera importante (véase la Fig. 8).

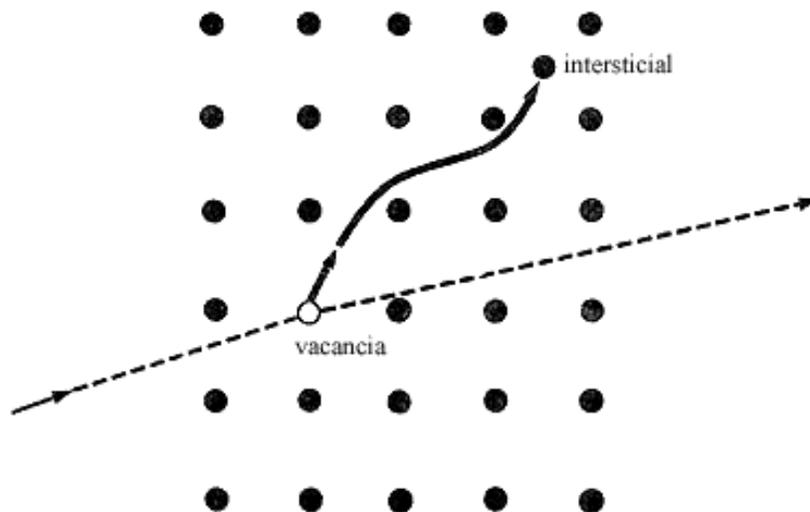


Figura 8. Ejemplo de un desplazamiento atómico que produce una vacancia y un intersticial.

e) Los átomos ionizados o desplazados pueden dar lugar a reacciones químicas, las cuales dependen de la configuración electrónica de los átomos participantes.

Habiendo visto en general qué sucede cuando las radiaciones penetran en la materia, examinemos cada tipo de radiación, para así poder seleccionar en cada caso el detector más apropiado.

En primer lugar vale la pena agrupar protones, partículas α , iones pesados en general y productos de fisión. Todos ellos se caracterizan por tener carga positiva y masa grande, por lo menos 1 840 veces mayor que la de los electrones. Así pues, al cruzar velozmente un material donde predominan los electrones, es como si una bala de cañón atravesara una región llena de pelotas de ping-pong. El proyectil va golpeando a los electrones, pero sin cambiar sensiblemente su trayectoria original, y sólo después de muchos de estos choques va perdiendo su energía hasta detenerse (véase la Fig. 6). Su trayectoria es esencialmente una línea recta. Su longitud depende de su energía inicial y de la densidad de la materia; por ejemplo, protones de 1 MeV y de 100 MeV en aluminio viajan, respectivamente, 15 micras y 3.7 cm; en gas nitrógeno estos alcances son de 2.4 cm y 72 m.

Pensemos en un experimento de transmisión como el de la figura 9. Se hacen incidir radiaciones en número N_0 sobre un absorbedor de grueso x . Atrás de él se coloca un detector que cuenta N radiaciones. En nuestro caso de protones u otras partículas del mismo grupo, si el absorbedor es delgado (X pequeño) todas las N_0 partículas que llegan lo atraviesan y son contadas ($N = N_0$). Si el espesor es mayor que el alcance de las partículas, no pasa ninguna, y $N = 0$. Resulta la gráfica de la figura 10a. Cuando la partícula original pierde toda su velocidad, se detiene dentro del material, y se constituye entonces en una impureza, un átomo extraño, implantado a cierta profundidad. La presencia de estos átomos extraños en ciertas cantidades puede modificar las propiedades del material.

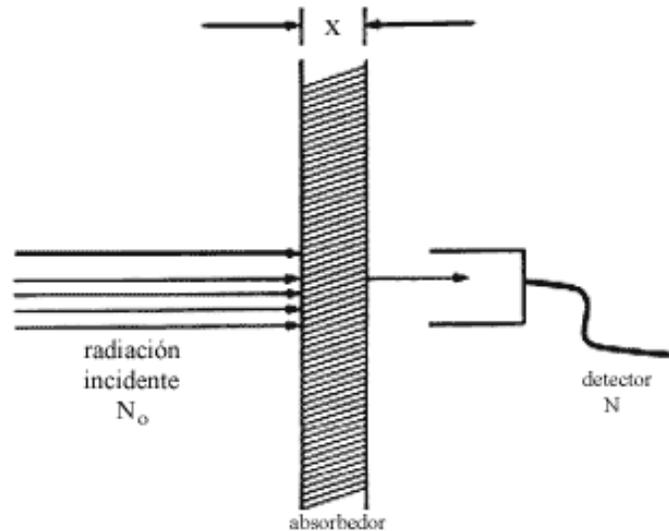


Figura 9. Experimento de transmisión de radiaciones. El número de radiaciones absorbidas es $N_0 - N$, y depende del espesor X del absorbedor.

Ahora vayamos a un segundo grupo de radiaciones, que incluye a los electrones y las partículas β . Al chocar éstos con la materia es como si fueran pelotas de ping-pong sobre otras iguales, por tener los proyectiles la misma masa que los electrones atómicos. Ahora los proyectiles pueden ser rebotados y pueden cambiar de dirección notablemente en un solo choque, por lo que su trayectoria es en zig-zag; incluso pueden retrodispersarse y salir del material, como lo indica la figura 11. Sus alcances no son todos iguales, y resultan bastante mayores que los del grupo anterior. El experimento de transmisión con estos proyectiles se muestra en la figura 10b. El alcance de electrones de 1 MeV en aluminio es aproximadamente de 1.5 mm, o sea, 100 veces más que el de protones de la misma energía

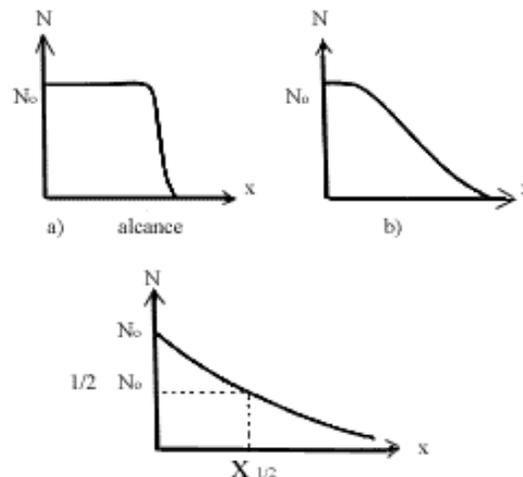


Figura 10. Curvas de transmisión de diferentes radiaciones. La curva a) corresponde a protones y partículas α , la b) a electrones y partículas β , y la c) a rayos X y γ .

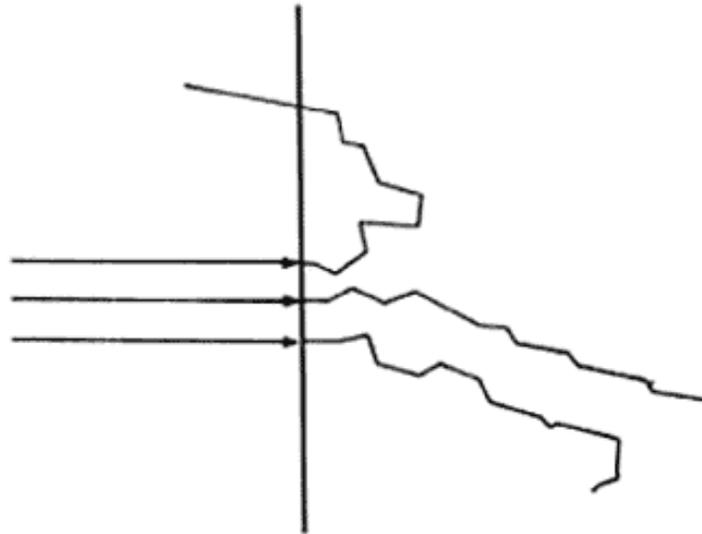


Figura 11. Ejemplos de trayectorias de electrones al incidir sobre un material.

En el tercer grupo vamos a incluir los rayos X y los rayos γ . Éstos sufren principalmente tres efectos: el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton y la formación de pares (véase la Fig. 12). Cuando sucede el efecto fotoeléctrico el fotón (X o γ) transfiere toda su energía a un electrón del material; esta energía se usa por una parte para liberar al electrón y por otra para darle velocidad. Si sucede el efecto Compton, la energía del fotón original se reparte entre un electrón del material y un nuevo fotón más débil. Por último, si la energía del fotón original es mayor que 1.02 MeV, puede suceder la formación de pares, en que el fotón se transforma en par electrón-positrón (e^- , e^+).

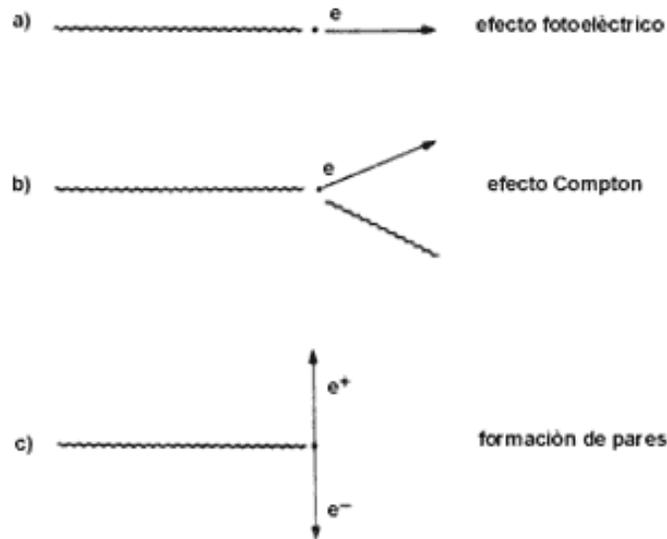


Figura 12. Las tres maneras principales en que los rayos X y los rayos γ interactúan con la materia. En los tres casos se producen electrones energéticos.

Es de notarse que en los tres efectos el fotón original desaparece y se crean electrones energéticos. Son estos electrones secundarios los que luego producen la mayoría de la ionización del material. Los rayos X o γ pueden atravesar bastante material antes de sufrir alguno de estos tres efectos, por lo que su penetración es grande. En un experimento de transmisión se obtiene la curva de la figura 10c, que es una curva exponencial. Obedece a la fórmula

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

donde μ se llama coeficiente de absorción y e es la base de los logaritmos naturales. Cada material tiene diferente coeficiente de absorción, dependiendo también de la energía de los fotones absorbidos. En el caso de rayos γ de 1 MeV que inciden sobre aluminio se necesitan 4.3 cm de aluminio para reducir la intensidad inicial N_0 a la mitad, y otro tanto para reducirla a una cuarta parte. En cambio si el material fuese plomo, N_0 se reduce a la mitad con sólo 0.88 cm, a causa de su alta densidad.

Finalmente, vayamos al cuarto grupo, que en realidad sólo abarca un tipo de partícula, los neutrones. Recordemos que éstos no tienen carga eléctrica, así que no pueden interactuar con los electrones del material, sino sólo con los núcleos y cuando el choque es de frente. Esto hace que sean muy raros los choques de los neutrones, por lo que su penetración es grande al igual que en el caso anterior. Cuando un neutrón llega a chocar con un núcleo, rebota como una bola de billar. En el rebote el neutrón pierde parte de su energía, y el núcleo con que chocó la adquiere, transformándose éste en un ion pesado que ioniza al material en su camino (véase la Fig. 13). Por lo tanto, también en este caso la Ionización se debe a efectos secundarios.

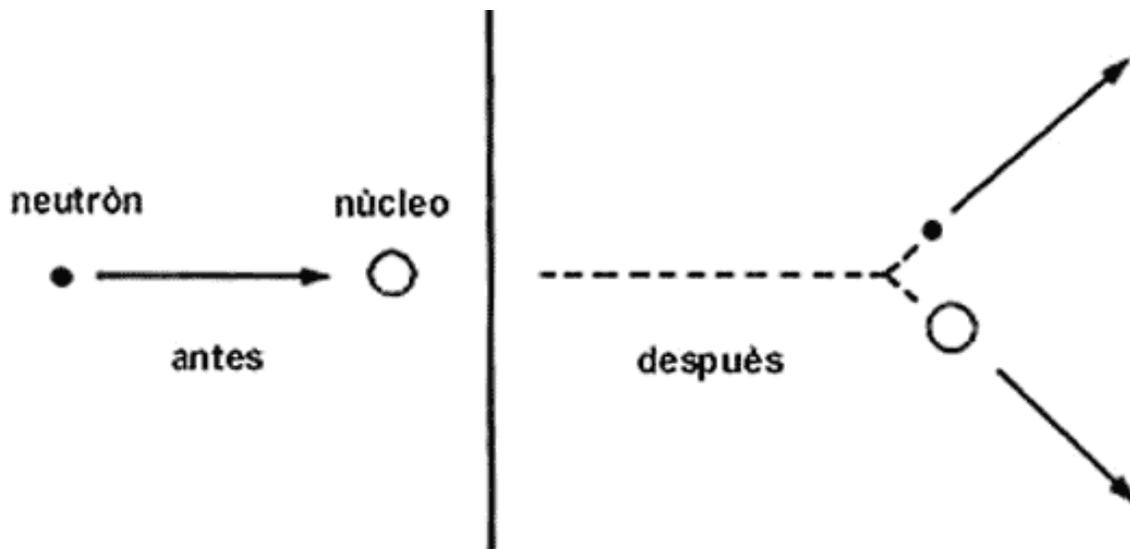


Figura 13. Esquema de la dispersión de un neutrón por un núcleo, el cual adquiere energía cinética.

Cuando hay un solo rebote, la curva de transmisión también es exponencial, y, como ejemplo típico, se necesitan 2.7 cm de concreto para reducir la intensidad inicial N_0 de neutrones a la mitad. Sin embargo, la historia no termina allí, pues el neutrón puede volver a chocar con otros núcleos, perdiendo algo de energía en cada choque hasta que su velocidad es tan pequeña como la de los mismos átomos del material. Estos neutrones lentos se llaman térmicos, y pueden mantenerse algún tiempo en el material hasta que son absorbidos casualmente por los núcleos, o decaen en un protón, un electrón y un neutrino.

Para dar una perspectiva de conjunto, en la figura 14 se presenta un resumen esquemático de la interacción de radiaciones de los cuatro grupos con un material.

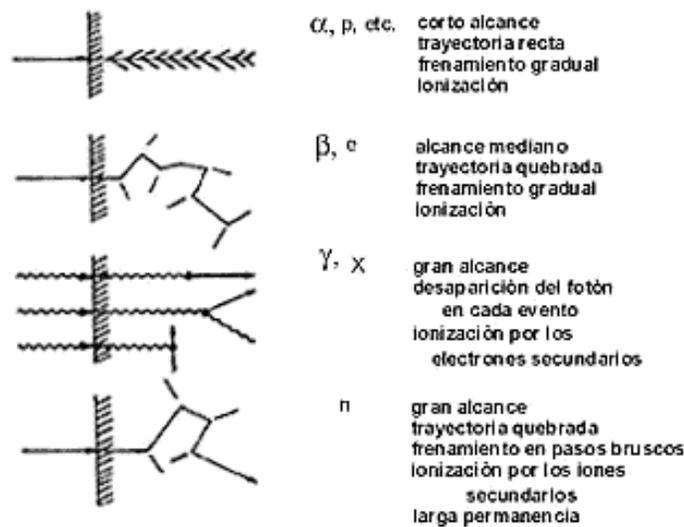


Figura 14. Resumen de cómo los distintos tipos de radiación interactúan con la materia.

Además de estos procesos que se llevan a cabo individualmente, hay procesos colectivos donde desempeña un papel importante el hecho de que en un sólido se tiene una estructura cristalina. Los átomos están alineados en ciertas direcciones y planos característicos de cada estructura. La radiación se puede reflejar en estos planos preferentemente cuando su separación guarda cierta relación con la longitud de onda de la radiación y con su ángulo de incidencia. Esta relación se llama Ley de Bragg, y esta dada por la fórmula

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

siendo d la separación entre planos cristalinos, λ la longitud de onda, θ el ángulo de reflexión y n un número entero. Este fenómeno, llamado difracción, se ha empleado mucho para estudiar la estructura cristalina de los sólidos, usando como proyectiles rayos X, electrones y neutrones.

Otro efecto colectivo es la llamada canalización. Si la dirección de la radiación incidente coincide casualmente con una dirección cristalina, encontrará canales por los cuales puede viajar grandes distancias sin encontrar obstáculos.

Todos estos conceptos de cómo la materia frena a las radiaciones, pero a su vez sufre efectos, forman la base para el diseño de detectores de radiación, lo cual veremos a continuación. Sin embargo, antes conviene hacer alguna reflexión de cómo la penetración de las distintas radiaciones constituye una de sus propiedades más útiles. El ejemplo que salta a la vista es la radiografía, que muestra la sombra que deja la distinta penetración de los rayos X en diferentes tejidos. Usando las leyes de paso por la materia, pueden seleccionarse las condiciones para tener mayor contraste en la radiografía, como son el voltaje de excitación, la densidad N_0 , la geometría y paralelismo de los rayos, el tipo de placa fotográfica y su revelado, y la distancia del tubo al objeto y de éste a la placa. Desde luego, al comprar un aparato de rayos X estas condiciones ya fueron dadas por el fabricante, de modo que su empleo pueda hacerse en forma rutinaria. Otro ejemplo importante es la radioterapia, en que es necesario irradiar cierta zona del paciente, afectando lo menos posible al resto del cuerpo.

Como usos no médicos podemos mencionar la medición de niveles de fluidos en tanques cerrados, viendo la diferencia de penetración de las radiaciones por arriba y por debajo del nivel; la localización de oclusiones en tuberías cerradas, midiendo a través de la pared de la tubería el lugar donde se detiene una fuente de radiación; la esterilización de grandes volúmenes de material mediante un haz de radiación

No olvidemos también que en cualquier lugar en que se emplea radiación es necesario blindar al personal adecuadamente, y protegerlo de niveles que pueden ser letales. En este caso, es primordial el estudio cuidadoso del tipo de radiación, su energía y penetración, el material del blindaje, su densidad y espesor, la

distancia de la fuente de radiación y los efectos indirectos.

Todo esto pone de manifiesto la necesidad de detectar las radiaciones y medir su intensidad, y la importancia de escoger apropiadamente el detector para la radiación particular que se desea observar. Por ejemplo, querer detectar rayos γ con un detector para partículas α podría ser un grave error, pues uno puede estar en un campo muy intenso de radiación sin que el detector registre nada en virtud de su insensibilidad. Hay que insistir en la importancia de que la radiación sólo sea empleada por personal calificado para poder identificar y clasificar los problemas.

Las radiaciones que hemos mencionado tienen muy poca energía; por tanto, no nos daríamos cuenta de ellas, sin ayuda adicional. Los detectores de radiación aprovechan algún efecto para intensificarla y así hacerla más notable. Con esta idea se han desarrollado muchos tipos diferentes de detector. Una manera de clasificarlos es separarlos en dos grupos: los de registro permanente y los de señal instantánea. Cada uno tiene su utilidad propia, pues son tan diversos los requisitos para detectores como diferentes usos hay de la radiación.

Comencemos con el primer grupo, y de ellos con la emulsión fotográfica. Su importancia histórica es grande, pues así se descubrieron la radiactividad, el radio y los rayos X. Su funcionamiento se basa en que el efecto que produce la radiación en la película es el mismo que produce la luz. Todo mundo ha visto en una radiografía la imagen que dejan los rayos X. También puede usarse la emulsión para grabar el paso de radiaciones específicas, por ejemplo, partículas α o protones. La figura 15 muestra los trazos dejados por protones y partículas α en una película fotográfica. Los dosímetros personales más comunes para registrar la radiación que recibe el personal son pequeñas placas fotográficas con absorbedores para clasificar el tipo de radiación y medir su intensidad. El personal que trabaja con radiación siempre debe llevar uno consigo. Es claro que hay que revelar la película para obtener la información, y esto puede ser una desventaja por el tiempo que toma. Por otro lado, una vez revelada la película, no se puede volver a usar.

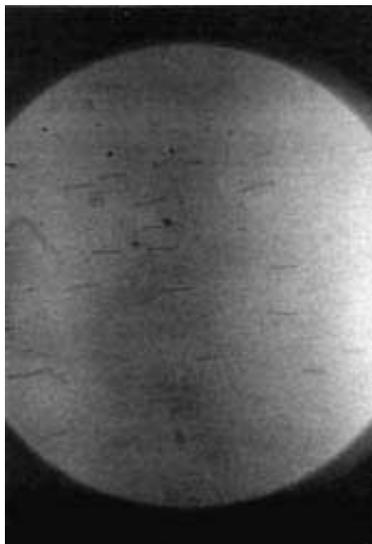


Figura 15. Trazos dejados por protones de 2.5 MeV de energía en una emulsión fotográfica. Los trazos tienen una longitud de 40 micras, por lo cual sólo pueden verse con microscopio.

En realidad hay muchos compuestos que, como la emulsión fotográfica, sufren cambios apreciables al ser irradiados, y los efectos son visibles aun sin un revelado. La magnitud de estos cambios depende de la dosis de radiación recibida. El cambio que más se aprovecha en el empleo de estos materiales como dosímetros es la coloración o la densidad óptica (absorción de luz), y se debe a reacciones químicas que producen nuevos compuestos. Un dosímetro muy empleado es el llamado Fricke, que consiste en una solución de sulfato amonio-ferroso en agua y ácido sulfúrico. La radiación transforma los iones ferrosos en férricos, con el consiguiente cambio óptico que se mide en un espectrofotómetro.

Otro método de registro permanente para detectar partículas α , protones, o productos de fisión es el llamado de trazas. Hay algunas sustancias, como el vidrio, la mica, y algunos plásticos, que sufren daños en su estructura al pasar las partículas. Si posteriormente son atacadas con reactivos químicos apropiados, afloran los puntos dañados por ser más fuerte el ataque químico en ellos. Estos pueden verse con un microscopio o a simple vista si se les somete a una intensificación posterior. Gracias a su propiedad de retener la información, los detectores de trazas se han usado con éxito para medir pequeñas dosis de radiación. Son muy útiles para medir la radiación ambiental. Hay que advertir, sin embargo, que son insensibles a rayos X y γ , y también a electrones. La figura 16 muestra las trazas producidas por varias partículas α en un plástico.

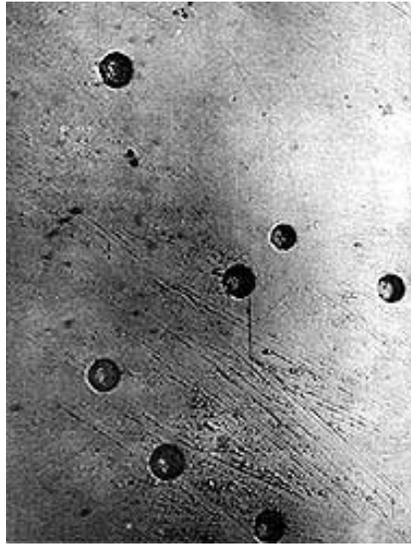


Figura 16. Trazas de partículas α en un plástico. El ataque químico tiene lugar sobre todo en la zona dañada por las partículas; se producen entonces marcas visibles.

Hay otro método de detectar radiación durante largos periodos y en pequeñas cantidades, llamado de termoluminiscencia (TL). Existen ciertos cristales, como el fluoruro de litio, que al recibir radiación sus átomos quedan excitados en estados que pueden tener vidas muy largas. Por lo tanto, parte de la energía de la radiación ionizante queda almacenada en ellos, acumulándose esta energía a medida que es expuesto el cristal. La manera de liberar la energía es calentar el cristal, con lo cual se desexcitan los átomos y emiten luz. La cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis de radiación recibida. Los cristales termoluminiscentes también se usan como dosímetros personales, y tienen la ventaja de que una vez que emitieron la luz almacenada, pueden volver a usarse como dosímetros, repitiéndose el ciclo varias veces. Ciertos materiales, siendo termoluminiscentes, pueden almacenar energía durante siglos. Se han usado para determinar edades, por ejemplo, de cerámicas. Al calentarse una vasija, tal vez hace muchos años, se desexcita, y pierde toda energía previamente almacenada; por lo tanto, de ese momento en adelante inicia un ciclo de absorción de radiación. Si uno luego mide la desexcitación y conoce o puede estimar la rapidez con que el objeto recibió radiación, se puede de allí calcular el tiempo durante el cual se acumuló, y por lo tanto la edad del artefacto. El método se ha empleado, por ejemplo, para determinar edades de algunas cerámicas de Teotihuacan y de Cholula.

El electroscopio se usa como dosímetro personal para medir dosis acumuladas. Al cargarse el electroscopio con una fuente de voltaje, un elemento móvil, que es una fibra de cuarzo, se coloca en una posición determinada. Al recibir radiación, la ionización ayuda a descargarlo, y la fibra se desplaza, lo cual se observa con ayuda de una lente. El desplazamiento depende de la cantidad de radiación recibida.

Los detectores que hemos descrito hasta aquí se caracterizan porque acumulan durante un tiempo la información sobre la radiación, y luego mediante algún método se pone de manifiesto. El segundo grupo de detectores proporciona la información en el instante de recibirse la radiación.

Uno de éstos es la cámara de niebla. Es un recipiente que contiene un vapor sobreenfriado, por ejemplo de alcohol, que se condensa con gran facilidad. El sobreenfriamiento se logra por una expansión súbita con un émbolo, o bien enfriando con nitrógeno líquido. Al pasar una partícula, el vapor se condensa en los iones producidos, formando gotitas en la trayectoria de la partícula, con lo cual la vuelve visible durante un instante mientras se difunden las gotitas. La trayectoria se puede ver a simple vista, y si se sincroniza una cámara para tomar una fotografía en el instante que se produce, se puede tener un registro permanente de los eventos.

Otro detector semejante es la cámara de burbujas. En ésta se tiene un líquido a punto de hervir, en que se forman burbujas con cualquier perturbación; generalmente se usa hidrógeno líquido. Se escoge un líquido transparente para poder ver las burbujas formadas en la trayectoria completa de la radiación, y también generalmente se toman fotografías de los eventos. Con la cámara de burbujas se pueden ver trayectorias de partículas de muy alta energía, lo cual no es posible con otros métodos.

Entre los detectores de respuesta instantánea están los de gas, que incluyen las cámaras de ionización, los contadores proporcionales y los detectores de Geiger-Müller. Todos ellos funcionan porque el gas que contienen se ioniza repentinamente al pasar una radiación. Si se le aplica un alto voltaje, los iones y los electrones producidos por la ionización se dirigen a los electrodos. Los iones positivos se dirigen al cátodo, y los electrones al ánodo, lo cual produce un pulso eléctrico muy corto que luego puede amplificarse y analizarse. Con las cámaras de ionización se intenta recolectar todas las cargas producidas en el gas. Entonces el tamaño del pulso depende del número de iones producidos y, por lo tanto, de la energía de la radiación. Este detector tiene por eso una doble utilidad: saber el instante en que llegó la radiación y conocer su energía.

El contador proporcional es semejante a la cámara de ionización, pero se le aplica un voltaje más alto, de modo que los iones y electrones, al viajar hacia los electrodos, vuelven a producir ionización, y los nuevos iones y electrones contribuyen también al pulso eléctrico (véase la Fig. 17). De esta manera se logra una amplificación del pulso que se produce, y su tamaño resulta proporcional a la energía de la radiación.

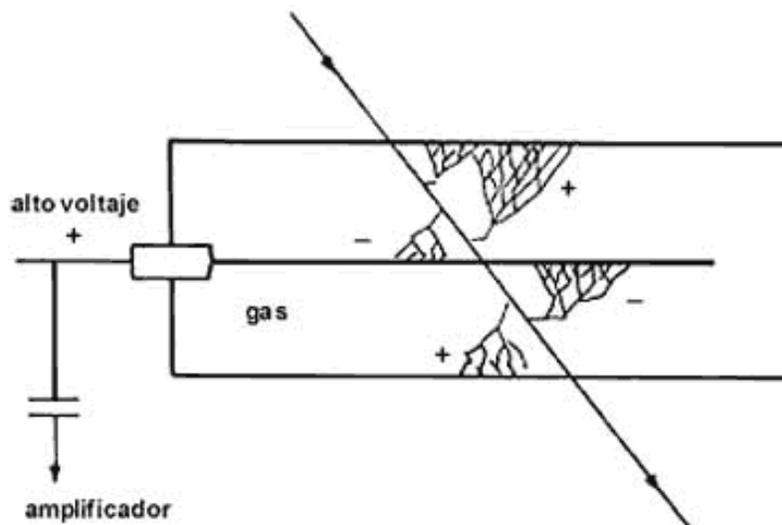


Figura 17. Esquema de la operación de un contador proporcional o Geiger-Müller. Las cargas producidas por la ionización se multiplican en su trayecto hacia los electrodos.

En el contador de Geiger-Müller se aplica un voltaje todavía más alto, y los pulsos son muy grandes, de modo que necesitan poca amplificación posterior. Sin embargo, se pierde la proporcionalidad del pulso, así que sólo es un indicador de que hay radiación, pero no da información sobre su energía. Los contadores Geiger se usan mucho en monitores portátiles por su relativa sencillez. Se conectan a una aguja indicadora o a una bocina. La figura 18 muestra uno de estos monitores portátiles.

Otro detector de respuesta instantánea aprovecha el pequeñísimo destello que produce la radiación en ciertas sustancias fluorescentes. Si se coloca una pantalla fluorescente en presencia de radiación en la oscuridad, y si uno permite unos minutos para que la vista se haga sensible, se pueden ver los destellos. De allí se deriva el contador de centelleo, que consta de un material fluorescente y transparente, ya sea sólido (v. gr., ioduro de sodio o antraceno) o líquido, y debe estar a oscuras. El destello que produce la radiación se transforma en una pequeña corriente eléctrica en un material que emite electrones cuando le llega luz. Luego esta corriente es amplificada para dar un pulso eléctrico; el dispositivo que se encarga de esto se llama foto multiplicador. El tamaño de los pulsos producidos es proporcional a la intensidad del destello y, por lo tanto, a la energía de la radiación.

El detector más usado en la actualidad es el llamado de estado sólido. Consiste en un cristal de silicio o de germanio que contiene impurezas que le permiten conducir electricidad. La radiación incidente produce ionización, y así libera cargas móviles que se pueden recolectar en un par de electrodos. Se parece su operación a la de una cámara de ionización, excepto que, en vez de suceder en un gas, las cargas se desplazan dentro de un cristal sólido. También en estos detectores se tiene información sobre la energía de la radiación. Se usan de silicio para detectar partículas cargadas y rayos X; de germanio para rayos γ .



Figura 18. Contador Geiger portátil de lectura directa en la carátula.

En general no se pueden detectar todos los tipos de radiación con cualquier detector, aunque todos éstos a fin de cuentas operan con la ionización producida. Cada tipo de detector tiene cierta utilidad, y habrá que cuidar que se use el apropiado. Hay ciertas reglas sencillas que se aplican a esta selección. Por ejemplo, los detectores de gas necesitan un recipiente cerrado y sellado, por lo que las partículas α o los protones de baja energía no se pueden detectar, pues no logran atravesar la pared. Por otro lado, para detectar rayos γ es preferible un detector sólido a uno de gas, porque la densidad del material determina la eficiencia del detector; de todos modos es posible que los rayos γ atraviesen el detector sin dispararlo. Cada detector tiene sus limitaciones. En el cuadro 4 se resume la utilidad de algunos detectores.

Cuadro 4. Usos de los diferentes detectores de radiación.

<i>detector</i>	<i>uso principal</i>
placa fotográfica	rayos X, β , electrones
trazas	α , productos de fisión
termoluminiscencia (TL)	α , β , electrones
electroscopio	β , electrones

cámara de niebla	α , protones, electrones
cámara de burbujas	protones de alta energía
gas	β , electrones
centelleo	γ , rayos X
estado sólido (barrera superficial)	α , protones, deuterones
estado sólido (difundido)	γ , rayos X

El observar neutrones requiere de técnicas especiales porque no ionizan directamente. Pueden sufrir choques o reacciones nucleares, impartiendo parte de su energía a otras partículas, y luego éstas ionizan. Por lo tanto, la estrategia para ver neutrones es poner en el detector una substancia que cause muchos choques o reacciones y convierta así los neutrones en radiación ionizante. Por ejemplo, un detector de gas que contenga hidrógeno hace que los neutrones choquen con frecuencia; en cada choque un protón (hidrógeno) recibe un golpe y retrocede, lo cual ioniza el gas. También se usan detectores de centelleo ricos en hidrógeno, como ciertos plásticos, para producir el mismo efecto. En algunos detectores se introduce especialmente una substancia que produce reacciones nucleares con los neutrones. Por ejemplo, en un detector con BF_3 como gas se produce la reacción $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$; así se detecta la partícula α . Un detector con un recubrimiento interno de uranio produce fisiones al recibir los neutrones; se detectan, pues, los productos de fisión. Casi cualquier detector puede usarse para neutrones si se le agrega un convertidor a radiación ionizante.

La electrónica moderna ha permitido un manejo muy complejo de los pulsos eléctricos que producen los detectores (véase la Fig. 19), o tal vez se podría decir que la necesidad de manejar información en experimentos nucleares tuvo mucho que ver con el desarrollo de la electrónica moderna, incluyendo el uso de computadoras. He aquí una lista de algunas operaciones que pueden llevarse a cabo con los pulsos, y que ayudan a conocer cómo se comporta tanto la radiación como la materia con que choca.



Figura 19. Sistema electrónico de procesamiento de los pulsos provenientes de detectores nucleares; incluye amplificadores, digitalizadores, escaladores, un analizador de altura de pulsos y una computadora.

- a) Se pueden contar en gran cantidad, hasta millones por segundo.
- b) Se pueden amplificar hasta que tengan el tamaño requerido para usos especiales.
- c) Se pueden registrar en coincidencia, o sea, sólo cuando dos detectores distintos dan pulsos simultáneos.

d) Se puede medir el intervalo entre dos pulsos, por ejemplo, el tiempo que tarda una radiación en llegar de uno a otro detector.

e) Se puede analizar el tamaño de los pulsos, que depende de la energía de la radiación, lo cual da por resultado un espectro de energías como el de la figura 20.

f) Se pueden analizar al mismo tiempo los pulsos de muchos detectores, sacando de cada uno de ellos la información más relevante.

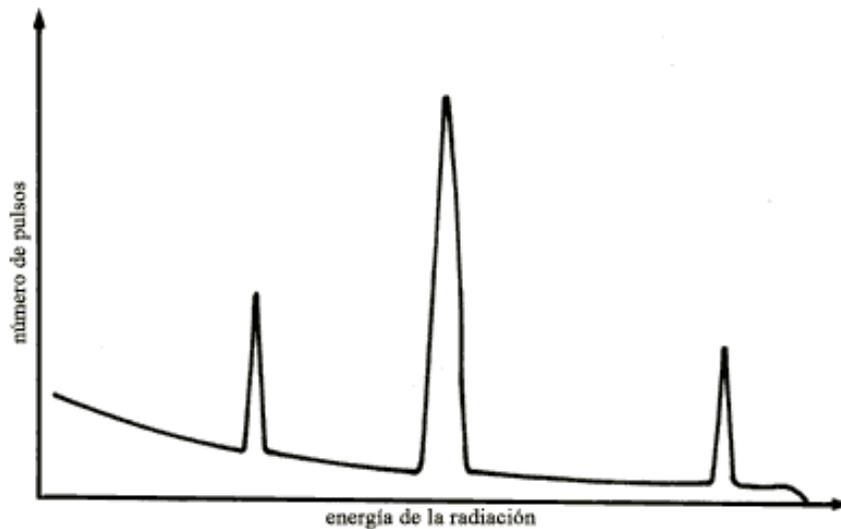


Figura 20. Ejemplo de un espectro de energías de una clase de radiación. Los picos corresponden a ciertas energías características.

El desarrollo de detectores de radiación es una de las principales ramas de la tecnología nuclear, ha resultado ser una actividad muy compleja, muy minuciosa y fundamental para la investigación de la naturaleza. La figura 21 muestra la gran riqueza de información que se puede obtener de un detector adecuadamente diseñado. Se trata de una cámara de $300\,000\text{ cm}^3$ que contiene gas neón y helio a presión atmosférica y temperatura ambiente. Cuando llega el haz de un acelerador (por la izquierda) y choca con un blanco, se producen muchas radiaciones, cada una de las cuales deja una estela de ionización. Para poder tomar la fotografía, la ionización se intensifica con un pulso de $700\,000$ voltios. Además está colocada la cámara dentro de un imán que hace que las partículas positivas se curven hacia abajo y las negativas hacia arriba. Los datos sobre la reacción nuclear producida se extraen del grueso de los trazos, de su curvatura y de su posición.

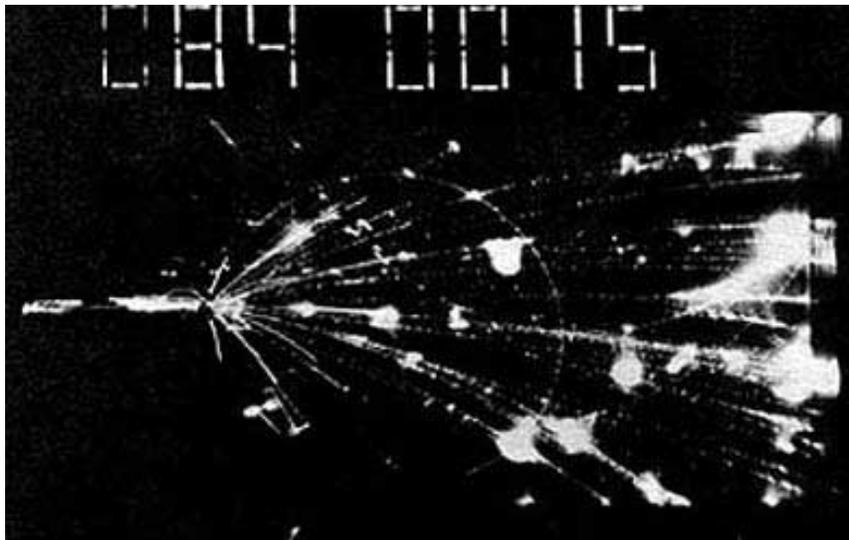


Figura 21. Fotografía de una reacción nuclear. El haz de protones de un acelerador llega por la izquierda y choca con un blanco metálico. Se produce gran cantidad de radiaciones, cuyo análisis detallado nos dice cómo es el núcleo.



IV. LOS RELOJES NUCLEARES

YA SABEMOS que una de las características de la radiactividad es que la emisión de la radiación α y β necesariamente va asociada a la transformación de un elemento en otro. Por ejemplo, si un núcleo de un elemento de número atómico Z y número de neutrones N emite una partícula α , al perder dos protones y dos neutrones se convierte en un nuevo elemento con número atómico $Z-2$ y número de neutrones $N-2$. El número de masa A disminuye en cuatro unidades. En el caso de la emisión β , también sucede la correspondiente transmutación de elementos. La emisión γ , aunque no implica cambio de un elemento en otro, sí va asociada al paso de un nivel energético a otro del mismo núcleo.

Esto significa que si uno comienza con una cantidad dada (por ejemplo, un gramo) del elemento radiactivo, llamado padre, después de un tiempo esta cantidad va disminuyendo y simultáneamente se va creando el nuevo elemento, el hijo. Dado suficiente tiempo, todos los núcleos del padre podrían desaparecer y transformarse en núcleos del hijo. La pregunta ahora es ¿cuánto tiempo se necesita?, o bien ¿con qué rapidez sucede el decaimiento de uno en otro?

Una manera de visualizar este proceso es imaginarse un reloj de arena. Si el paso de granos del recipiente superior al inferior es constante, decimos que su comportamiento es lineal y usando una gráfica como la de la figura 22 podemos saber el número de granos que ha caído, o bien el número que queda arriba en cualquier instante. En la figura 22 se gráfica número de granos contra tiempo. La línea continua representa el número de granos en el recipiente superior. En el instante que se inicia el proceso ($t = 0$), en el recipiente superior hay un número determinado de granos, que llamamos N_0 . Al transcurrir el tiempo este número disminuye linealmente hasta que en un tiempo T ha caído a cero. Simultáneamente el número de granos en el recipiente inferior va desde cero en $t = 0$ hasta N_0 en $t = T$ (línea discontinua en la misma figura). Es de notarse que si uno conoce N_0 y T , y sabe que el comportamiento es lineal, se puede conocer, para cualquier instante t , el número N_{sup} de granos en el recipiente superior, y N_{inf} , el número en el inferior.

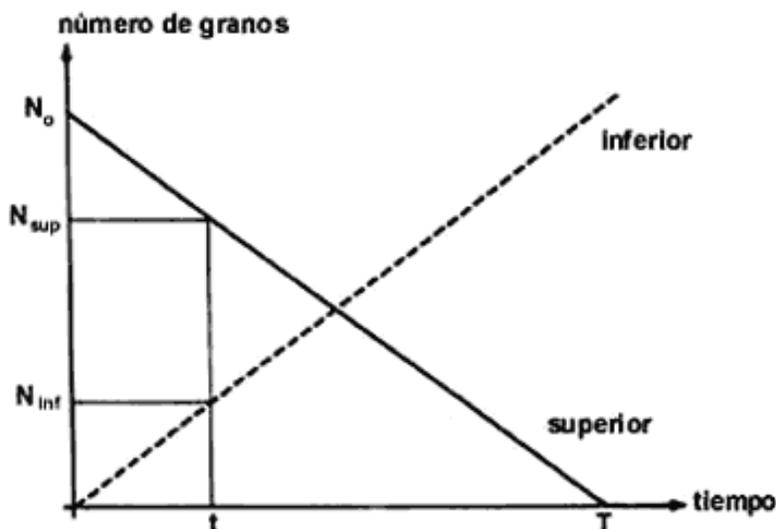


Figura 22. Un reloj de arena lineal.

Ahora bien, el decaimiento radiactivo de los núcleos no sigue un comportamiento lineal, sino exponencial representado en la figura 23. Aunque ahora las líneas que corresponden a la abundancia del elemento padre y del hijo son curvas, sigue siendo cierto que uno puede conocer cuánto del padre (N_{padre}) y cuánto del hijo (N_{hijo}) hay en un instante determinado. Desde luego es necesario saber de antemano con cuántos núcleos N_0 se inició el proceso ($t = 0$) y qué tan rápidamente cae la curva exponencial.

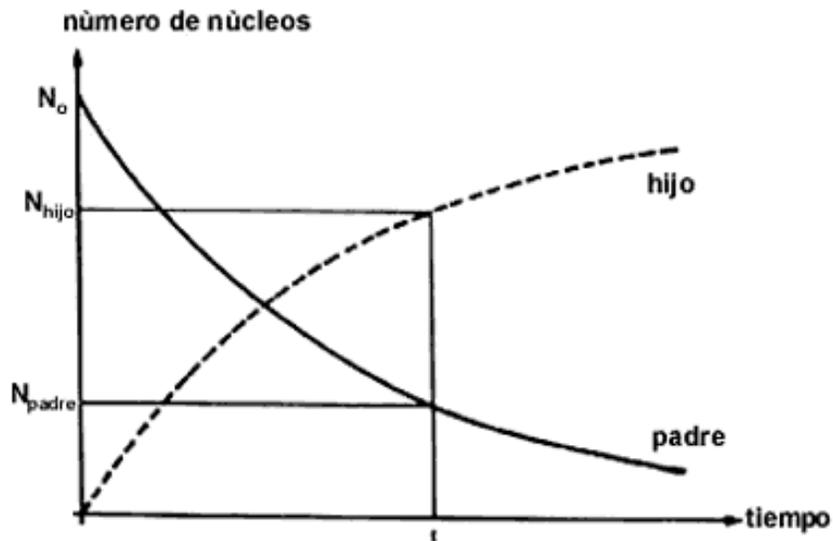


Figura 23. Decaimiento exponencial de los núcleos.

La ley exponencial de decaimiento radiactivo sucede en virtud de que, a diferencia del reloj de arena, el paso de padre a hijo depende de cuántos núcleos del padre hay en cualquier instante. Cuanto menos núcleos del padre hay, menos se transforman en hijo. Es como si se tratase de un reloj de arena cuya abertura se fuera constriñendo con el tiempo. Otra manera de decirlo es que la probabilidad de decaimiento es constante.

Una cantidad característica del decaimiento exponencial de los núcleos es la vida media $t_{1/2}$. Es el tiempo que tarda el número de núcleos del elemento padre en reducirse a la mitad. En el decaimiento exponencial no importa con cuántos núcleos se comienza; siempre tarda el mismo tiempo en reducirse a la mitad. Esto se puede ver en la figura 24, en donde se representa el decaimiento de 10 000 núcleos de ^{14}C (vida media $t_{1/2} \times 5\,730$ años). En el lapso de una vida media, el número original se redujo a 5 000; en otro lapso igual se redujo a la mitad de 5 000, o sea a 2 500; en otro lapso igual a 1 250, y así sucesivamente: cada vez que transcurre una vida media, el número se reduce a la mitad.

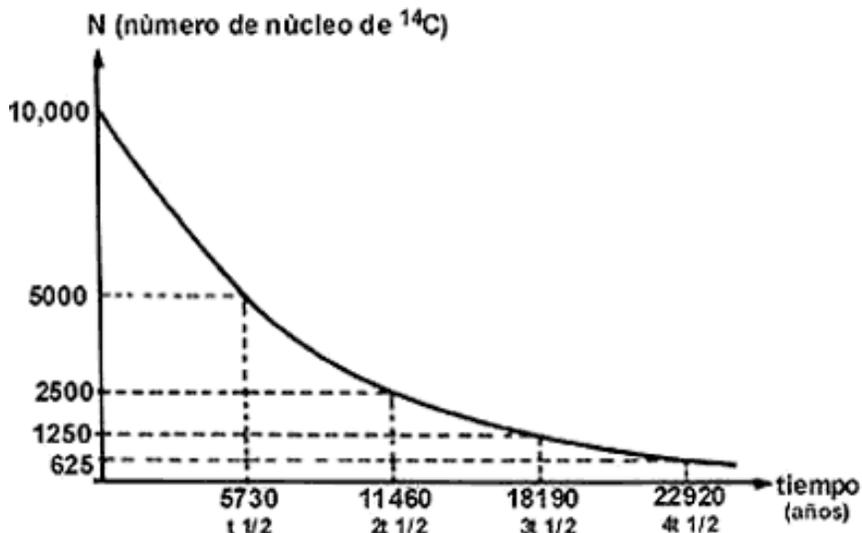


Figura 24. Curva de decaimiento del ^{14}C .

La ley exponencial no sólo se aplica al número de núcleos, sino también a la radiactividad de la muestra que los contiene. En la figura 24 bien podríamos haber graficado la actividad de la muestra en vez del número de núcleos. Esto es porque la actividad es proporcional al número de núcleos. Al reducirse éste, también disminuye la actividad.

La fórmula matemática que describe la ley exponencial de decaimiento es la siguiente:

$$N=N_0e^{-\lambda t}.$$

En esta fórmula N representa el número de núcleos del padre en el instante t; N_0 es el número inicial cuando $t = 0$; λ se denomina la constante de decaimiento; e es la base de los logaritmos naturales. La constante de decaimiento λ representa la probabilidad de que haya decaimiento. Está relacionada con la vida media como sigue:

$$\lambda = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

En otras palabras, la probabilidad de decaimiento es inversamente proporcional a la vida media. Cuanto mayor es λ , más rápidamente decae y menos tiempo tarda.

Cada tipo de núcleo radiactivo tiene una vida media distinta, incluso a veces se mide la vida media para identificar el elemento. Las vidas medias de los núcleos radiactivos conocidos van desde fracciones de segundo hasta miles de millones de años. La figura 25 muestra el decaimiento de cuatro núcleos con vidas medias de 1, 5, 20 y 100 unidades. En el cuadro 5 se da una lista de algunos elementos radiactivos más importantes con sus vidas medias para ilustrar la gran diversidad de valores que se conocen.

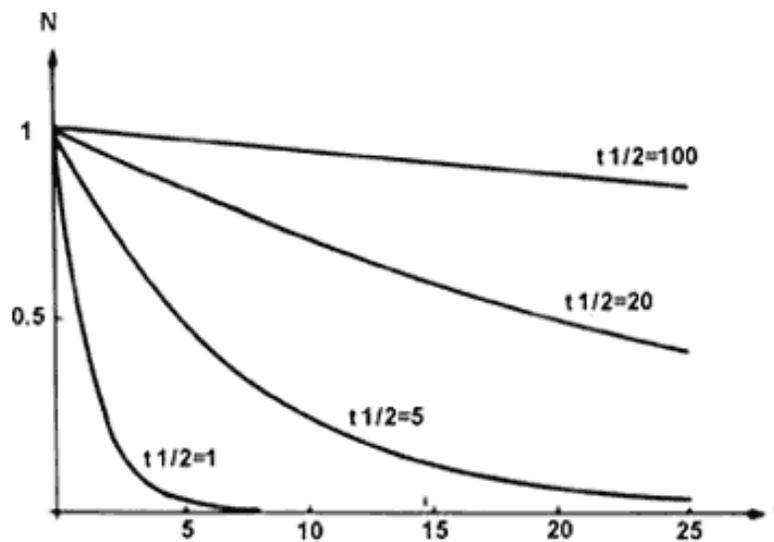


Figura 25. Ejemplos de curvas de decaimiento de distintas vidas medias, 1, 5, 20 y 100 unidades de tiempo.

Cuadro 5. Algunos radioisótopos importantes y sus vidas medias.

Isótopo	Vida media
^{204}Pb	1.4×10^{17} años
^{232}Th	1.41×10^{10} años
^{87}Rb	4.7×10^9 años
^{238}U	4.51×10^9 años
^{40}K	1.3×10^9 años

^{235}U	7.13×10^8 años
^{14}C	5730 años
^{226}Ra	1600 años
^{137}Cs	30 años
^{90}Sr	28.8 años
^3H (tritio)	12.26 años
^{60}Co	5.24 años
^{210}Po	138.4 días
^{32}P	14.3 días
^{131}I	8.05 días
^{222}Rn	3.825 días
n (neutrón)	12 minutos
^{10}C	19.4 segundos
^{26}Na	1 segundo
^5Li	10^{-21} de segundo

Es muy frecuente que el producto (el hijo) de un decaimiento sea a su vez radiactivo, generándose entonces nietos y otros descendientes hasta llegar a uno que sea estable. Se habla entonces de cadenas de decaimiento, las cuales pueden constar de más de una docena de pasos. Como ejemplo podemos citar la cadena del ^{238}U , que sucede de modo natural (véase la Fig. 26). Cada círculo representa un núcleo y cada flecha un decaimiento a o b; la vida media de los integrantes de la cadena se muestra en el cuadro 6. En cadenas de este tipo el número N de cada integrante en un instante determinado sigue una ley mucho más complicada que la exponencial. Por ejemplo, tomemos el ^{222}Rn , que se produce por el decaimiento de ^{226}Ra —con vida media 1 620 años— y decae a su vez con vida media de 3.82 días. La cantidad de ^{222}Rn va a estar, pues, más bien regida por su producción que por su decaimiento. En la cadena completa se establece un equilibrio dependiente de todas las vidas medias. Para ayudar a imaginarse esto, vale la pena pensar en un reloj de arena de muchos recipientes y aberturas distintas entre cada par: la arena tiende a concentrarse en los recipientes con abertura pequeña, equivalente a vida media larga; en cambio, en los de abertura grande, o vida media chica, pasan rápidamente al siguiente.

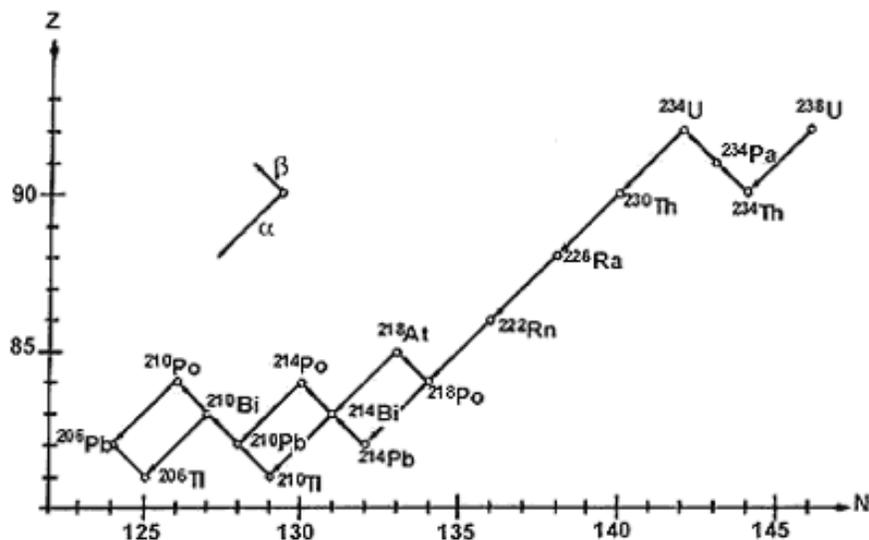


Figura 26. Cadena de decaimiento del ^{238}U .

Las diferentes vidas medias de los radioisótopos dan lugar a una serie de efectos, algunos útiles, otros nocivos. Por ejemplo, el que el uranio en la naturaleza tenga una vida media larga es causa de que constantemente estemos recibiendo radiación proveniente de él o de sus descendientes; pero, por otro lado, nos permite estimar la edad de la tierra. Un radioisótopo de vida media corta, el ^{131}I (8.05 días) se puede usar para radiodiagnóstico inyectándolo al cuerpo, porque sus efectos desaparecen pronto.

Cuadro 6. Cadena de decaimiento del ^{238}U .

<i>Elemento</i>	<i>Decaimiento</i>	<i>Vida media</i>
^{238}U	α	4.51×10^9 años
^{234}Th	β	24.1 días
^{234}Pa	β	1.18 minutos
^{234}U	α	2.48×10^5 años
^{230}Th	α	7.6×10^4 años
^{226}Ra	α	1.62×10^3 años
^{222}Rn	α	3.82 días
^{218}Po	99.98 % α 0.02 % β	3.05 minutos
^{214}Pb	β	26.8 minutos
^{218}At	α	1.3 segundos
^{214}Bi	99.96 % β 0.004 % α	19.7 minutos
^{214}Po	α	1.6×10^{-4} segundos
^{210}Tl	β	1.32 minutos
^{210}Pb	β	22 años

^{210}Bi	100 % β 0.0002 % α	5.0 días
^{210}Po	α	138.4 días
^{206}Tl	β	4.3 minutos
^{206}Pb	estable	

Ciertamente es el ^{14}C el núcleo radiactivo que más se conoce como reloj nuclear, por dos razones principalmente: la primera, porque está presente en la materia orgánica; la segunda, porque su vida media de 5 730 años se presta para fechar objetos de interés arqueológico. Veamos cómo funciona. Recordemos (véase la Fig. 24) que si en un decaimiento exponencial se conoce la vida media y un punto de la curva, se puede calcular cualquier otro punto.

El ^{14}C presente en la naturaleza tiene como origen la radiación cósmica, de donde provienen neutrones que, al bombardear nitrógeno, producen la siguiente reacción nuclear: $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$. El ^{14}C producido es radiactivo, por lo cual emite partículas β de baja energía. Como la radiación cósmica se mantiene más o menos constante se produce constantemente la misma cantidad de ^{14}C , que se mezcla con los isótopos estables y se distribuye uniformemente en el bióxido de carbono del aire. Es recogido por las plantas y luego por los animales, hasta que en todos los seres vivos se tiene una fracción, pequeñísima pero bien definida, de ^{14}C . En cuanto muere el organismo, deja de intercambiar carbono con el resto de los seres vivos y entonces el ^{14}C que decae no se repone. En ese momento podemos decir que comienza a contar el reloj.

Tomemos un ejemplo hipotético. Una muestra de madera tomada de un entierro antiguo se pesa y se mide su actividad proveniente del ^{14}C , encontrándose que esta actividad es exactamente la mitad de la de una muestra del mismo peso de madera cortada recientemente. Se deduce entonces que la edad de la muestra primera es 5 730 años, es decir, una vida media del ^{14}C .

Si el razonamiento suena sencillo, el efectuar la medida no lo es. En primer lugar la energía de las partículas β que emite el ^{14}C es muy pequeña, por lo que no es posible usar un contador convencional con ventana. Otra dificultad es que la cantidad de radiactividad que se debe medir es pequeñísima, difícilmente distinguible de la radiación ambiental, por lo que se deben usar sistemas especiales de conteo. Para vencer estos problemas, la muestra se transforma químicamente a forma líquida (benceno), para introducirla a un centellador líquido orgánico. Se requiere mucho cuidado en el manejo y la transformación de la muestra con la exactitud necesaria para no perder parte de ella. La mezcla luego se cuenta con un fotomultiplicador y se analizan los pulsos resultantes.

El método de datación usando ^{14}C se empleó para uno de los descubrimientos más importantes de la arqueología de nuestro continente. Se trata de las excavaciones de la cueva de Coxcatlán en el Valle de Tehuacán, en donde se hallaron vestigios de maíz de diferentes antigüedades. Su fechado y la secuencia en que se encontraron demuestran claramente que ese pueblo sufrió un proceso evolutivo, de colectores primitivos de alimentos a comunidades agrícolas civilizadas, gradualmente entre 5 000 y 2,300 años a.C.

Para poder usar el método nuclear de calcular edades se necesita un sistema de reloj perfecto y que no entren ni salgan granos más que pasando por el orificio. Sí se escogen adecuadamente los isótopos es posible medir, por ejemplo, edades de rocas. Uno de los métodos que se usan es la combinación rubidio-estroncio. El ^{87}Rb existe en la naturaleza y decae a ^{87}Sr con una vida media de 4.7×10^9 años. Esto significa que el estroncio normal de la naturaleza se va enriqueciendo lentamente en el isótopo 87 por el

decaimiento del rubidio. Para aplicar este reloj nuclear a una muestra de un mineral dado se necesita: 1) mediante análisis químico saber cuánto rubidio tiene y medir su actividad β ; 2) usando un espectrómetro de masas medir la abundancia de cada uno de los isótopos del estroncio (84, 86, 87 y 88) de la muestra y de una muestra de estroncio que no tenga rubidio; 3) la diferencia de la cantidad de ^{87}Sr en las dos muestras se puede atribuir al decaimiento del ^{87}Rb en el mineral, de donde se puede calcular su edad.

Otro método que se ha usado para medir edades geológicas es el de la fisión del uranio. El isótopo más abundante del uranio, el ^{238}U , decae con emisión de partículas α , según ya vimos en la cadena de decaimiento. Pero hay otra manera en que puede decaer. Existe la posibilidad (muy remota, pero bien medida de que el ^{238}U se fisione espontáneamente, o sea, se rompa en dos partes de masas no muy distintas una de la otra. La fisión del ^{235}U , inducida por el bombardeo de neutrones, es la fuente de energía de los reactores nucleares de fisión; sin embargo, aquí estamos tratando con un fenómeno espontáneo. Solo, sin requerir de ningún estímulo extraño, el ^{238}U puede fisionarse con una vida media de cerca de 0.8×10^{16} años. Como el uranio está presente en muchos lados en cantidades minúsculas esta fisión espontánea puede usarse también como reloj nuclear.

Resulta que al producirse la fisión los dos fragmentos salen despedidos con gran energía, como en una explosión. Aunque se trata sólo de núcleos aislados, su energía ocasiona que al pasar por la materia circundante la dañen fuertemente, dejando un trazo microscópico de daños que quedan impresos en el material. En ciertos materiales estos trazos pueden persistir durante millones de años, siempre y cuando el material no cambie de estado. Sí las regiones dañadas son atacadas con reactivos químicos, se vuelven visibles con un microscopio óptico normal. Uno puede entonces contar con trazos y deducir cuántas fisiones han sucedido, esto es, cuánto tiempo ha pasado. Para poder aplicar la curva de decaimiento se necesita conocer cuánto uranio hay en la muestra. Esto puede lograrse si se coloca dentro de un reactor nuclear, sometida a un flujo conocido de neutrones, con los que se induce la fisión en dos isótopos de uranio (235 y 238). Se vuelve a atacar químicamente para ver los trazos producidos, y de allí se deduce la cantidad total de uranio en la muestra. En obsidianas del campo geotérmico de la Primavera, en el Estado de Jalisco, se han observado trazas de productos de esta fisión espontánea. Su fechado ayuda en el análisis geológico para buscar campos con energía térmica que resulten económicamente rentables.

Estos métodos y otros semejantes (por ejemplo, el decaimiento de uranio en plomo) han dado la pauta para medir la edad de la Tierra. En la actualidad se acepta que es alrededor de 4.5×10^9 años, o sea, 4 500 000 000 de años.

Hemos visto que muchos núcleos se desintegran con diferentes vidas medias. Ahora se antoja una pregunta fascinante: ¿los protones y neutrones que constituyen los núcleos pueden desintegrarse, y por lo tanto, podría esperarse que la materia como la conocemos se convirtiese en otra forma? La respuesta es la siguiente: de los neutrones, efectivamente sabemos que decaen en protón, electrón y neutrino con una vida media de 12 minutos (cuadro 5). Sin embargo, esto sólo puede suceder si los neutrones están libres; no sucede si están en un núcleo junto con otros protones y neutrones. Para el posible decaimiento del protón se han propuesto varios esquemas, de los que el más probable dice que el protón puede decaer en un pión neutro y un positrón. Sin embargo, este proceso nunca se ha observado naturalmente a pesar de que se han dedicado muchos esfuerzos a ello. No sólo no se ha observado, sino que se tiene 90% de certeza de que, si sucede, la vida media del decaimiento del protón sería.. ¡mayor de 10^{31} años! Así que podemos estar tranquilos: en nuestro lapso de vida la materia no va a transformarse en otra cosa.



V. ¿DE DÓNDE VIENE?

AL IGUAL que cualquier otro fenómeno físico, la radiación ionizante debe tener un origen, una procedencia, que es importante conocer porque es la primera etapa de su vida, generalmente efímera. Conocer los métodos distintos de producción de las radiaciones nos permite, a su vez, tomar los pasos necesarios para producirla de propósito cuando se requiere. En realidad, de algún lado tiene que salir. Además, debe adquirir energía de alguna manera para ser considerada como radiación ionizante.

La mayor parte de la radiación que recibimos cotidianamente existe por la misma naturaleza. Como tal, se ha producido y seguirá produciéndose durante toda la vida del universo; y así como existe en nuestra Tierra, también existe en el Sol, en los otros planetas y en las galaxias más lejanas. Tan forma parte de la naturaleza, que está estrechamente ligada con el equilibrio de energía en la misma formación de las estrellas y demás cuerpos celestes. Pudo haber desempeñado un papel importante en el origen de la vida y en la evolución de las especies. No hay ninguna manera en que podamos evitar recibir radiación natural, y nuestros cuerpos están adaptados a pequeñas cantidades de ella.

Veamos algunos ejemplos de radiación natural. Comencemos por la radiación cósmica. Como su nombre lo indica, proviene del espacio exterior, lo cual es evidente porque es más intensa a grandes alturas y, en cambio, disminuye considerablemente si se mide en túneles subterráneos o bajo agua donde es absorbida al pasar por materia. Los rayos cósmicos que llegan a las capas externas de la atmósfera constan de núcleos atómicos (de carga positiva), principalmente protones y partículas alfa. Constituyen un continuo bombardeo a nuestro planeta, aparentemente desde todas direcciones, excepto por un efecto producido por el magnetismo terrestre, que disminuye su intensidad cerca del ecuador y que, por tanto, nos indica que se trata de partículas con carga eléctrica. A medida que penetran en la atmósfera van sufriendo choques con los núcleos atómicos de los gases. En estos choques se producen nuevas radiaciones, parte de las cuales llega a la biosfera. Una fracción de éstas está constituida por electrones, positrones y rayos gamma; otra, por mesones.

Es interesante notar que la observación y medición de los rayos cósmicos llevó al descubrimiento de los mesones, partículas de masa intermedia entre protones y electrones, y que habían sido predichas teóricamente. Cuando se observaron por primera vez los mesones, no había dispositivo artificial que proporcionara suficiente energía para producirlos, pero pocos años después se comenzaron a construir aceleradores capaces de producir mesones y muchas otras partículas en el laboratorio. Típicamente, el bombardeo cósmico produce mesones π o piones, que posteriormente decaen en mesones μ o muones, que luego se desintegran en electrones y positrones.

Las energías que alcanzan algunos de los rayos cósmicos primarios pueden ser de 10^{17} eV. Estas energías son demasiado altas para que las partículas puedan provenir de reacciones nucleares, por lo que se piensa que adquieren su energía en campos magnéticos y eléctricos que varían lentamente, empujando a las partículas hasta que adquieren altas velocidades. Luego viajan enormes distancias y algunas de ellas llegan por casualidad a la Tierra.

Al llegar se encuentran de inmediato con núcleos atómicos de nuestra atmósfera y se producen reacciones nucleares y reacciones entre partículas. Podemos describir estas reacciones por ejemplo como sigue: $p^+ + p^+ \rightarrow p^+ + n + \pi^+$, en que un protón con carga positiva choca con otro protón, resultando del choque un protón, un neutrón y un pión positivo. Este pión posteriormente puede decaer en un muón y un neutrino, como sigue: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$; y el muón a su vez en positrón, neutrino y antineutrino: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$. Éstos son sólo algunos ejemplos de cómo una partícula con alta energía es capaz de producir verdaderas cascadas de muchas otras, algunas de las cuales atraviesan la atmósfera y llegan hasta la superficie, a la cual bombardean continuamente.

Algunas de estas reacciones producen neutrones, y algunos de éstos producen la reacción nuclear $^{14}\text{N} + \text{n} \rightarrow \text{p} + ^{14}\text{C}$ con el nitrógeno de la atmósfera. El ^{14}C producido se mezcla con el resto del carbono en el bióxido de carbono de la atmósfera y pasa finalmente a formar parte integral de todo ser vivo. Como es radiactivo, pues emite partículas β , y además tiene larga vida media, se transforma en una importante fuente natural de radiación a la que todos estamos expuestos.

El tritio es otra fuente de radiación natural. Se trata del isótopo más pesado del hidrógeno, ^3H , también formado como resultado de la radiación cósmica y a veces en el laboratorio y en los reactores y explosiones nucleares. Existe en cantidades minúsculas (solo un tritio por cada 1017 núcleos de hidrógeno), pero como está en forma de gas y sufre las mismas reacciones químicas que el hidrógeno normal, se encuentra ampliamente diseminado. También decae por emisión de partículas β .

Hay otros elementos que son fuentes naturales de radiación, pero que, en vez de ser producidos por los rayos cósmicos han existido en la Tierra desde su formación, habiéndose creado sus núcleos por los mismos procesos por los que fueron creados todos los demás elementos. Se trata de elementos como el potasio ^{40}K y el uranio. Son elementos sólidos que se encuentran en mayor o menor proporción distribuidos en todos los suelos y otros materiales a base de tierras o rocas, como el concreto u hormigón, tabiques, cerámicas, adobe, yeso, etc. Aproximadamente uno de cada 10 000 núcleos de potasio es ^{40}K , emisor de rayos β .

El uranio es de especial interés, no sólo por ser fuente natural de radiactividad, sino por su empleo como combustible nuclear. De los tres isótopos que se encuentran en la naturaleza, el ^{238}U , el ^{235}U y el ^{234}U , hay 99.27%, 0.72% y .006% respectivamente. Todos emiten partículas α . Aunque el uranio se encuentra ampliamente diseminado en suelos, hay algunos lugares en que se encuentra en mayor concentración, suficiente para que se pueda extraer para combustible. Algunos de estos yacimientos se encuentran en el norte de la República Mexicana, pero los más conocidos están en Zaire, Canadá, los Estados Unidos, la URSS y Australia.

El uranio desempeñó un papel importante en la historia de la ciencia, pues en 1896 A. H. Becquerel descubrió la radiactividad natural emitida por sales de uranio, lo cual abrió las puertas para la era nuclear. También es importante por su asociación con el radio (Ra), elemento cuya radiactividad ha encontrado múltiples usos. El radio es uno de los elementos que se produce por la desintegración del uranio, así que donde existe uno existe el otro. Fue descubierto en 1898 por Pierre y Marie Curie.

El uranio y el radio se encuentran en forma sólida como parte de la corteza terrestre, por lo que la radiación que emiten la absorbe en buena parte la tierra o se distribuye en forma de polvos. Pero el ^{226}Ra decae en otro elemento, el radón (Rn), gas inerte que no forma compuestos químicos y que, por lo tanto, escapa al aire, donde puede ser respirado. Emite partículas α y tiene una vida media de 3.82 días, suficiente para moverse distancias importantes antes de transformarse en otro elemento, el polonio (Po), que a su vez es radiactivo. La figura 26 muestra la cadena de decaimiento del ^{238}U , en donde aparecen el radio, el radón y el polonio.

El radón atmosférico constituye como una tercera parte de la radiación ambiental que recibimos. Desde luego, su abundancia varía de lugar a lugar, siendo mayor cerca de donde hay más uranio, o en lugares mal ventilados. En sitios volcánicos se ha observado que la actividad volcánica generalmente va acompañada de la emisión de radón, por lo que en la actualidad se mide sistemáticamente la radiactividad del aire en sitios potencialmente peligrosos para predecir terremotos o erupciones. La emisión de radón que acompañó la erupción del volcán Chichonal en el Estado de Chiapas fue detectada a 400 kilómetros de distancia.

Las radiaciones y fuentes de radiación descritas hasta aquí son parte de la naturaleza, y constituyen casi la totalidad de la radiación que incide sobre una población que no recibe servicios médicos radiológicos. Pero también podemos producir nuestra propia radiación.

Si se recuerda que las radiaciones de distintos tipos son partículas subatómicas o son producidas por ellas, y uno mira a su alrededor para ver qué partículas de éstas podrían emplearse como radiaciones, se concluye que para empezar contamos sólo con los núcleos y electrones atómicos. Para que puedan tener los efectos típicos de la radiación, necesitan alta energía, o sea, moverse a grandes velocidades. Cómo aislar a los electrones o núcleos y cómo acelerarlos a altas velocidades constituyen las bases para la creación artificial de radiación.

Habría que recordar que los núcleos tienen carga eléctrica positiva y los electrones la tienen negativa, por lo que se atraen entre sí para formar átomos. Pero lo que se requiere son partículas aisladas, así que habrá que romper la liga entre ambos. Por otro lado, núcleos contra núcleos se repelen, y electrones contra electrones también. Si queremos aislar cualquiera de estas partículas y tenerlas libres suficiente tiempo para poder luego acelerarlas, lo debemos hacer en un espacio enrarecido, para que no se recombinen otra vez por sus cargas eléctricas. Necesitamos que puedan viajar ciertas distancias sin encontrarse otras que las desvíen o las anulen eléctricamente. Para esto se requiere un alto vacío, que es una atmósfera enrarecida hasta 10^{12} veces, es decir, un billón o millón de millones de veces. La tecnología del alto vacío ha sido piedra angular en el desarrollo de los aceleradores (véase la Fig. 27).

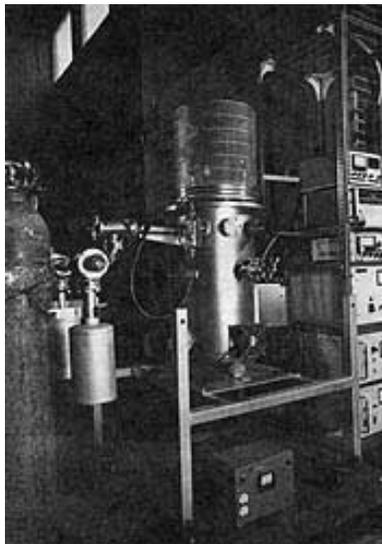


Figura 27. Sistema de ultraalto vacío que se emplea para producir recubrimientos muy delgados.

Ahora bien: las partículas más sencillas de acelerar son los electrones. Algunos metales u óxidos metálicos los sueltan con un simple calentamiento. Esto sucede en los filamentos de los bulbos de los radios antiguos o en los cinescopios de televisión. Una corriente eléctrica los calienta como la resistencia de una plancha, y encontrándose en vacío, emiten electrones. Una vez libres, los electrones pueden ser acelerados mediante un alto voltaje.

En la figura 28 se muestran los componentes básicos de un acelerador. El filamento F se calienta con la fuente de alimentación A, y entonces emite electrones E; éstos se dirigen a la placa P, a la cual se le aplica un alto voltaje positivo mediante la fuente de alimentación B. Filamento, placa y electrones están dentro de un recipiente al alto vacío. La energía cinética que adquieren los electrones al acelerarse depende del voltaje aplicado según la fórmula $E=eV$, o sea, es el producto de la carga del electrón (e) y el voltaje aplicado (V). Por ejemplo, un electrón acelerado por un voltaje de un volt adquiere una energía de un electrón-volt. Si el voltaje es de un millón de volts, la energía de los electrones será de un millón de electrón-volts (10^6 eV, o 1 MeV). Si su velocidad no es muy alta, puede calcularse con la fórmula de la energía cinética, $E = 1/2mv^2$ (m es la masa de la partícula), o bien despejando, $v = \sqrt{2E/m}$. Si la velocidad se acerca a la velocidad de la luz, la fórmula cambia, pero siempre con mayor energía, mayor velocidad. Con objeto de tener una idea sobre las magnitudes de energía podemos mencionar que para ionizar átomos de hidrógeno se necesitan 13.6 eV; para producir rayos X de tungsteno se requieren 70 000 eV (70 keV); para inducir reacciones nucleares, millones de eV (MeV); para crear mesones π , 1.4×10^8

eV (140 MeV).

Veamos algunos ejemplos de aceleradores de electrones. Los bulbos de los radios tienen los componentes básicos de un acelerador (Fig. 28). En ellos el propósito no es producir radiación, sino controlar una corriente eléctrica. Efectivamente, el haz de electrones que va del filamento a la placa constituye una corriente eléctrica que se mide en amperes o fracciones de ampere. En general, los bulbos tienen por lo menos un electrodo adicional intermedio para controlar el haz de electrones y con ello la corriente.

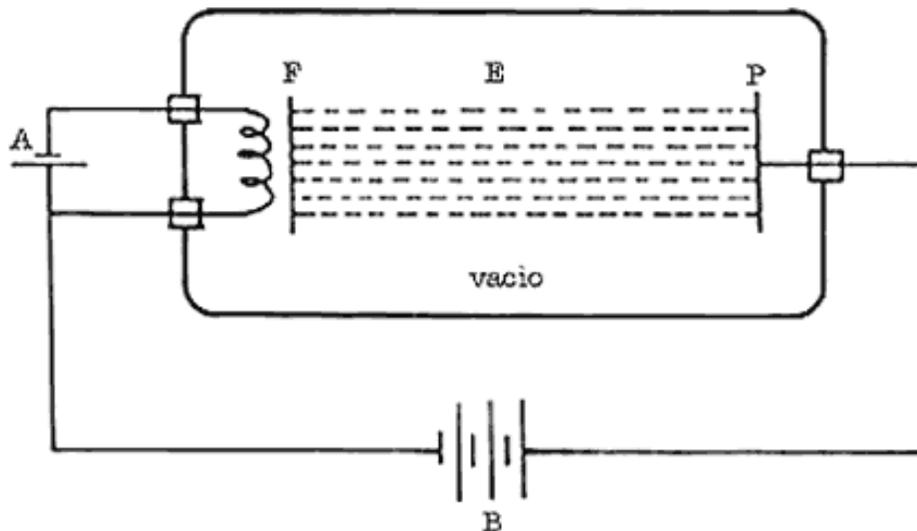


Figura 28. Elementos principales de un acelerador. El filamento F lleva una corriente eléctrica proporcionada por la fuente de alimentación A; los electrones E que emite son acelerados hacia la placa P por el voltaje B.

Muchos tenemos en casa un acelerador de electrones, aunque no lo llamamos así: lo llamamos televisor. Tiene los elementos básicos, además de uno que hace que el haz de electrones ejecute un rastreo rápido sobre la pantalla cuando llegan a los materiales llamados fósforos que están depositados en la parte interior de la pantalla del cinescopio, se produce la luz que nos da la imagen.

Algunos médicos y dentistas usan otro acelerador de electrones, aunque tampoco lo llaman así; se trata del generador de rayos X. En éste el propósito sí es el de producir radiación. Si el alto voltaje del generador es de unas decenas de miles de volts, al bombardear los electrones la placa (en este caso llamada anticátodo), ésta emite rayos X. Por su gran capacidad de penetración, los rayos X pasan las paredes del recipiente hacia el aire, y por ello se pueden emplear para sacar radiografías o para radioterapia.

Avanzando en energía y en complejidad, tenemos los aceleradores electrostáticos, que pueden alcanzar varios millones de volts. De ellos emergen los electrones casi a la velocidad de la luz; son capaces de penetrar hasta varios centímetros de material produciéndole un gran daño y calentamiento. Si se pone una placa de un metal pesado como blanco, el bombardeo produce grandes cantidades de rayos X. Estos aparatos están diseñados precisamente para producir mucha radiación, cuyos efectos pueden emplearse de varias maneras, por ejemplo, para esterilizar productos médicos, para la conservación de alimentos sin necesidad de refrigeración, para desinfectar productos agrícolas, vulcanizar hules, polimerizar plásticos, curar tintas y pinturas y muchas más. Es tal la cantidad de radiación que pueden producir los aceleradores electrostáticos, que puede ser letal simplemente entrar al recinto de bombardeo. Requieren de edificios especiales con paredes gruesas que absorban la radiación, y sistemas de seguridad en las puertas para apagar la máquina si éstas se abren accidentalmente.

Para los aceleradores electrostáticos desde luego es esencial la fuente de alto voltaje. Las primeras fuentes fueron inspiradas por el deseo de estudiar la estructura de la materia. Por un lado R. Van de Graaff, en la Universidad de Princeton, y por otro J. D. Cockroft y E. T. S. Walton, en Cambridge, Inglaterra,

desarrollaron fuentes de alto voltaje, con las que se llevaron a cabo las primeras reacciones nucleares sin usar fuentes naturales de radiación. El acelerador de Van de Graaff (véase la Fig. 29) alcanzó altos voltajes por medio de una banda aislante móvil que transportaba cargas y las depositaba en la terminal. El de Cockroft y Walton consistía en una serie de rectificadores eléctricos que sólo permitían corriente eléctrica en una dirección. Después de ellos se construyeron otros aceleradores electrostáticos, como el Dinamitrón, que se parece al Cockroft - Walton pero trabaja a altas frecuencias, y el Peletrón, que transporta la carga por una cadena móvil de pequeños barriles metálicos unidos por aisladores. En la actualidad el Instituto de Física de la UNAM posee dos aceleradores de electrones para investigación, un Van de Graaff de 2 MeV (Fig. 30) y un Dinamitrón de 3 MeV. En la Universidad de Guanajuato se construyó un Van de Graaff de 0.6 MeV.

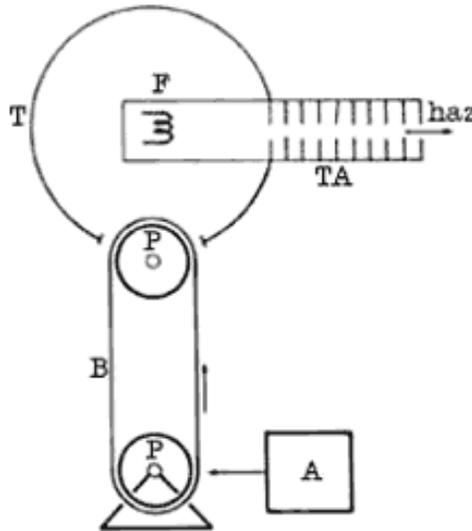


Figura 29. Esquema de un acelerador tipo Van de Graaff. La fuente de alimentación A transmite carga eléctrica a la banda B, que es accionada por las poleas P; transporta la carga y deposita en la terminal de alto voltaje T. El filamento F produce electrones, que el tubo acelerador TA enfoca y dirige, además de acelerarlos a altas velocidades.

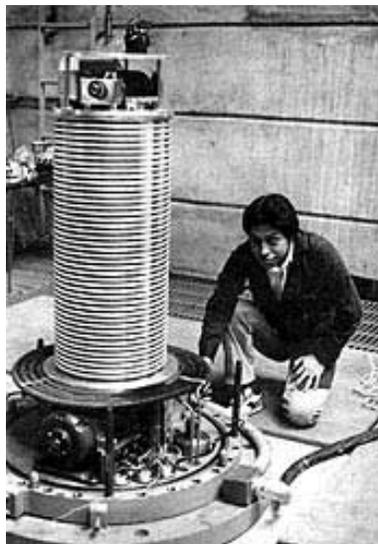


Figura 30. Acelerador Van de Graaff de 2 MeV de electrones en el Instituto de Física de la UNAM. En la parte inferior se observa el motor que acciona la polea. Los 44 platos equipotenciales van conectados en el interior al tubo acelerador. Se retiró la cubierta de la terminal de alto voltaje para poder ver parte de los circuitos del filamento.

El microscopio electrónico (Fig. 31), tan ampliamente utilizado, es otro aparato que tiene las

características básicas de un acelerador. En él se produce un haz de electrones más fino que cualquier rayo de luz. Después de atravesar la muestra, se amplifica usando lentes magnéticas en lugar de ópticos, y así se obtienen amplificaciones hasta miles de veces mayor es que las de los microscopios ópticos. Los electrones se proyectan sobre una pantalla fluorescente que permite ver y fotografiar la imagen. Si además se induce un rastreo del haz sobre la muestra y se registran los electrones dispersados, se tiene un microscopio electrónico de barrido, que produce imágenes como las de las figuras 32, 33 v 34.



Figura 31. Microscopio electrónico de transmisión y de barrido en el Instituto de Física de la UNAM.



Figura 32. Fotografía de la cabeza de una mosca, tomada con el microscopio electrónico de barrido del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Se logra un detalle y una profundidad de campo que ningún microscopio óptico es capaz de proporcionar.

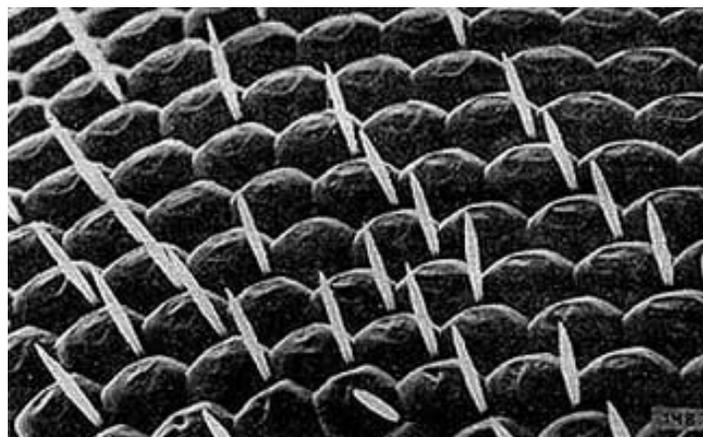


Figura 33. Detalle del ojo de la misma mosca.

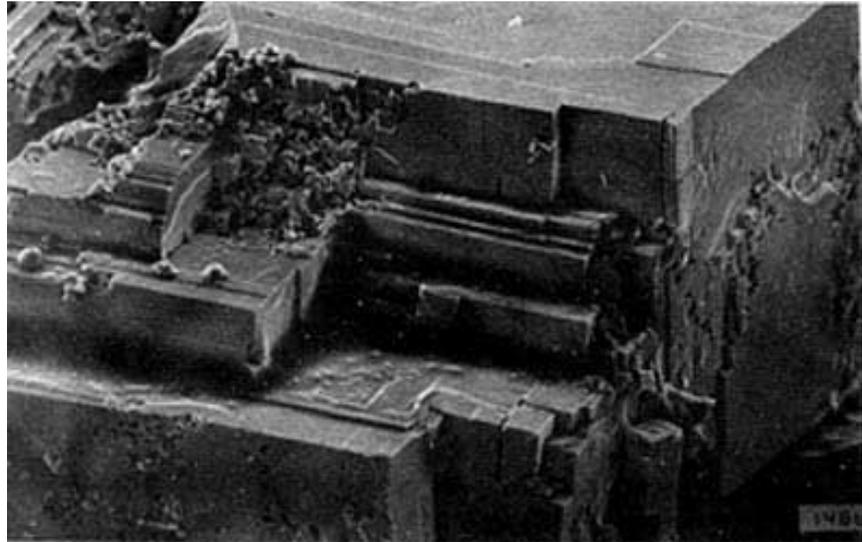


Figura 34. El microscopio electrónico de barrido se usa frecuentemente para estudiar propiedades de materiales. Aquí se observa con claridad la estructura cúbica de la red cristalina de un mineral.

En radioterapia con electrones se usan los aceleradores llamados lineales. En vez de aplicar un voltaje muy alto una sola vez, el principio de su funcionamiento es el de aplicar altos voltajes modestos repetidamente. Mejor aún: en la actualidad se usa la técnica de empujar un conjunto de electrones con una onda eléctrica de velocidad creciente, algo así como un deslizador que se acelera montado sobre una ola frente a la playa.

Si uno quiere acelerar núcleos atómicos en vez de electrones, hay dos diferencias esenciales en la técnica requerida: *a)* el alto voltaje debe ser positivo para repeler la carga positiva de los núcleos, y *b)* en vez de filamento se necesita una fuente de iones, en la cual se ioniza un gas para separar los núcleos y luego poderlos acelerar. Por lo demás los aceleradores de iones positivos se parecen mucho a los de electrones. Tal vez podría mencionarse una diferencia en los tamaños de imanes requeridos para desviar unos y otros: un lanzador de martillo necesita mucha más fuerza para girar la bola que si uno amarrara una canica a un hilo y la hiciera dar vueltas; análogamente, siendo los iones positivos miles de veces más pesados que los electrones, se necesitan imanes mucho más grandes para desviarlos. Casi siempre los aceleradores de iones van acompañados de imanes de hierro de varias toneladas (Fig. 35).

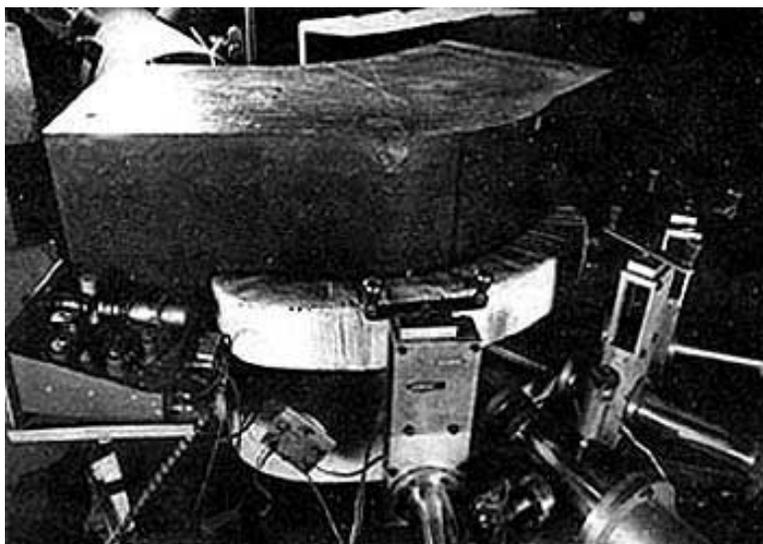


Figura 35. Electroimán de dos toneladas que va conectado al acelerador Van de Graaff de 700 keV del Instituto de Física de la UNAM. Las tuberías de la derecha son salidas para el haz de iones

positivos.

Los mismos modos ya mencionados de obtener altos voltajes se aplican a los aceleradores de iones. Estos se volvieron tan fáciles de adquirir que en las décadas de los años 50 y 60 la mayoría de las grandes universidades del mundo poseían uno con el propósito principal de investigar la estructura de los núcleos mediante reacciones nucleares. El Instituto de Física de la UNAM cuenta con un Van de Graaff de 700 keV, y se está instalando otro de 5.5 MeV. Una variedad interesante del acelerador electrostático es el llamado Tandem, uno de los cuales se encuentra en el Centro Nuclear de Salazar. En él se usa un método ingenioso de manipulación de átomos para duplicar la energía. Así, con 6 000 000 de volts se logran energías de protones de 12 MeV.

El ciclotrón fue uno de los primeros aceleradores de iones positivos. En él se usa el principio de los aceleradores lineales de aplicar un voltaje repetidas veces a la partícula. Para poder usar sólo dos electrodos, todo se pone dentro de un campo magnético para que regresen y pasen de uno a otro, cada vez con más energía y órbita más amplia (véase la Fig. 36). Tras los ciclotrones surgieron los sincrociclotrones, los sincrotrones y otros, cada uno con más energía y por lo tanto más grande.

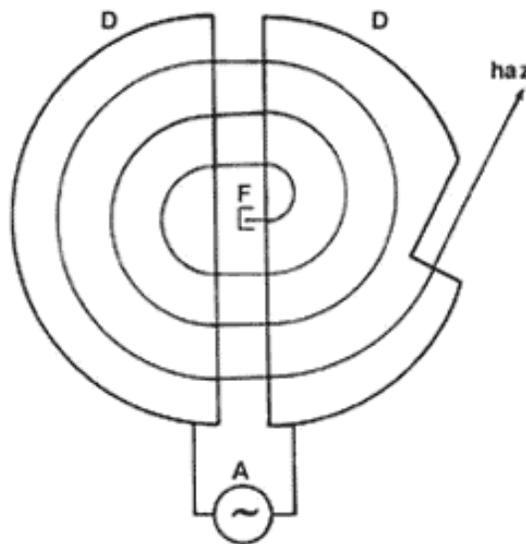


Figura 36. Esquema simplificado de un ciclotrón. Una fuente de alimentación A aplica un voltaje alterno a los dos electrodos en forma D. Todo está dentro de un campo magnético perpendicular al papel, así que los iones que salen de la fuente de iones F siguen trayectorias curvas. Al pasar alternadamente de un electrodo a otro, son acelerados.

La física nuclear y la física de las partículas elementales necesitan información de experimentos con proyectiles cada vez más energéticos. Cuanto más profundamente se indaga dentro del núcleo, más energía se necesita. Por eso la tendencia es hacia aceleradores más grandes. En la actualidad se trabaja con instalaciones verdaderamente gigantescas. Por ejemplo, el Tevatron II de Fermilab, en los Estados Unidos, produce proyectiles de 800 GeV, o sea, 800×10^9 eV; tiene un diámetro de 2 km., y en el interior del anillo pasta una manada de búfalos. En el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN) ubicado en Suiza se tiene un acelerador que hace chocar dos haces de partículas, cada uno de 300 GeV, para un total de 600 GeV; su diámetro es de 2.2 km. Estas instalaciones rebasan totalmente las posibilidades de las universidades, por lo que muchos de los experimentos de física nuclear y física de altas energías se efectúan ahora en grandes laboratorios nacionales o multinacionales. Estos laboratorios están abiertos a científicos de todo el mundo interesados en usarlos para sus experimentos.

En la actualidad se está trabajando en el proyecto de lo que será el goliat de dos aceleradores. Se trata del SSC (Superconducting Super Collider), un doble anillo cuyo diámetro será de entre 30 y 60 kilómetros. En cada anillo se acelerarán protones en sentidos opuestos para finalmente hacerlos chocar con energía de 40 TeV (40×10^{12} eV). Una estimación de su costo, incluyendo equipo periférico, es de 4 000 millones de

dólares; podría subir hasta 6 000 millones.

Vale la pena ahora preguntarse cuál será el siguiente paso. De construirse el SSC seguramente se obtendrá una cantidad nueva de información que nos ayude a esclarecer aún más los secretos de la naturaleza. De antemano nadie sabe cuántos descubrimientos habrá y si estos descubrimientos serán acordes con la visión actual de la materia y las fuerzas, o habrá que producir nuevas teorías que a su vez requieran de más información para probarse. ¿Habrá límite? Hasta ahora, siempre que se ha pensado haber llegado ya al final de la explicación, han surgido nuevos fenómenos. Por ejemplo, cuando se consideraba al átomo como la partícula indivisible, surgió la radiactividad y los rayos X, que no se podían explicar. Considerados en un principio como rarezas, llevaron, sin embargo, al descubrimiento de los electrones y los núcleos. De ahí a los protones y neutrones, a los mesones y neutrinos, y a muchas partículas más, hasta los cuarks y los gluones. Algunos científicos sienten que no hay razón para pensar que éste será el final.

Seguramente llegará el tiempo en que la demanda de medios para seguir con la búsqueda rebasa las posibilidades económicas de cualquier país o grupo de países. Más que conformarse, los científicos seguramente buscarán nuevas opciones, pues la curiosidad humana no tiene límites. Una posibilidad sería desarrollar nuevos conceptos y tecnologías para la fabricación de aceleradores que fuesen más sencillos y baratos. Otra sería aprovechar nuevamente el gran acelerador que es el universo, que con sus campos en continuo cambio, nos bombardea con rayos cósmicos todavía de mayor energía que el SSC. Sin embargo, esta última opción está limitada por la pequeña cantidad de rayos cósmicos que nos llega.

La verdad es que la tecnología de aceleradores siempre ha estado estrechamente ligada con el desarrollo, y los países industrializados han sabido aprovechar esta tecnología en multitud de aplicaciones que a su vez propician el desarrollo. Podemos mencionar, como ejemplos, la tecnología de los altos vacíos, la microelectrónica, los campos magnéticos, la computación, las altas frecuencias, los detectores de radiación y la radioterapia. Los aceleradores de iones positivos de energías menores (de los keV a los MeV) se usan ahora en toda una serie de aplicaciones y también en investigación básica.

Un ejemplo es la implantación de iones. Como su nombre lo indica, con esta técnica se toman iones energéticos producidos en un acelerador y se lanzan sobre un sólido. Su alta energía hace que penetren cierta distancia en el sólido, y luego quedan inmóviles a una profundidad determinada, constituyendo una imperfección en el material. La implantación de iones escogidos apropiadamente, y a una profundidad también seleccionada, permite crear nuevos materiales o cambiar las propiedades de los materiales conocidos. La aplicación más notable de la implantación se encuentra en la electrónica moderna, en la creación de microcircuitos, gracias a los cuales se pueden hacer cosas cada vez más complejas y a un costo que se reduce cada vez más. Por ejemplo, una computadora que hace 30 años ocupaba un cuarto grande completo ahora equivale a una calculadora de mano. Los microcircuitos que han permitido esto están hechos de silicio al cual se le han introducido, por implantación de iones, pequeñas cantidades de átomos extraños para darle sus propiedades de semiconductor. Las superficies de metales, por su lado, también mejoran en cuanto a dureza, resistencia al desgaste y fricción, si se les implantan átomos apropiados.

Otro uso que se da en la actualidad a los aceleradores es como instrumentos analíticos, por ejemplo, para producir la activación con neutrones. En esta técnica se producen reacciones nucleares que generan grandes cantidades de neutrones. Éstos, al incidir sobre una substancia, la vuelven radiactiva, gracias a lo cual se pueden después identificar los elementos de la substancia por los rayos γ característicos que emiten. Otro modo de analizar la substancia en cuestión es bombardearla directamente con un haz de protones; éstos ionizan al material, que luego emite rayos X. Nuevamente, los rayos X son característicos del material y se pueden identificar los elementos que lo componen.

Más adelante tendremos oportunidad de describir otras técnicas analíticas que se apoyan en los aceleradores. Pero por el momento volvamos a la descripción de otras fuentes de radiación. Una fuente muy importante es el reactor nuclear, que además de tener capacidad de producir energía que se usa comercialmente, genera radiación, por lo cual forzosamente hay que cumplir con requisitos muy especiales en el diseño de los reactores y sus edificios.

En realidad, en un reactor nuclear la radiación no es un producto secundario indeseado, sino que es parte integral de su operación, sin la cual no funcionaría. Los reactores nucleares trabajan a base de fisiónar (o sea romper en dos partes) núcleos pesados, como el de uranio o plutonio. La ecuación de Einstein $E = mc^2$ rige el comportamiento de una fisión nuclear, y como la masa del núcleo original (v. gr., el uranio) es mayor que la suma de las masas de los fragmentos que salen, el sobrante se convierte en energía cinética de los fragmentos. Éstos calientan el material del derredor al atravesarlo (véase la Fig. 37). En una planta nuclear este calor se convierte en electricidad.

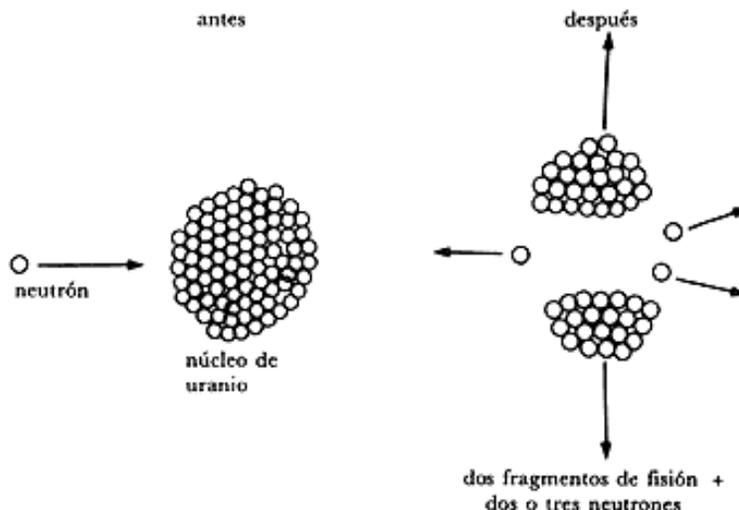


Figura 37. En una fisión nuclear de uranio es partido por un neutrón. Los fragmentos que resultan se reparten la energía excedente.

La reacción de fisión es provocada por un neutrón. De hecho existe la fisión espontánea, pero es muy rara, así que para provocarla artificialmente se usa una fuente de neutrones. Ahora bien: fortuitamente la fisión nuclear produce neutrones de alta velocidad además de los dos fragmentos pesados, y estos neutrones pueden ser forzados a producir nuevas fisiones en otros núcleos de uranio. Se produce así la llamada reacción en cadena, que permite que un reactor produzca de manera controlada gran número de fisiones y, por lo tanto, mucho calor para generar electricidad. Se dice que un reactor es crítico cuando una vez encendido mantiene su operación continua en base a la reacción en cadena (véase la Fig. 38).

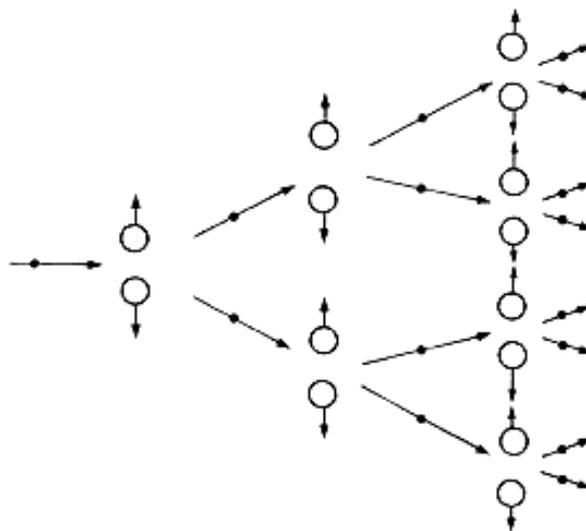


Figura 38. Una reacción en cadena. Los puntos representan neutrones y los círculos núcleos fisionados. Si de cada fisión salen dos neutrones, y cada uno produce una nueva fisión, el número de fisiones se duplica en cada paso: 1, 2, 4, 8, 16, 32, etcétera.

El diseño de un reactor nuclear es muy complicado, pues hay que garantizar varias cosas. Para empezar se necesita que haya suficientes núcleos de uranio fisionable (masa crítica). El mineral de uranio contiene 99.27% de ^{238}U y sólo 0.72% de ^{235}U pero el isótopo que se fisiona es el 235. Esto obliga a separar los isótopos en el mineral y enriquecerlo en el 235. La tecnología del enriquecimiento de uranio es básica para el desarrollo de la energía nuclear. Se han usado varios métodos para lograrlo; entre ellos, la separación magnética, la difusión gaseosa y las ultracentrífugas. La masa crítica de uranio es la cantidad que garantiza la reacción en cadena sostenida en un reactor.

En segundo lugar, se requiere que haya suficientes neutrones para sostener la reacción en cadena. Por cada neutrón que produce una fisión salen dos o tres, así que parecería que el proceso está asegurado. Sin embargo, se deben cuidar varios aspectos. Uno es que los neutrones no se vayan; es decir, que los que escapan deben ser reflejados otra vez hacia el corazón del reactor, donde está el uranio. Otro es evitar que desaparezcan al ser absorbidos por los materiales circundantes, lo cual restringe los elementos y su pureza que se pueden usar en un reactor. También sucede que los neutrones producen fisiones preferentemente cuando tienen baja velocidad, o sea, cuando son térmicos, por lo que se requiere un material moderador que en unos cuantos choques les reduzca la energía.

Un reactor debe tener también un mecanismo de control para regular su nivel de operación. Esto se logra con barras de un material que absorba gran cantidad de neutrones, como el cadmio, y que puedan introducirse o sacarse según se desee frenar o permitir la reacción en cadena. Estas barras de control también pueden apagar el reactor en caso necesario, por ejemplo, si la temperatura se eleva demasiado.

Los reactores de potencia necesitan, además, un medio que pueda conducir el calor producido, por ejemplo, para mover las turbinas generadoras. En la mayoría de los reactores este medio es agua o vapor a alta presión y alta temperatura. Este medio envuelve al uranio y necesariamente afecta a los neutrones que se producen, así que debe tener propiedades acordes con la operación del reactor.

Finalmente, entre los factores más importantes del diseño de un reactor está la selección de los materiales que soporten la alta temperatura y la radiación intensa. El uranio generalmente se usa en forma de pequeños cilindros de óxido de uranio contenidos dentro de una vaina de una aleación a base de zirconio. Un conjunto de estas barras forma el corazón del reactor. Cuando el uranio se agota, pueden ser substituidas una por una. Estos materiales, además de encontrarse a alta temperatura, están sujetos a una enorme cantidad de radiación, la cual les produce daños estructurales que dan lugar a deterioro, corrosión y fallas mecánicas. El estudio de daños por radiación en materiales resulta de gran importancia.

Aunque de un reactor a otro hay diferencias de diseño importantes, las partes básicas se muestran esquemáticamente en la figura 39.

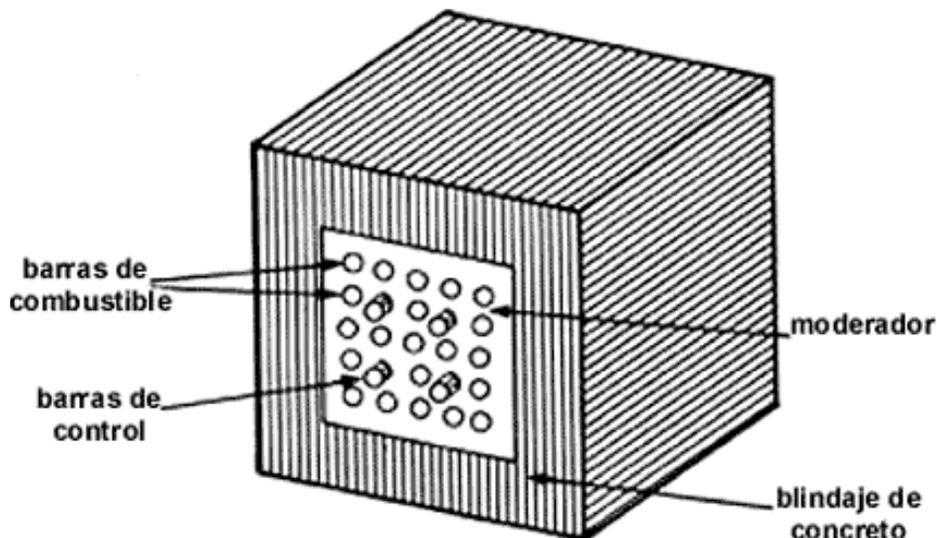


Figura 39. Esquema de un reactor nuclear típico.

¿Cuáles son entonces las radiaciones que salen de un reactor nuclear? En primer lugar, los neutrones. Los reactores de potencia están diseñados para que los neutrones estén confinados en el área central del reactor donde sostienen la reacción. En los reactores de investigación se tienen tubos evacuados por los que se permite la salida de un haz de neutrones para hacer experimentos de física nuclear. Incluso se emplean dispositivos llamados monocromadores que seleccionan su energía, dejando pasar neutrones monoenergéticos. Éstas son las fuentes más intensas y controladas de neutrones; con ellas se hacen experimentos de difracción de neutrones en sólidos, de análisis por activación, de reacciones nucleares, de radiografías con neutrones y muchos más. Estas instalaciones, junto con los aceleradores de partículas, constituyen las herramientas más poderosas para la investigación nuclear.

Otra radiación importante en los reactores es la producida mediante la activación por bombardeo de neutrones. Ciertos elementos los pueden absorber, y con ello se transforman isótopos radiactivos. Esta es la técnica para producir radioisótopos, que han tenido diversos usos. Sin embargo, se quiera o no, en las inmediaciones del corazón de un reactor hay un intenso bombardeo de neutrones sobre todos los materiales, y algunos de ellos se activan, como el gas argón (Ar) del aire, que activándose forma ^{41}Ar , emisor de partículas β de vida media de 109 minutos. El diseño del edificio de un reactor debe estar provisto de sistemas para impedir el escape de sustancias activadas.

Finalmente, los reactores producen radiación porque los productos de fisión generalmente son radiactivos. Estos fragmentos de la fisión del uranio quedan en los elementos combustibles después de que se gastó el uranio y hay que extraer las barras. La gran mayoría son de vida media muy corta, pero hay algunos, como el ^{90}Sr y el ^{137}Cs , que tienen vidas medias de alrededor de 30 años, y cuya actividad, por lo tanto, persiste largo tiempo. Se tiene que disponer de estas barras usadas de manera que no constituyan un peligro ni en el presente ni en el futuro.

Las explosiones nucleares producen de manera no controlada gran cantidad de productos de fisión y productos de activación nuclear. En los años 50, en que las pruebas de explosiones se hacían al aire, estas sustancias radiactivas entraban a la atmósfera y luego a la estratosfera para después caer lentamente y diseminarse sobre todo el globo terrestre. Esta precipitación radiactiva se evita en la actualidad, pues los países que detonan bombas lo hacen bajo tierra, y por lo tanto la contaminación es sólo local.

Como ya lo dijimos, los reactores nucleares tienen la capacidad de producir radioisótopos, que a su vez son fuente de radiación. Si uno coloca de propósito ciertos elementos en el corazón de un reactor, el bombardeo los puede volver radiactivos. Por ejemplo, un compuesto de sodio puede sufrir la reacción $^{23}\text{Na} (n, \gamma) ^{24}\text{Na}$, y el ^{24}Na es radiactivo: emite partículas β con vida media de 14.8 horas. La técnica permite obtener gran variedad de radioisótopos de diversos usos, como el ^{32}P , el ^{60}Co , el ^{131}I , el ^{198}Au , y muchos otros. Los radioisótopos tienen la particularidad de que pueden ser transportados al sitio donde se usan. Pueden servir para registrar flujos de líquidos, con lo cual se evita el empleo de grandes aparatos. Pueden inyectarse al organismo para diagnóstico médico. Se puede tener en una cápsula pequeña una radiación grande, circunstancia que les da gran utilidad pero que también los vuelve peligrosos si se les da mal uso.

También es posible obtener fuentes radiactivas tan sólo aislando químicamente elementos que aparecen en la naturaleza, como el radio o el americio; los primeros trabajos de investigación sobre radiación fueron hechos con este tipo de fuente.

Comentemos ahora sobre un aspecto que parece trivial, pero que puede ser de gran importancia. No es posible apagar los radioisótopos como las otras fuentes de radiación artificial. Una vez creado el radioisótopo, decae con su propia vida media, y nada lo puede impedir, salvo una nueva transformación nuclear (caso poco probable). Por ejemplo, el ^{60}Co de un irradiador de hospital continuamente emite rayos γ . Se le coloca dentro de un recipiente con blindaje de plomo con una compuerta que se abre para dejar salir la radiación en el momento que se desee, pero el cobalto nunca deja de emitir. Esto lo hace sumamente confiable como fuente de radiación, pero al mismo tiempo exige atención constante para

impedir que por equivocación se abra la compuerta, o peor aún, que la fuente sea extraída indebidamente de su recipiente blindado. Esta clase de accidente ha sucedido y ha costado vidas. Los aceleradores, en cambio, pueden apagarse, con lo cual cesa al instante toda la radiación; basta con desconectarlo. Su radiación puede ser letal, pero es posible interrumpir su operación en el momento que se desee.

No sería completa nuestra descripción de fuentes de radiación sin mencionar las fuentes portátiles de neutrones en contraste con las fuentes fijas, que son los aceleradores y los reactores. Se trata de fuentes radiactivas que emiten partículas α , como el radio o el americio, en forma de polvo, que se mezclan con polvo de berilio para provocar la reacción ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$, que tiene una copiosa producción de neutrones. La cápsula es pequeña y se puede transportar para estudios de campo; por ejemplo para medir, la humedad del subsuelo o la presencia de hidrocarburos mediante la dispersión de neutrones.

Cuadro 7. Fuentes y radiaciones que producen

<i>Fuente</i>	<i>Radiación producida</i>
radiación cósmica	$e^-, e^+, \gamma, p, n, \pi, \mu$
minerales radiactivos y sus subproductos	$\alpha, \beta^\pm, \gamma$
aceleradores	$p, e, \text{iones pesados}, \alpha, \beta^\pm, \gamma, n,$ $X, \pi, \text{otras partículas elementales}$
reactores nucleares	$n, \text{productos de fisión}, \beta, \gamma,$ radioisótopos
radioisótopos	$\alpha, \beta^\pm, \gamma, (n)$

Por todo lo aquí expuesto, resulta evidente que por un lado estamos inevitablemente expuestos a cierta cantidad de radiación del medio ambiente, y por otro lado el hombre se las ha ingeniado para crear muchas fuentes distintas de radiación. El cuadro 7 es un resumen de algunas de las fuentes y el tipo de radiación que producen. Esta radiación, bien usada, puede producir múltiples beneficios a la humanidad.

Indice



VI. CUANTIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN

SI UNO quiere poner en práctica cualquier fenómeno físico, se necesita cuantificarlo. El caso de la radiación no se escapa. Es evidente que no es lo mismo decir que de vez en cuando pasó un neutrón por allí que aseverar que se necesita un muro de un metro de espesor de concreto para que la dosis recibida no rebase el máximo permitido. La información que dan los detectores debe usarse con números y criterios adicionales que nos ayuden a calcular sus efectos. Cuantifiquemos, pues, la radiación.

Pensemos en un detector cualquiera que nos da un pulso cada vez que pasa una radiación. Como las radiaciones llegan aleatoriamente, contemos por un tiempo largo, por ejemplo, 10 000 segundos. Si en este lapso contamos, v. gr., 10 000 radiaciones, decimos que en promedio llegó una radiación por segundo. Esto se llama rapidez de conteo. La rapidez de conteo multiplicada por el tiempo de conteo da el número total de radiaciones contadas. Esto ya es un dato valioso, pero falta todavía información que nos permita evaluar con más exactitud el fenómeno. Por ejemplo, no sabemos de qué dirección vino la radiación, dónde está la fuente, de qué tipo es, qué energía tiene, si el detector contó todas las radiaciones que llegaron o sólo una parte, cuánta ionización produce la radiación o qué efectos biológicos puede tener.

Comencemos por pensar en la geometría del haz de un acelerador, que podemos imaginar como el chorro de una manguera. Todas las partículas viajan en la misma dirección y llevan la misma energía. Hay un colimador que define el área transversal del haz, como se muestra en la figura 40. Lo que nos determina la intensidad de flujo del haz es el número de partículas que atraviesan el área A en un segundo. Por ejemplo, en un acelerador típico 10^{12} protones cruzan el área de 1 mm^2 por segundo. Ahora bien: sabemos que los protones tienen carga eléctrica, así que el haz constituye una corriente eléctrica que se puede medir con un amperímetro convencional de corriente directa pero muy sensible, pues 10^{12} protones/seg. equivalen a 0.16×10^{-6} amperes, o 0.16 microamperes. Nótese que en los aceleradores, aunque la corriente eléctrica sea pequeña, la cantidad de partículas es grande. Si uno multiplica esta corriente de haz por el número de segundos de exposición se obtiene el número total de partículas. Por ejemplo, si se irradia una hora (3 600 seg.) con un haz de 0.16 microamperes (10^{12} protones/seg.), llegará un total de $3\,600 \times 10^{12} = 3.6 \times 10^{15}$ protones al blanco.

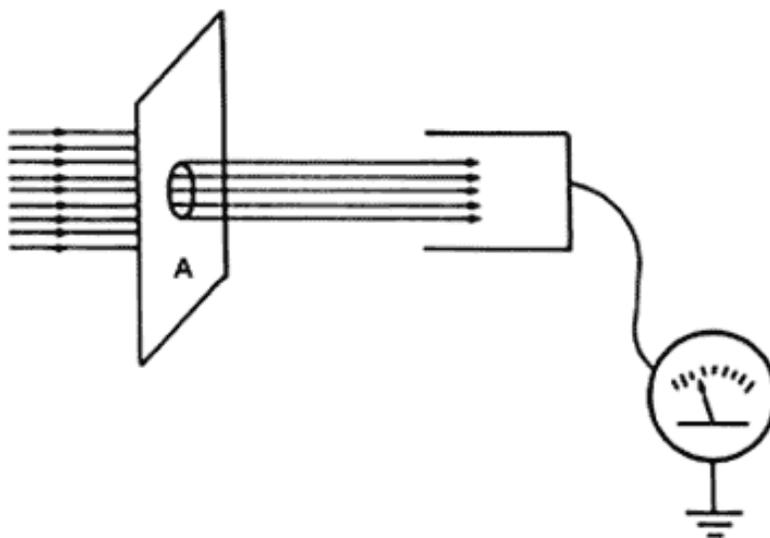


Figura 40. Un haz de partículas cargadas constituye una corriente eléctrica que se mide con un amperímetro.

El lanzar proyectiles como en un acelerador nos permite dilucidar el tamaño del blanco al que le pegan, por ejemplo, un núcleo. Imaginemos el siguiente experimento: una mesa con una moneda en el centro, y desde el décimo piso le lanzamos canicas. Desde tal alto perdemos el tino, así que las canicas caen por casualidad en diferentes puntos de la mesa. Si la moneda es pequeña, será difícil pegarle, y decimos que la

probabilidad de choque es baja. En cambio si ponemos un plato, podremos pegarle con más frecuencia. Es claro que cuanto más grande sea el blanco, le pegaremos más frecuentemente: la probabilidad será mayor. Esta técnica de averiguar tamaños según la frecuencia de choques se usa para medir el tamaño del núcleo. La probabilidad de choque se llama sección transversal.

Hay otra técnica para cuantificar el haz de partículas de un acelerador, usando un calorímetro. Por ejemplo, si la energía del haz de protones que hemos mencionado es 1 MeV, cada protón le transmite al dispositivo receptor del haz una energía equivalente a 3.8×10^{-14} calorías; el haz de 10^{12} protones por segundo calentará al receptor en 0.038 calorías, o 0.16 watt cada segundo. Por lo tanto, midiendo el calentamiento del receptor se conoce no sólo el número de partículas que llegaron, sino también su energía promedio.

Desde luego, no todas las fuentes de radiación producen un haz de partículas como los aceleradores. Otra geometría común es la fuente puntual (o casi puntual) en que generalmente se encuentran los radioisótopos. En este caso la radiación sale de un punto hacia todas direcciones, y la intensidad recibida por un objeto dado disminuye a medida que se aleja, como se ve en la figura 41. Disminuye con el cuadrado de la distancia; es decir, si la distancia se duplica, la intensidad recibida se divide entre 4. Ésta es la misma ley que rige, por ejemplo, a la iluminación de un objeto por un foco. Se debe sólo a la geometría. Si además hubiese absorción por parte del medio, la iluminación disminuiría aún más.

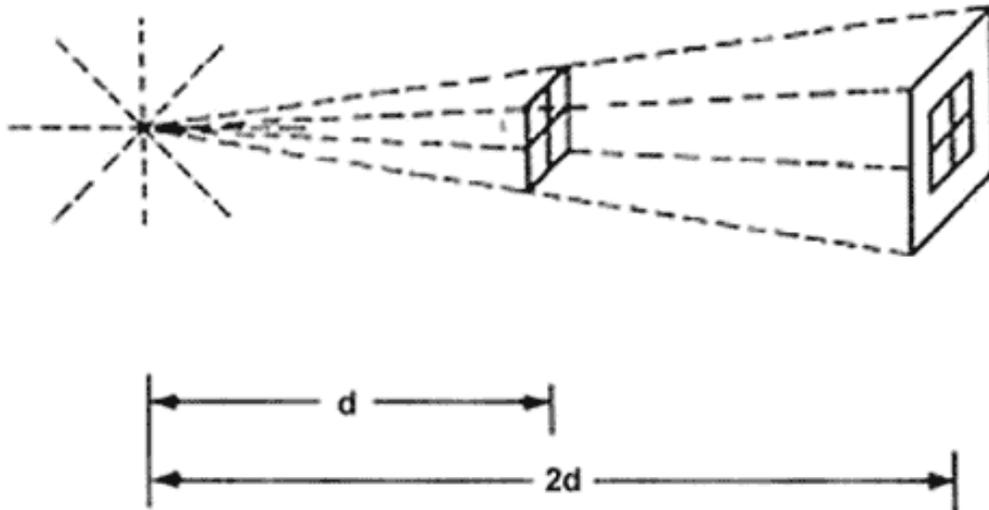


Figura 41. Un objeto colocado a una distancia d de la fuente de radiación recibe una dosis determinada, la cual se reduce a la cuarta parte si el objeto se aleja a una distancia $2d$.

La intensidad de una fuente radiactiva se mide en desintegraciones por segundo. La unidad más empleada es el curie (Ci), que equivalen a 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. También se define el becquerel (Bq) como una desintegración por segundo. Cuando uno compra una fuente radiactiva hay que especificar su intensidad en una de estas unidades.

Muchas veces está uno interesado en los efectos que puede producir una fuente radiactiva, más que en el número de emisiones. Por ejemplo, un curie de emisor rayos de γ puede tener efectos muy distintos que un curie de emisor de partículas β . Estos efectos son debidos principalmente a la ionización y excitación del material absorbente, y en último caso a la energía que la radiación deposita en él. Por esa razón hay una serie de unidades de dosis absorbida, como el roentgen (R), que describen más fielmente lo que la radiación puede hacerle a una substancia. Un roentgen es la cantidad de radiación X o γ que produce determinada ionización en un cm^3 de aire. Corresponde a una absorción de 84 ergs de energía por un gramo de aire. Un erg corresponde a 2.39×10^{-8} calorías. El roentgen es casi equivalente al rad, que corresponde a la cantidad de radiación que depositan 100 ergs de energía en un gramo de substancia. La otra unidad usual es el gray (Gy), que es igual a 100 rads.

La llamada dosis equivalente es una medida más precisa del posible daño biológico. Toma en cuenta cómo se distribuye la energía depositada. La unidad es el rem, que corresponde a un rad de rayos X, γ , o electrones. Un mrem es un milésimo de rem.

Ahora bien: estas unidades, aunque están bien definidas y se usan cotidianamente, no nos dicen nada si no tenemos puntos de comparación. Con este objeto se elaboró el cuadro 8, que da ejemplos de cantidades de radiación típicas de diversas fuentes y distintos usos. Hay que recalcar que cada situación de uso de radiación es distinta, dependiendo de factores como tipo y energía de la radiación, su concentración, la geometría del dispositivo y muy especialmente el tipo de tejido que la puede recibir. Se investiga continuamente sobre cómo utilizar la radiación con el máximo de seguridad.

Cuadro 8. Cantidades de radiación típicas de diversas fuentes.

Radiactividad natural (promedio)	100 mrem/año
Radiografía de Tórax	20 mrem
Radiografía dental	1000 mrem
Vuelo trasatlántico	5 mrem
Preservación de papas por radiación	5000 ras
Destrucción de salmonelas	1,000,000 rads
Esterilización de insectos	50,000 rads
Dosis máxima permitida a personal que trabaja con radiación	5 rem/año ó 100 mrem/semana

Se pueden comprar medidores de radiación que dan directamente la dosis en rem o en mrem. Sin embargo, se deben tener algunas precauciones. Uno de los problemas que puede surgir es que el detector no sea el apropiado para la radiación que está presente. En general los detectores son sensibles a rayos X y γ , y a electrones o partículas β . Si uno trata de medir neutrones, por ejemplo, no sirven, pues, como ya vimos, éstos requieren de técnicas especiales para ser detectados. Puede uno estar en un campo intenso de neutrones sin que el medidor lo indique si no es el adecuado. Otro error que puede suceder es que el tipo de radiación, o su energía, sea tal que no alcance a penetrar la ventana del detector y éste, por lo tanto, no cuente nada. Siempre se debe conocer la radiación y usar el detector apropiado; además, hay que recordar que cada uno tiene su propia eficiencia. Si cuenta toda la radiación que pasa por él, tiene 100% de eficiencia; si cuenta sólo una de cada 100 que pasan, tiene 1% de eficiencia. La cantidad real de radiación es el número de cuentas dividido entre la eficiencia del detector.

Otro efecto que puede ser importante, especialmente en el cálculo de blindajes, es la radiación secundaria, la cual no proviene de la fuente principal, sino de otros materiales en los cuales se refleja (véase la Fig.

42). Las radiaciones secundarias pueden venir del aire, del techo o del blindaje mismo, y esto desvirtúa los valores obtenidos de cálculos directos. Su cantidad depende tanto del tipo y energía de la radiación, como de la forma y dimensiones del edificio.

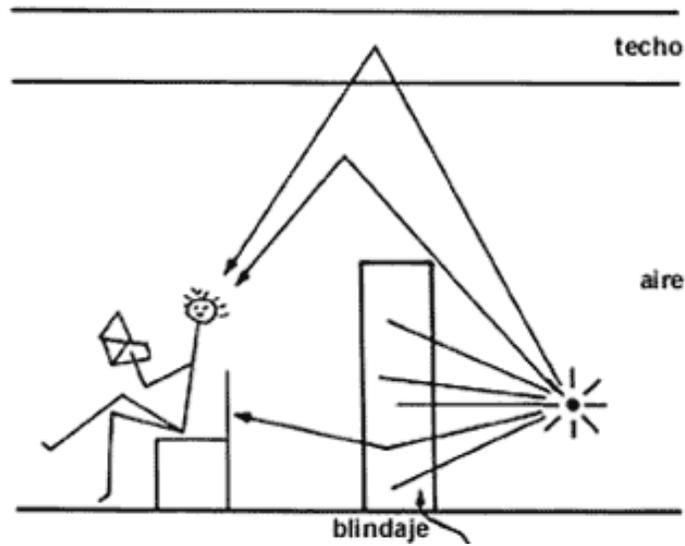


Figura 42. Aunque el blindaje detiene la radiación directa, otros materiales, como el techo, las paredes, el aire y el blindaje mismo, pueden producir radiación secundaria.



VII. RADIACIÓN Y MEDIO AMBIENTE

EL HOMBRE, como todo ser vivo, está en contacto con un ambiente que regula su vida. Los factores ambientales se mantienen aproximadamente constantes; si se apartan de sus niveles normales, el hombre se siente incómodo o incluso muere. Tomemos como ejemplo el factor temperatura, que puede tener valores desde el cero absoluto (-273 °C) hasta los millones de grados que hay en el Sol. De toda esta vasta gama, el hombre sólo puede mantenerse vivo en un pequeño intervalo de aproximadamente entre 0 °C y 40 °C. Nuestros cuerpos se han adaptado a lo largo de millones de años para operar en este intervalo. Si la temperatura ambiente rebasa esos índices, en poco tiempo morimos.

Otros factores ambientales, algunos muy discutidos y otros poco evidentes pero igualmente vitales, son la humedad, la presión atmosférica, el nivel de ruido, la calidad del aire, agua y alimentos, los organismos patógenos, la luz solar y la artificial, la fuerza de la gravedad y los factores sociales. A esta lista, que se puede ampliar bastante con un poco de observación a nuestro derredor, vamos a agregar la radiación ionizante.

Efectivamente, estamos expuestos todo el tiempo a radiación sencillamente porque somos parte de la naturaleza. Aunque no la percibimos, está y ha estado aquí desde que se formó nuestro planeta. Nos llega de todos lados: del espacio exterior de las paredes de la habitación, del aire que respiramos y del alimento que ingerimos. Por supuesto, estamos adaptados a tolerarla mientras se mantenga dentro de ciertos límites. De no ser así, habría trastornos, como los habría, por ejemplo, si repentinamente la presión atmosférica disminuyera a una décima parte de la actual.

El género humano ha aprendido, a lo largo de su desarrollo físico y mental, a modificar su entorno de acuerdo con sus necesidades. El simple uso de vestimenta para poder soportar mejor los extremos de temperatura es una muestra de este proceso. Pueden agregarse un sin fin de otros ejemplos, como la construcción de viviendas para protegerse del rigor del clima; la higiene de los alimentos para evitar enfermedades; el desarrollo de medicamentos, mediante los cuales se ha logrado prolongar la esperanza de vida; la luz eléctrica, que nos permite aumentar las horas productivas; el transporte y las comunicaciones, que nos amplían el radio de acción; la producción de herramientas, que nos facilitan las tareas; y hasta los diversos sistemas económicos, establecidos según los designios de unos y otros, pero siempre con la esperanza de mejorar el ambiente en que vivimos. Cuando ya están satisfechas las necesidades primarias, buscamos entonces la belleza, la calma, la recreación del intelecto y la diversión, también factores ambientales.

Ahora bien: todos estos cambios tienen su costo, y siempre se debe establecer un equilibrio entre éste y los beneficios que se generan. Además, es posible que los beneficios para unos sean costo para otros. En último caso, la lucha cotidiana del hombre para sobrevivir no es más que una continua defensa de su medio ambiente, comenzando en el hogar y llegando hasta los conflictos entre naciones.

En términos ambientales, podríamos analizar beneficios y costos de algunos procesos, como, por ejemplo, de la electricidad. Nadie duda de los beneficios de la corriente eléctrica: nos proporciona luz, calor, fuerza motriz, sonido, y a tal grado nos hemos acostumbrado a ella que ya no concebimos poder seguir desarrollándonos sin su ayuda. Difícilmente podemos cuantificar estos beneficios, aunque sí sabemos el costo de la electricidad que usamos: la cuenta mensual nos lo dice. Pero aparte de este costo, que nosotros subsanamos en pesos, hay otro más remoto pero no menos tangible, que es la repercusión en el ambiente. Si la electricidad nos llega proveniente de una presa, el costo está en reubicación de poblados, en pérdida de terreno productivo y en extinción de especies biológicas; si viene de una planta termoeléctrica, provoca humos y destrucción de un recurso no renovable, el petróleo, cuya obtención a su vez implica deterioro biológico de regiones enteras, problemas de transporte y peligros físicos para los trabajadores.

Dentro de este panorama, podemos ahora preguntarnos dónde entra la radiación ionizante. Sabemos que

existe naturalmente, sabemos que se han obtenido grandes beneficios de ella, sabemos que el hombre tiene la capacidad de producirla y que puede tener repercusiones ambientales. Como ya vimos en otro ejemplo, cuantificar los beneficios en función de los costos es difícil, pero por lo menos conviene conocer la realidad hasta donde sea posible, para no exagerar ni despreciar su importancia.

Sobre la cantidad de radiación que recibimos del medio ambiente, lo primero que se debe reconocer es que de un lugar a otro hay grandes diferencias. Las medidas hechas en un sitio o en un país no necesariamente reflejan los valores en cualquier otro, a causa de las diferencias locales en sistemas de vida o alimentación, o de la altura sobre el nivel del mar, o de la cercanía de yacimientos minerales. Se conocen dosis promedio recibidas por la población mundial, que si bien no son siempre aplicables, sí reflejan a grandes rasgos niveles generales o tendencias. En México se han efectuado pocas mediciones de la radiación ambiental, pero en general no hay razón para pensar que el nivel se aleje demasiado de los promedios conocidos.

Consideremos la radiación cósmica en primer lugar. Se ha observado que, en virtud del campo magnético terrestre, es más intensa cerca de los polos que en el ecuador. A nivel del mar, cerca del ecuador se reciben 35 mrem/año mientras que a 50° de latitud se reciben 50 mrem/año. Recuérdese que la dosis máxima permitida al personal que trabaja con radiación es de 5 rem/año así que la radiación cósmica es del orden de 1% de aquella. La altura sobre el nivel del mar tiene un efecto mayor en la dosis debida a los rayos cósmicos, pues a mayor altitud hay menos atmósfera que los atenúe. En nuestro altiplano, alrededor de los 2 000 metros sobre el nivel del mar (msnm), recibimos como 100 mrem/año; en nuestros volcanes de 5 000 msnm, 300 mrem/año. Un viaje aéreo trasatlántico a 10 000 msnm nos expone a 2 mrem.

La otra fuente importante de radiación ambiental externa al cuerpo es el conjunto de elementos radiactivos en minerales. Estos elementos nos envían radiaciones desde el suelo o desde las paredes de las habitaciones. Los emisores más importantes son el uranio, el torio y el potasio (^{40}K), que están distribuidos en toda la corteza terrestre. El tipo de roca determina la cantidad de radiación; por ejemplo, el granito emite más que la piedra caliza. Claro está que en los yacimientos de uranio la dosis recibida será mayor que el promedio. Tomando en cuenta todos estos factores, se estima que la dosis debida a estos minerales es de 30 a 100 mrem/año. Las paredes de las habitaciones contribuyen con la parte principal; las paredes de concreto o de tabique emiten el doble que las de madera.

Ya hemos mencionado el radón, que es un gas inerte, uno de los productos del decaimiento del uranio. A diferencia de otras sustancias radiactivas que son sólidos, el radón, siendo gas, puede escaparse del mineral de uranio y difundirse en la atmósfera. Entonces lo podemos absorber mediante la respiración, por lo cual son afectados los pulmones. Por razón natural, el radón es más abundante cerca de donde hay uranio: en minas y en la vecindad de fallas geológicas o roca porosa, que permiten su permeación. Emanan del suelo, de grietas, de materiales de construcción, del agua y de las plantas, y se acumula en recintos cerrados sin ventilación. Su vida media es de 3.82 días. Se estima que como una tercera parte de la dosis por radiación natural que recibimos proviene del radón, aunque esto puede variar notablemente de un lugar a otro.

Así como podemos absorber radón al respirar, al alimentarnos ingerimos sustancias radiactivas en pequeñas cantidades. Éstas constituyen una dosis interna variable, según el régimen de alimentación, la edad y la capacidad de eliminar sustancias; se estima que representa alrededor del 20% de la dosis ambiental. El que fuma cajetilla y media al día recibe en los pulmones 8 000 mrem/año debido al polonio que contiene el tabaco.

A medida que se han extendido los usos médicos de la radiación, se ha tenido que considerar ésta como una fuente importante de radiación ambiental. En países que tienen servicios médicos extensos, la radiación de este origen se considera en promedio equivalente al 30% del total de la radiación ambiental. Otra vez este valor cambia de lugar a lugar, hasta llegar a cero en comunidades que carecen de servicios médicos. Un factor que se debe considerar es que, a diferencia de las otras fuentes de radiación que son de dosis bajas presentes todo el tiempo, en este caso se trata de dosis relativamente altas pero suministradas durante lapsos muy cortos y a veces en áreas pequeñas del cuerpo. Típicamente una radiografía de tórax da

20 mrem durante unos segundos, lo cual corresponde a la quinta parte de la radiación natural promediada durante un año. Una radiografía dental puede resultar en una dosis de 1 000 mrem, pero en una región muy limitada de la piel cercana al generador de rayos X. Para el tratamiento de tumores la dosis puede ser de miles de rads; en este caso, sin embargo, hay que poner en la balanza el daño causado al tumor contra el daño al resto del paciente.

Una fuente de radiación ambiental que en un tiempo fue importante pero que en la actualidad resulta de magnitud pequeña es la precipitación radiactiva debida a las explosiones nucleares. En la década de los cincuenta, se podía medir con toda claridad cómo los productos de fisión de tales explosiones se transferían a la atmósfera y a la estratosfera, para luego difundirse a todo el globo y caer lentamente a tierra. Desde que las pruebas nucleares se hacen subterráneas, este efecto se ha detenido, y en la actualidad sólo la mitad del 1% de la radiación ambiental es de origen de explosiones nucleares.

Las plantas nucleares generadoras de potencia emiten también pequeñas cantidades de sustancias radiactivas. En operación normal, éstas equivalen a alrededor de una décima parte del 1% de la radiación ambiental.

La figura 43 muestra un resumen de las fuentes generales de la radiación ambiental en un país desarrollado. Del total, como un 68% proviene de fuentes naturales, que incluyen rayos cósmicos, minerales emisores de rayos gamma y radón. Un 30% proviene de usos médicos de la radiación, y el resto de precipitación radiactiva, de la industria nuclear y de otras fuentes varias.

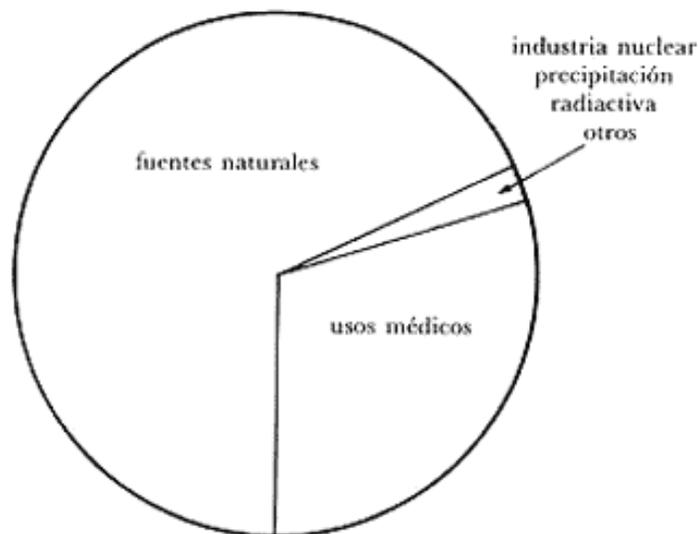


Figura 43. Diferentes fuentes de radiación ambiental y sus contribuciones relativas (en un país desarrollado).

Los efectos que produce la radiación sobre la salud no son únicos; muchas otras sustancias tienen efectos parecidos. Sin embargo, los producidos por la radiación se conocen mejor, lo que permite fijar niveles de seguridad y establecer sistemas de medida y reglamentos que nos protegen de los posibles daños. No hay que olvidar que la radiación siempre ha existido en el medio ambiente, por lo que es inevitable recibir cierta dosis. Por otro lado, es claro que los beneficios producidos por el uso de la radiación y los radioisótopos, especialmente en la medicina, sobrepasan por mucho a los riesgos.

Indice |



VIII. LA RADIACIÓN Y LOS SERES VIVOS

ES INNEGABLE que la radiación afecta a los organismos. Los puede enfermar o curar. Puede ser administrada como cualquier medicina, o tener efectos letales. Depende de cómo se use.

Sabemos que la ionización que produce puede dar lugar a transformaciones químicas en la materia. Si es materia viva, necesariamente interfieren estos cambios con las funciones vitales de las células que reciben radiación. Además, como algunas radiaciones pueden penetrar en el cuerpo, dichos efectos se pueden producir en órganos o en células de muy diversas funciones.

Para tener un punto de comparación, pensemos en una quemadura de Sol. Los rayos solares, principalmente los ultravioleta, producen en la piel efectos que todos conocemos; alguna vez hemos sentido el ardor de una quemadura por exposición al Sol demasiado prolongada. Se debe a los cambios químicos inducidos en la piel, que inclusive pueden matar a las células, como también todos hemos experimentado al desprenderse luego la piel inútil. Ahora bien: la piel está diseñada para soportar estos efectos, pues, al dañarse, fácilmente puede ser reemplazada por nuevas células que a su vez asumen la función vital de proteger al resto del organismo. Las radiaciones ionizantes que penetran en el cuerpo pueden causar daños equivalentes en los tejidos, pero no sólo de la piel, sino de todo el cuerpo. Estos daños pueden resultar permanentes si suceden en órganos que no se regeneran, como el cerebro.

Los efectos que la radiación produce en los organismos se han clasificado en cuatro grupos: los que producen cáncer, las mutaciones genéticas, los efectos en los embriones durante el embarazo y las quemaduras por exposiciones excesivas. Los primeros dos grupos generalmente suceden cuando las dosis recibidas son pequeñas, pero prolongadas. El tercero, en una etapa de la vida en que el organismo es especialmente sensible por estarse reproduciendo sus células a ritmo acelerado. El cuarto sucede en accidentes o en las explosiones nucleares. Se han hecho muchos estudios sobre cómo cada uno de estos casos se presenta bajo diversas circunstancias.

El cáncer se produce cuando una célula recibe daño en su aparato genético, lo cual da lugar a una reproducción desmedida, y por lo tanto a un tumor. La radiación es, de hecho, uno de los agentes que pueden producir el cáncer, aunque no el único: parece claro en la actualidad que puede ser producido por el tabaco, por algunas sustancias químicas y hasta por algunos medicamentos. Se da en muchas partes del cuerpo, pero principalmente en los pulmones, el colon, el recto y en otras partes del aparato digestivo; en los hombres en la próstata; en las mujeres en el pecho y en el útero. También se da en la sangre, apareciendo como un exceso anormal de glóbulos blancos, la leucemia. Los primeros casos de muerte por cáncer atribuible a la radiación fueron Marie Curie y su hija Irene, pioneras en la separación de elementos radiactivos. Ha habido otros casos, especialmente al principio del uso de la radiación, cuando se ignoraba este efecto; luego se advirtió un aumento de cáncer producido por exposiciones prolongadas a radiación. Tristemente célebre es el caso de un grupo de trabajadoras que pintaban con una solución de radio las carátulas de relojes de pulsera para hacerlas luminosas. Para hacer más fina la punta del pincel lo sorbían con la boca. Ha habido casos de trabajadores en minas de uranio que tienen una incidencia de cáncer del pulmón mayor que la normal por respirar radón continuamente.

Aunque la producción de cáncer por radiación está bien documentada, hay una serie de fenómenos que impiden determinar con claridad cuál es el riesgo que se corre al recibir radiación ionizante. La primera es que generalmente tardan muchos años en producirse los efectos y en diagnosticarse. Por lo tanto, es difícil reconstruir el historial de exposición a radiación del paciente, además de que es probable que el cáncer haya sido causado por alguno de los otros agentes que hemos mencionado. Entonces los estudios se hacen en forma estadística en parte de una población en que se ha medido la dosis recibida; por ejemplo, mineros o empleados de hospitales que usan radiación, o trabajadores de la industria nuclear. Se determina en esos grupos la incidencia de cáncer en relación con la población normal, y si hay o no un aumento que sea atribuible a la dosis recibida. No es posible establecer con certeza que una cierta dosis producirá cáncer;

cuando mucho se podrán hacer estimaciones de su incidencia en forma de porcentaje: dada una cierta dosis recibida, habrá un tanto por ciento de probabilidad de que se produzca cáncer.

Sin embargo, aun esto es difícil de establecer, pues es posible que el cáncer se deba a otros factores no considerados, o que aparezca en diferentes partes del organismo, o que dependa de la rapidez con que se recibió la dosis más que de la dosis total. Sobre esto último podemos dar un ejemplo equivalente: si una persona toma una aspirina diaria durante un año, los efectos son inobservables; pero si no toma ninguna durante un año y luego toma 365 en un día, seguramente morirá. Lo importante aquí no es la cantidad total ingerida, sino qué tan rápido se ingirió. El argumento puede ser aplicado cualitativamente al caso de la radiación, para ilustrar la dificultad de establecer niveles de riesgo.

El riesgo existe, y por lo tanto puede deducirse correctamente que cuanto menos radiación se reciba, mejor. Sin embargo, algunas veces habrá que confrontar el riesgo por recibir radiación con otros riesgos de la vida normal. Por ejemplo, unas cuantas radiografías de tórax podrían producir un pequeño riesgo de sufrir cáncer en algunos años. Pero el riesgo de no diagnosticar correctamente una enfermedad o de operar sin una exploración previa por no radiografiar es enormemente mayor. Sería ridículo no aceptar el primero. La vida está llena de riesgos a cada paso. Consciente o inconscientemente, todo el tiempo estamos poniendo en la balanza unos contra otros para sobrevivir lo mejor posible. Puede uno dar rienda suelta a la imaginación para encontrar ejemplos hasta irrisorios de equilibrio de riesgos. ¿Qué es más peligroso, tener un refrigerador a sabiendas de que podemos recibir una descarga eléctrica, o prescindir de él y tomar alimentos sin conservar?

El segundo grupo de efectos de la radiación comprende las mutaciones genéticas. Si una radiación daña casualmente a un óvulo o a un espermatozoide fértiles, los efectos no serán observados en el individuo irradiado, sino en su prole, y tal vez después de la primera generación. La mutación se debe a una alteración del orden de las moléculas en el ADN, alteración que puede ser causada por la radiación o por otros factores, como la notoria talidomida.

Aproximadamente uno de cada cien niños que nacen presentan mutaciones genéticas, pero es imposible determinar si éstas se deben a la radiación natural o a otros factores. Por otra parte es imposible predecir con certeza si sucederá una mutación, y hay que recurrir al tratamiento estadístico de los datos. Para tratar de dilucidar el papel que tiene la radiación en la producción de mutaciones genéticas, se han echo experimentos en moscas del género *Drosophila*, que se reproducen tan rápidamente que se pueden estudiar varias generaciones en un lapso corto. Se observan deformaciones en las alas o en los ojos. Sin embargo no es posible extrapolar los resultados a los humanos sencillamente porque se trata de otra especie. Por cierto, los insectos son mucho más resistentes a los efectos de la radiación que nosotros. Es evidente que estos estudios no se pueden hacer en humanos. Aunque hay mutaciones naturales, raramente estos individuos se reproducen, lo cual impide el estudio de varias generaciones. Por otro lado, cada generación es de 25 años, lapso muy largo para la relativamente reciente ciencia de los efectos de la radiación en humanos. Nuevamente llegamos a la conclusión de que cuanto menos radiación se reciba en la edad fecunda, mejor para las futuras generaciones; sin embargo, no se pueden establecer con precisión niveles de riesgo.

Es posible que la radiación ambiental que produce mutaciones haya sido factor importante en la evolución de las especies. En la gran mayoría de los casos las mutaciones producen individuos débiles que la naturaleza se encarga de eliminar, ya sea de inmediato o después de varias generaciones. Sin embargo, no es imposible que alguna peculiaridad adquirida por mutación se pudiera haber perpetuado y hubiese dado lugar a una nueva especie. Esto se aclarará a medida que avance el estudio de la evolución.

Los embriones son más sensibles a la radiación cuanto menos tiempo de vida tienen, porque su crecimiento es más acelerado. Por eso una mujer embarazada debe evitar recibir radiación hasta donde sea posible. Existe el problema de que a veces se ignora la preñez cuando está en la primera fase, y es precisamente cuando el embrión es más sensible. Si es necesario radiografiar a una mujer en edad de reproducirse, conviene hacerlo durante el inicio del periodo menstrual, tiempo en que es seguro que no

está embarazada.

El cuarto grupo se refiere a exposiciones excesivas que pueden causar quemaduras y muerte de inmediato o cuando mucho en unos cuantos días. Una dosis letal para humanos es de 10 000 rads. Puede darse el caso cuando hay accidentes en plantas nucleares o en otras instalaciones que manejan grandes cantidades de radiación. Cuando la muerte no sobreviene por las quemaduras, llega en pocos días por daño a partes que no se regeneran, como el cerebro y el intestino.

Vayamos ahora a la otra cara de la moneda, y veamos los beneficios que la radiación ha brindado a la salud durante ya muchas décadas. En términos generales, la radiación se ha empleado tanto en el diagnóstico como en la terapia.

Desde que Roentgen descubrió los rayos X en 1895, casi de inmediato se reconoció su gran utilidad en la medicina. Como ya vimos, los rayos X se producen en un tubo al vacío con dos electrodos a los que se aplica un alto voltaje, y tienen la propiedad de velar película fotográfica. Si uno coloca, por ejemplo, la mano entre el tubo y la película, se graba en ésta la imagen de la mano, y se observan los huesos porque éstos absorben los rayos más que el resto del tejido. Todos hemos visto radiografías; su uso es tan común que muchos médicos y dentistas tienen su propio aparato para diagnóstico rápido. Muchos millones de personas han sido radiografiadas. Esta facultad de ver lo invisible es de gran utilidad para el médico y también en otros campos. La figura 44 muestra un ejemplo de radiografía médica.



Figura 44. Radiografía de un cráneo. Resaltan las obturaciones dentales por ser de un material más pesado que el resto.

Los usos más evidentes han sido para localizar fracturas de huesos, cavidades en la dentadura y objetos extraños como balas o cosas tragadas. También se han usado para localizar cálculos biliares y del riñón. Cuando el objeto contiene un elemento más pesado que los tejidos, como el calcio, es sencilla su localización. Cuando esto no sucede se puede introducir al paciente un líquido inocuo pero que contiene un elemento pesado para hacerlo opaco a los rayos X. Por ejemplo, haciendo beber al paciente una solución con bario antes de la radiografía, se puede ver con claridad el perfil del intestino, gracias a lo cual es posible localizar úlceras u obstrucciones. También se puede inyectar en la sangre un líquido opaco a los rayos, que hace que resalten en la radiografía obstrucciones o anomalías en el sistema circulatorio.

La tecnología de los rayos X se ha ido desarrollando para resolver las distintas necesidades específicas de cada caso. Por ejemplo, en las mamografías de los senos de las mujeres para detectar tumores, el tejido que se radiografía no contiene hueso, por lo cual, a fin de conseguir un buen contraste, se usan rayos X de baja energía. Se han construido equipos especiales para esto.

El avance más espectacular de los últimos años ha sido la incorporación de la computadora en la radiología. La placa fotográfica se substituye por un detector de rayos X que envía sus pulsos a una

computadora que procesa la imagen con gran rapidez y la reproduce en una pantalla. Se puede entonces tener un haz muy delgado de rayos que va girando para llegar al paciente desde distintos ángulos. El detector recoge información a cada instante y la transmite a la memoria de la computadora. Luego ésta reconstruye la imagen mostrando detalles que no se observan con película. Es posible, por ejemplo, visualizar "rebanadas" del cuerpo, lo cual permite la localización muy precisa de cualquier anomalía. Se ha dado en llamar a esta técnica "tomografía computarizada" o "reconstrucción espacial dinámica". El procesamiento de la imagen en la computadora permite resaltar ciertas partes según se requiera. Las figuras 45 y 46 muestran dos vistas de un paciente con un tumor cerebral, perfectamente resaltado y localizado.



Figura 45. Tomografía de un paciente con tumor cerebral; vista frontal. El tumor es la zona gris en forma de anillo del lado izquierdo, que ocupa casi la mitad del cerebro (tomografía cortesía del centro EMI Scanner de México).



Figura 46. Otro corte del mismo caso (fotografía cortesía de centro EMI Scanner de México).

Aparte de los rayos X, la otra técnica de diagnóstico es la llamada medicina nuclear. Se basa en inyectarle al paciente un radioisótopo. Como el isótopo radiactivo se comporta igual que el elemento inerte, se distribuye en el cuerpo de manera semejante. Si luego se pasa un detector de radiación a lo largo del cuerpo se puede distinguir con claridad su localización, incluso su evolución en el tiempo. En estos casos se seleccionan radioisótopos de vida media relativamente corta para que no dañe al paciente de manera importante, y como se cuenta con detectores muy sensibles, se pueden usar cantidades minúsculas del radioisótopo.

El procedimiento más conocido de ellos es el uso de yodo radiactivo para descubrir posibles anomalías de funcionamiento de la glándula tiroides. Esta glándula usa pequeñas cantidades de yodo para crear una hormona que regula algunos comportamientos. Si la tiroides está hiperactiva, el individuo se torna nervioso y excitable; por el contrario, si su actividad es demasiado baja, da lugar a cansancio y depresión. Para el diagnóstico se le da a beber al paciente un líquido que contiene yodo radiactivo. Después de cierto tiempo, se cuenta la actividad del yodo en la tiroides para determinar si su cantidad es normal o no.

También en la medicina nuclear ha sido vital el uso de la computadora. Con un detector especial direccional se hace un rastreo del paciente, al que se le ha administrado el radioisótopo; la señal se transmite a la computadora, que luego reproduce la imagen con gran precisión. El método se emplea para localizar tumores o anomalías en los huesos usando tecnecio radiactivo. En algunos casos se pueden hacer mapeos consecutivos para estudiar la función biológica. La técnica de "tomografía de emisión de positrones" se usa de esta manera, detectando la asimilación de glucosa radiactiva en diferentes órganos. La precisión de estos métodos es tan extraordinaria que ha sido posible, usando xenón radiactivo, determinar cuáles partes del cerebro están asociadas a distintas actividades físicas y mentales. Podrían mencionarse aquí otras dos técnicas que, auxiliadas por las computadoras y la imagen en pantalla, han producido diagnósticos muy útiles. Se trata del ultrasonido y la resonancia magnética nuclear, que aunque no caen estrictamente dentro de lo que hemos llamado radiación ionizante, tienen una semejanza de estilos. En el primer caso, llamado sonografía, se lanzan pulsos de ondas sonoras de alta frecuencia e inaudibles sobre el paciente. Los ecos producidos por éste son recogidos y seleccionados electrónicamente para dar una imagen de los tejidos. El método es tan inocuo que se usa para visualizar la posición de los niños antes de nacer y así ayudar a su seguridad y la de la madre. Por otro lado, la resonancia magnética nuclear se basa en detectar la reacción de los átomos de tejidos sanos o enfermos a la aplicación de un campo magnético poderoso. Para esto el paciente se coloca dentro de un imán, y electrónicamente se recogen pequeñas señales eléctricas de alta frecuencia que permiten el mapeo del funcionamiento de las partes vitales.

El tercer uso masivo de la radiación en la medicina es la radioterapia usada para atacar el cáncer. Empleada con gran éxito en numerosos casos, ha producido a veces una cura completa, a veces una inhibición de la enfermedad. El cáncer puede aparecer en diferentes órganos del cuerpo, y puede estar localizado o extendido. De acuerdo con estos factores, se selecciona el tratamiento apropiado, siendo la radioterapia una posibilidad, al lado de la cirugía y la quimioterapia. En algunos casos pueden convenir combinaciones de los tres tipos, aunque en general la radiación y la cirugía se usan en tumores localizados, y la quimioterapia cuando el mal está más extendido.

Se sabe que la radiación tiene la propiedad de inhibir la capacidad de proliferación de las células cancerosas. Sin embargo, el efecto no se limita sólo al tumor, sino también se aplica al tejido vecino. La estrategia del tratamiento, por lo tanto, no se reduce sólo a estimar la dosis necesaria y en qué etapas suministrarla, sino también a reducir al mínimo el daño a órganos sanos. Uno de los métodos usados es colocar una cápsula radiactiva en contacto directo con el órgano enfermo, pero los alrededores reciben tanta radiación como el tumor. Se han hecho también tratamientos inyectando la sustancia radiactiva, como en el caso de yodo radiactivo en la tiroides.

El método más seguro es irradiar desde el exterior del paciente. La fuente de radiación se hace girar alrededor de un punto con el haz de radiación siempre apuntando hacia el centro de giro. El paciente se coloca de manera que el tumor esté precisamente en el centro de giro, como lo indica la figura 47. Al girar lentamente la fuente de radiación, el centro siempre recibe exposición, pero los puntos aledaños tienen una dosis mucho menor.

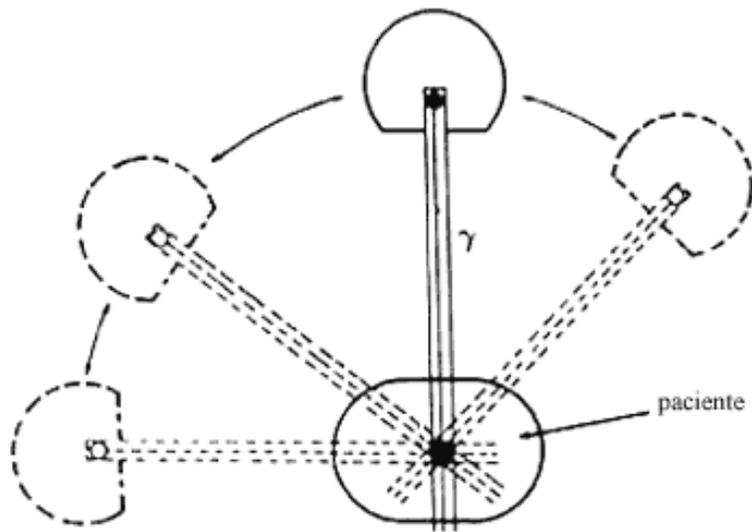


Figura 47. Giro de un irradiador de cobalto alrededor del paciente. Sólo una pequeña zona recibe radiación continuamente.

La máquina más común para radioterapia es la llamada bomba de cobalto. El nombre es desafortunado, pues la palabra "bomba" provoca algo de miedo, y la asociación con lo nuclear también. Un nombre más apropiado sería "irradiador de cobalto". Consta sencillamente de una fuente radiactiva de ^{60}Co muy intensa, encerrada en un recipiente de plomo para blindaje. Cuando se desea llevar a cabo la irradiación, la fuente se coloca por control remoto frente a un colimador que apunta al paciente. Al terminar el tratamiento se retrae la fuente a la zona totalmente blindada (véase la Fig. 48). Todo esto va montado sobre un brazo que permite el giro. El irradiador de cobalto tiene las ventajas de ser sencillo y requerir poco mantenimiento. Sin embargo, no hay que olvidar que la fuente radiactiva es de alta intensidad y vida media larga, por lo que se deben observar todas las precauciones en su manejo. Fue precisamente una de estas fuentes de ^{60}Co la que, habiendo sido almacenada incorrectamente, por accidente fue fundida en una remesa de varilla de acero en Ciudad Juárez. Después de que casualmente fue detectado el incidente, hubo que recoger todo el material contaminado, lo cual provocó muchos problemas técnicos, políticos y de salud.

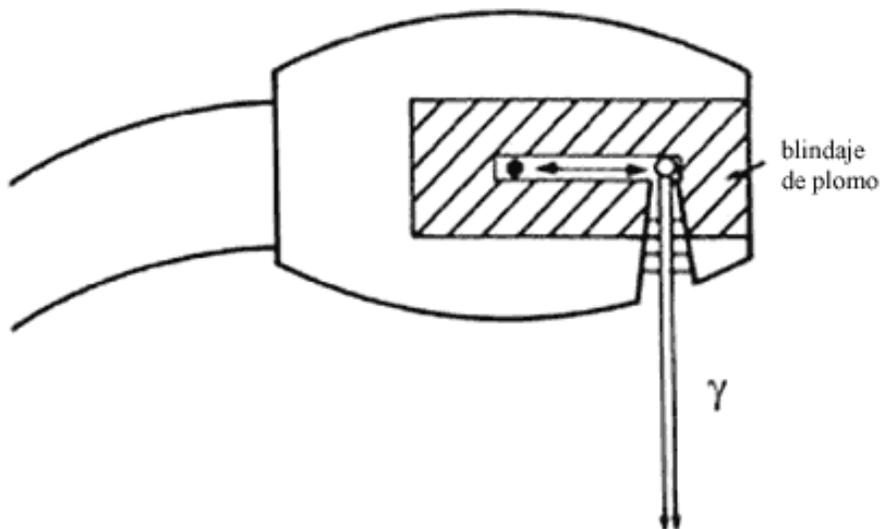


Figura 48. Brazo de un irradiador de cobalto. La fuente radiactiva se retrae cuando no está en uso.

El otro aparato que se usa comúnmente en radioterapia es el acelerador lineal de electrones. En él se produce un haz intenso de electrones de entre 4 y 8 MeV, que se hace incidir sobre una placa de tungsteno. Allí se producen rayos X que pueden penetrar bastante en el tejido para llegar a tumores profundos. También está montado en un brazo que permite el giro, como el irradiador de cobalto.

La radioterapia es una tecnología que está en continua evolución, para tratar de mejorar la efectividad de los tratamientos. Se investigan distintas radiaciones y diferentes energías. Un método que se ha usado con éxito es irradiar con neutrones rápidos provenientes de una reacción nuclear como ${}^9\text{Be} (p, n) {}^9\text{B}$. Como se requieren neutrones de energías relativamente altas, para producirlos se han usado ciclotrones desde 15 MeV hasta 50 MeV. La ventaja de usar neutrones rápidos es que ciertas células cancerosas pobres en oxígeno son muy resistentes a los rayos X, no así a los neutrones. Otra técnica que se usa es irradiar con piones (mesones π) provenientes de un gran acelerador de electrones o de protones. Se necesitan 140 MeV sólo para producir los piones, y para que sean de utilidad se usan aceleradores de más de 600 MeV. El proceso tiene la ventaja de que se puede manipular fácilmente el haz para obtener la geometría deseada y que el alcance de las partículas está bien definido. Esto último permite una localización muy precisa del depósito de energía, y de los efectos curativos, en el tumor.

Para concluir, conviene hacer la siguiente reflexión. Los métodos que hemos descrito en este capítulo sobre radiación y salud son de alta tecnología, y por lo tanto de difícil acceso a los países en vías de desarrollo. En la actualidad, con fuerte inflación y con continua devaluación de la moneda, este problema se acentúa notablemente. Ya no es posible en muchos casos adquirir los equipos y las sustancias de importación, y a veces ni siquiera se pueden pagar costos de mantenimiento, servicio y refacciones. En consecuencia, este servicio de salud es cada vez más escaso, o sólo está a disposición de aquellos con mayores recursos. El costo actual de una tomografía se acerca al salario mínimo mensual legal. Las clínicas y centros médicos oficiales tienen una capacidad limitada de ofrecer estos servicios, por problemas de presupuesto y de otras prioridades. Es difícil dar números, pero resulta evidente que una gran cantidad de enfermos no pueden recibir el tratamiento adecuado. He aquí un área que merece la mayor atención, en cuanto a desarrollo de tecnología, preparación de técnicos y científicos e impulso a la industria.

El problema de los costos de la alta tecnología, aunque en los países pobres o en vías de desarrollo es casi patético, no se restringe sólo a ellos; aun en los países que la desarrollan se tiene el problema. El costo tiene que ser cubierto por el paciente, la compañía aseguradora o la población en general cuando se trata de subsidios oficiales. Por ejemplo, para la irradiación con piones, en que sólo hay unos cuantos aceleradores en el mundo capaces de producirlos, el costo ni siquiera se puede estimar de manera realista, ya que las máquinas son principalmente para otras investigaciones. De aquí surgen varias interrogantes; por ejemplo; ¿cuánto cuesta un tratamiento?; ¿quién tienen derecho a él?; ¿se decidirá esto de acuerdo con los recursos del paciente?; ¿se debe tratar de ofrecer masivamente?; ¿en todos los países?; cuando se trata de salvar vidas, ¿cómo se calcula la relación costo/beneficios?; ¿deben los gobiernos establecer lineamientos al respecto?



IX. EFECTOS EN LOS MATERIALES

SABEMOS que la radiación produce ionización, excitación, desplazamiento atómico y cambios químicos en los materiales. Esto afectará sus propiedades notablemente, dependiendo de una serie de factores, como cantidad y tipo de radiación, energía, rapidez con que se suministra y el tipo de material. En casos como los reactores nucleares, el daño que la radiación produce en los componentes del reactor puede ser considerable y producir un deterioro rápido. Entonces se procura usar materiales resistentes a ese daño, para aumentar así la vida útil del reactor. Sin embargo, en muchos otros casos se ha logrado el aprovechamiento de la radiación para producir efectos útiles. Algunos ejemplos son la esterilización de productos médicos, la preservación de alimentos y la vulcanización de hules. También puede considerarse la implantación controlada de iones en una sustancia para producir materiales con propiedades novedosas.

Se conoce una gran variedad de efectos producidos en distintas combinaciones radiación-material. Cada uno de ellos merece estudio. Por ejemplo, el tipo de radiación importa principalmente por su penetración y la densidad de ionización producida: mientras que las partículas α depositan toda su energía en unas cuantas micras del material, los rayos γ , en cambio, penetran hasta metros. Desde luego, esta penetración depende de la energía de cada uno. Sobre la cantidad de radiación requerida, podemos decir que, en términos generales, con mayor cantidad, mayores efectos, aunque éstos no siempre son aditivos. Además, a veces dependen de qué tan rápidamente es suministrada la dosis. Los distintos materiales son afectados también de manera distinta. Un plástico puede ser reducido a polvo con rayos γ , pero la misma dosis en un metal no lo afecta notablemente.

Veamos, como ejemplo, una práctica bien establecida desde hace muchos años: la esterilización de productos médicos. Sabemos que la radiación deposita energía en cualquier material muy eficientemente, y por lo tanto puede romper cualquier enlace químico mejor que el calor o las reacciones químicas convencionales. Entonces pueden producirse de este modo reacciones químicas muy diferentes a las normales. Cualquier organismo, como bacterias, virus, esporas de hongos o huevecillos de parásitos, resiente estas reacciones químicas, y con ello se logra su destrucción. Un mecanismo para esto puede ser que la radiación dañe directamente partes sensibles del microorganismo, como el ADN o alguna membrana vital. Otra posibilidad es que la radiación produzca, en agua u otros materiales, radicales libres que pueden producir nuevos compuestos químicos. En el agua, por ejemplo, pueden formarse radicales H y OH, que luego, al reaccionar, forman H_2O_2 , peróxido de hidrógeno, por citar el ejemplo más sencillo. Al suceder esto millones de veces en un organismo, éste puede morir. Recordemos que un solo rayo γ y su cascada de productos secundarios pueden afectar químicamente a miles de moléculas, así que el proceso es de alta eficiencia.

En el caso de la esterilización de productos médicos la irradiación compite favorablemente con otros métodos, como el calentado, el secado, el enfriado o el uso de compuestos químicos tóxicos. Por un lado ahorra energía. Aunque el costo inicial de un irradiador sea alto, su vida útil es larga y se puede procesar una gran cantidad de productos distintos. Abre la posibilidad de almacenar por largos tiempos productos estériles, como jeringas y otros objetos desechables. Las jeringas se sellan dentro de pequeñas bolsas de plástico, luego se irradian para eliminar todo microorganismo, pues la radiación penetra en la bolsa. El producto esterilizado y sellado se puede entonces almacenar, transportar y comercializar, sin que se requiera para su uso más que romper la bolsa. El proceso ha venido a desplazar en buena medida a la esterilización repetida con autoclaves en los hospitales, que es engorrosa y puede no ser confiable. Otra virtud de la irradiación para esterilizar es que no contamina, a diferencia del uso de compuestos químicos. La toxicidad de estos compuestos, como el óxido de etileno, es lo que hace que esterilicen, pero después de usarse se tiran, y de un modo o de otro pasan al medio ambiente, para sumarse a la gran gama de desechos químicos que poco a poco están envenenándolo.

Al esterilizar es importante saber cuáles microorganismos se pretende destruir para estimar la dosis necesaria, pues las distintas especies presentan diferentes sensibilidades a la radiación. Aunque lo deseable es una total inactivación del microorganismo, esto no siempre se puede garantizar al 100%. Intervienen diversos factores, como el número de microorganismos presentes en un principio, la dosis recibida, el tiempo de exposición y posibles inhomogeneidades en su administración debidas a la forma y tamaño del producto, a la geometría del irradiador y a la energía de la radiación. Para los diferentes casos hay que establecer factores de riesgo aceptable que permitan regular las condiciones de irradiación. La eficiencia del proceso se ve afectada también por presencia de oxígeno, humedad y agentes químicos que actúan como protectores o sensibilizadores.

La gran variedad de productos médicos que se prestan para ser irradiados se puede clasificar en los siguientes grupos: 1) objetos de contacto directo con el paciente durante el examen o la cirugía (jeringas, agujas, gasa, guantes, sondas, catéteres, esponjas, etc.); 2) partes para implantar permanente o temporalmente (válvulas, prótesis, partes para marcapasos, contraceptivos, corazones artificiales, córneas artificiales, clavos, tornillos y otros auxiliares para huesos, etc.); y 3) objetos auxiliares (filtros, máscaras, vestimenta, material de laboratorio, etc.). Muchos materiales (algunos plásticos, metales, vidrio, hules, papel) resisten la irradiación, pues para degradarse necesitarían dosis mucho más altas que las requeridas para esterilizarlas. Se debe verificar de todos modos que mantengan sus propiedades y que no despidan sustancias tóxicas. Estos materiales pueden ser usados para el objeto que se desea esterilizar o para empaquetarlo, pues también la envoltura recibe radiación.

Entre la gran variedad de usos de la radiación destaca uno: la preservación de alimentos. A nivel mundial, como una cuarta parte del alimento producido se desperdicia a causa de la descomposición o el mal aprovechamiento. En ciertos casos el desperdicio puede llegar a ser hasta de 70%. Es claro que la conservación de alimentos merece tanta atención como la misma producción. Los métodos más comunes para preservarlos son el secado, la fermentación, el envasado, el congelamiento y la fumigación. Algunos de estos métodos son antiquísimos. El secado ayuda a preservar granos. La fermentación se usa para producir vinos, cerveza, quesos, y otros productos de larga vida. El envasado y enlatado a alta temperatura ya desempeña un papel de primera importancia, especialmente para la población urbana.

Los alimentos se echan a perder por agentes físicos, químicos y biológicos; estos últimos incluyen los efectos de microorganismos e insectos. Cada tipo de alimento tiene su propio modo de descomposición dependiendo del microorganismo. Algunos de éstos pueden causar enfermedades y hasta pueden ser mortales, como el que produce el botulismo.

La radiación ataca a los microorganismos, destruyéndolos totalmente o inhibiendo su crecimiento, dependiendo de la especie y de la dosis. Si ésta es del orden de 2 a 5 kGy (200 a 500 krad), se logra una pasteurización que permite alargar el tiempo de almacenamiento; si es del orden de 10 kGy (106 krad), se puede almacenar el alimento sin necesidad de refrigeración por largos periodos. Las dosis requeridas varían de un alimento a otro. Por ejemplo, con dosis de 30 a 100 Gy se logra inhibir la germinación de papas y cebollas. Los insectos y otros parásitos dejan de reproducirse con 30 a 200 Gy y son destruidos con 50 a 5 000 Gy. Con 1 a 10 kGy se logra reducir a un millonésimo la cantidad de bacterias y esporas, y con 10 a 40 kGy los virus.

Hay una serie de estudios que se deben efectuar sobre los efectos de la radiación en los alimentos antes de que éstos puedan ser consumidos; incluyen estudios de valor nutritivo y posible producción de sustancias tóxicas o carcinógenas. Sin embargo, un comité de expertos de la FAO, el Organismo Internacional de Energía Atómica y la Organización Mundial de la Salud ha determinado que cualquier alimento que haya recibido una dosis hasta de 10 kGy no presenta ningún riesgo toxicológico. Para dosis mayores si es necesario un estudio con cada tipo de alimento. En la actualidad más de 20 países han aprobado el uso de radiación para un buen número de alimentos; algunos de ellos, como el tocino, con dosis hasta de 45 kGy.

Otras cuestiones que se deben aclarar son la aceptación por parte del público y posibles cambios de sabor, consistencia y apariencia. El empaquetamiento también es importante si se desea un almacenaje largo,

para asegurar que no produzca sustancias tóxicas y que garantice la conservación. Los costos del proceso deben estudiarse para cada caso en particular. El tipo de alimento, su forma y tamaño y la dosis requerida se consideran al decidir qué instalación se requiere para irradiar.

El tipo de irradiador más común es la fuente de rayos γ de ^{60}Co o de ^{137}Cs , y también se usan aceleradores de electrones, ya sea que se usen los electrones directamente o los rayos X que producen al chocar con un elemento pesado. Las fuentes de rayos γ deben ser de alta intensidad; generalmente son de entre 25 000 Ci y 1 000 000 Ci. Con esta cantidad de radiación es posible proporcionar las dosis requeridas en unos cuantos minutos. Hay varios tipos de instalación de irradiadores, algunos móviles, otros fijos. En general se requiere un sistema de colocación de la fuente en posición de irradiar, un blindaje para almacenar la fuente cuando no se usa, un transportador de alimentos que los haga circular junto a la fuente por el tiempo necesario, un sistema de blindaje para el personal y un sistema de control y seguridad. Hay que advertir que estos irradiadores no se pueden encender ni apagar. Lo más que se puede hacer es guardar la fuente dentro de un blindaje seguro cuando no se está usando. Esto crea la necesidad de una vigilancia permanente y a largo plazo, además de un proceso especial de desecharla cuando ya no se usa.

Si se emplean aceleradores de electrones, éstos generalmente tienen voltajes de entre dos y cinco millones de volts y corrientes del orden de miliamperes, de modo que puedan proporcionar decenas de kilowatts de potencia en forma de haz. Los aceleradores sí se encienden y apagan; pero en cambio necesitan una fuente de alimentación poderosa, además de mucho mantenimiento, y siempre hay peligro de descompostura.

La irradiación de alimentos ha avanzado lentamente en virtud de dos factores. El primero es que ha sido sujeta a un gran escrutinio para demostrar su seguridad, a diferencia de otros métodos de conservación que, habiendo sido desarrollados en épocas pasadas, a veces hasta prehistóricas, no había ni conocimiento ni técnicas analíticas, ni necesidad para corroborar su seguridad. El otro factor es que el uso de la irradiación, si bien no resulta caro por el gran volumen que es posible irradiar con una instalación, obligaría a modificar los sistemas establecidos y a veces arraigados de distribución, amén de afectar intereses de intermediarios. Tomemos el ejemplo del pescado. Como conviene efectuar la irradiación lo más pronto posible después de la pesca, se abre la posibilidad de tener irradiadores en los buques pesqueros, que podrían pasar temporadas más largas antes de regresar a puerto. Esto implica buques grandes por el peso y tamaño del irradiador, y eliminación de las embarcaciones pequeñas. Además, sería posible que el empaquetado se hiciera a bordo para evitar contaminaciones posteriores. Con este proceso se puede almacenar durante dos o tres veces más tiempo, y ello permite una distribución más amplia, barata y segura. Sin embargo, requiere no sólo la parte técnica de la irradiación, sino también posibles cambios de sistemas de recolección, empaquetado, almacenamiento, transporte y distribución; es decir, una transformación integral del proceso, con la consiguiente coordinación.

Los beneficios que es posible obtener con la irradiación de alimentos provienen no sólo de reducir desperdicios. En comparación con otros métodos, como la refrigeración, puede repercutir en el abatimiento de costos, pues consume poca energía. Aunque el costo inicial de un irradiador sea grande, dura muchos años. Por otro lado, puede tener un buen efecto en el medio ambiente al eliminar la necesidad de aditivos y fumigantes.

En los polímeros, que incluyen plásticos, hule, celulosa y fibras vegetales, la radiación tiene un efecto importante, tanto que hay algunos procesos de producción de polímeros que llevan integrada una etapa de irradiación. Es enorme la variedad que se conoce, e igualmente grande es el número de efectos que les produce la radiación. Hay polímeros cuyas propiedades mejoran; hay otros que se degradan. Depende del polímero, de la dosis, del tipo de radiación, de posibles aditivos y de las condiciones de irradiación, entre otros factores.

Nuevamente puede decirse que el mecanismo básico es la formación de iones y radicales libres, que luego provocan reacciones químicas al recombinarse. Éstas pueden dar lugar a enlaces cruzados o reticulación, que produce cambios en las propiedades del polímero. También es posible producir la degradación o rompimiento de macromoléculas con la emisión de productos volátiles. Los tipos de enlace pueden

cambiar, por ejemplo, de enlaces sencillos a dobles, y si hay presencia de oxígeno se produce oxidación. Éstos son sólo unos ejemplos de los procesos más importantes que se han identificado. De acuerdo con tipo de polímero, pueden suceder todos simultáneamente, pero con diferentes intensidades y velocidades.

Las reacciones químicas en los polímeros irradiados desde luego dan lugar a cambios notables en sus propiedades macroscópicas, como son la cristalinidad, densidad, coeficiente de expansión térmica, módulo de elasticidad, y permeabilidad a los gases. En el polietileno, por ejemplo, se ha observado un aumento de la estabilidad a altas temperaturas, un aumento de la resistencia a corrosión y una mayor resistencia a quebrarse. En general, algunas propiedades útiles que se han observado son, a saber: mayor resistencia a la abrasión, mejores propiedades de corte, resistencia a solventes, cambios en la combustión, mayor estabilidad mecánica y nuevas propiedades a altas temperaturas. Se ha observado reticulación en polietileno, polipropileno, poliestireno, PVC, hules, poliamidas, etc. Sin embargo, se pueden diseñar materiales para aplicaciones específicas; por ejemplo, poniendo aditivos como antioxidantes o retardadores de flama que la irradiación haga resaltar.

Los irradiadores más útiles para polímeros son los aceleradores de electrones porque la dosis está muy concentrada. Generalmente se requieren dosis del orden de los 5 kGy o menos. Un aspecto muy importante es cómo proporcionar la dosis uniformemente a la muestra, sin que su forma y tamaño interfieran. Por ejemplo, al irradiar cable para mejorar la resistencia eléctrica del recubrimiento, debe tratar de rotarse para que le llegue la radiación por todos lados y el alambre no haga sombra. La misma muestra absorbe electrones, de modo que la dosis puede no ser la misma en el frente que atrás. A veces se usan reflectores metálicos para regresar la radiación que ya atravesó la muestra. Todo esto requiere de una dosimetría cuidadosa, tanto en la muestra como para la seguridad del personal. También se tiene que diseñar para cada caso un sistema de transporte de muestras que sea resistente a la corrosión, porque la radiación intensa en el aire produce ozono y otros gases corrosivos.

La irradiación de los materiales puede dar lugar a múltiples fenómenos, algunas veces insospechados. En la actualidad hay gran cantidad de científicos dedicados a esta química de radiaciones; entre cuyas aplicaciones, además de las ya mencionadas, se cuentan el curado de pinturas y tintas, producción de compuestos de madera y polímero, mejoramiento de fibras sintéticas, producción de membranas especiales, degradación de desperdicios, conservación de alimento para ganado, y muchas otras.

Existe una técnica de modificación de materiales por radiación que, siendo aún de desarrollo reciente, ha desempeñado ya un papel vital en la industria electrónica: se trata de la implantación de iones. Como su nombre lo indica, consiste en bombardear la superficie de un material con átomos ionizados provenientes de un acelerador, forzándolos a penetrar dentro del material y colocarse a cierta profundidad. En la actualidad es posible tener haces de cualquier ion, desde hidrógeno hasta uranio, si se tiene la fuente de iones apropiada. Además, pueden ser lanzados sobre cualquier material, con lo cual se abre la posibilidad de crear nuevos materiales con propiedades insospechadas. En las reacciones químicas convencionales, para que suceda una reacción se ponen en contacto los reactivos y tal vez se les eleve la temperatura o se les ponga un catalizador. La reacción procede de acuerdo con las leyes de la química. En cambio, en la implantación de iones se está forzando una combinación de átomos con un sólido, y por ello se producen compuestos que posiblemente no sucederían de otra manera. Uno puede seleccionar la combinación deseada, gracias a lo cual se deja ver una enorme gama de posibilidades para la creación de nuevos materiales.

Para la implantación de iones generalmente se usan aceleradores (implantadores) de energías de entre 10 KeV y 1 MeV. Con estas energías los iones pueden penetrar desde 0.01 hasta 1 micra, dependiendo del tipo de ion y del material, así que el tratamiento es esencialmente superficial. Puede uno esperar que sean las propiedades superficiales del material las que se vean afectadas por el proceso, propiedades como resistencia a la corrosión, fricción y dureza superficial. Si después de la implantación se calienta la pieza, es posible que los átomos implantados se difundan a una mayor profundidad.

En la industria electrónica moderna, de circuitos integrados, la técnica de implantación de iones ha

encontrado su mayor utilidad, por haber un ajuste entre las necesidades de los materiales y las características de la técnica. Para producir los microcircuitos se requiere introducir impurezas en un cristal (hasta ahora se ha usado casi siempre silicio), las cuales modifican sus propiedades eléctricas para convertirlo en semiconductor. Con objeto de lograr un gran número de circuitos en una sola oblea se deben introducir control y homogéneamente, y muy cerca de la superficie, entre 10^{12} y 10^{16} átomos de impurezas sobre una superficie de 1 cm^2 , dependiendo de la aplicación. Esto se logra fácilmente con un implantador. Para dar la forma del circuito se cubre con una mascarilla durante la implantación, dejando pasar los iones sólo a ciertas posiciones. La implantación es mucho más exacta que la difusión para introducir impurezas, siendo fácil controlar la cantidad, homogeneidad y profundidad del depósito, mediante las señales de control que se dan al acelerador.

La implantación de iones en metales aún no se ha usado extensamente, aunque se ha observado que es benéfica en ciertos casos, pues aumenta la resistencia a la corrosión y oxidación, disminuye el coeficiente de fricción y mejora las propiedades de desgaste y fatiga. Todavía no se usa extensamente, por ser un proceso caro, pero en componentes especiales ha resultado ser útil, por ejemplo, en ciertas partes de maquinaria sujetas a un desgaste exagerado o en rótulas artificiales para rodillas. Promete ser una buena técnica para ahorrar materiales, pues si se desean ciertas propiedades en la superficie, no es necesario que sea tratado todo el volumen. Un ejemplo es el acero inoxidable, al cual el cromo le da la resistencia a la oxidación, pero también eleva el costo. Si se implanta cromo en la superficie se puede obtener la misma propiedad pero a bajo costo por el ahorro de cromo. En los metales se requieren de 10^{14} a 10^{18} iones por cm^2 , por lo que se necesitan haces intensos para alcanzar estas dosis. Por otro lado, las demandas de homogeneidad no son tan severas como en los semiconductores.

Algunas otras ventajas de tipo general que tiene la implantación de iones son las siguientes: sucede a bajas temperaturas, se evitan deformaciones de la pieza, no hay materiales de desperdicio y es posible un control preciso de la profundidad. Cuando se usa la implantación en vez de un recubrimiento, se evitan los problemas de adherencia, pues no hay una interfase marcada.

Durante la implantación de iones se produce daño en la red cristalina, pues los átomos incrustados pueden arrojar a los átomos originales de sus lugares. Estos daños provocan cambios en las propiedades, cambios que habrá que sumar a los de la implantación misma. Otro efecto es la erosión iónica del material original, pues el golpeo iónico puede hacer que algunos de los átomos originales sean despedidos del material. Cuando esta erosión es intensa, la superficie original va recediendo. Si el material original es un compuesto, tal vez uno de los elementos sea despedido más que el otro, lo cual daría lugar a un cambio importante en la composición química. Otro proceso que se ha observado es el mezclado iónico. En este caso, antes de la implantación se deposita sobre la superficie una capa delgada de una substancia; al ser golpeada por los iones, los átomos de este recubrimiento se incrustan en el material, y surgen características nuevas.

Muchos de los beneficios que la implantación de iones produce en los materiales también se pueden crear con una descarga gaseosa, que es la que produce la luz en un tubo de neón. Se trata de un recipiente al vacío al que se le suministra una pequeña cantidad de gas y luego se le aplica un alto voltaje entre dos electrodos que están en contacto con el gas, como se indica en la figura 49. Al aplicar el voltaje, el gas se ioniza, produciendo luz y una corriente eléctrica de electrones hacia el ánodo (+) y de iones hacia el cátodo (-). La pieza que se desea modificar se coloca como cátodo, y los iones del gas, acelerados por el alto voltaje, la bombardean y se incrustan en ella. A fin de cuentas, el proceso es semejante a una implantación de iones. Tiene la ventaja de que se puede aplicar el procedimiento a piezas grandes, el costo del equipo es modesto y se puede llevar a cabo en formas geométricas complicadas, pues los iones le llegan al cátodo desde todas direcciones. Las desventajas de esta implantación son que se usan voltajes más bajos (100 a 5 000 volts), lo cual redundaría en menor penetración, y que no se puede controlar la profundidad de los iones.

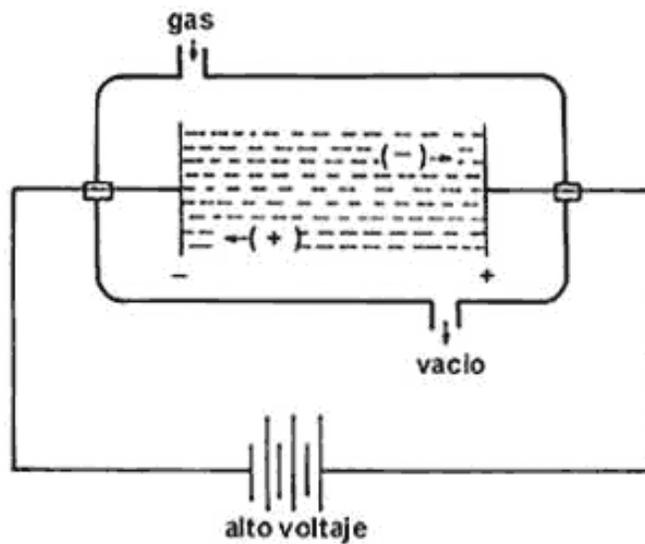


Figura 49. Esquema de las partes principales de una descarga gaseosa. Los iones positivos (+) son atraídos hacia el cátodo, al cual bombardean.

El proceso se ha usado en el Instituto de Física de la UNAM para nitrurar aceros, aumentando así su dureza en la superficie. Se usa como gas una mezcla de nitrógeno con hidrógeno. Los iones de nitrógeno penetran en el acero, que es el cátodo, y como hay un calentamiento, luego se difunden y llegan hasta varios cientos de micras de profundidad. El proceso compete favorablemente con la nitruración convencional, pues es más barato en energía y en cantidad de gas, no contamina, es más rápido y funciona a temperaturas menores.

La radiación, por lo visto, puede afectar a muchos materiales. Qué tan importante son estos efectos y qué tanto los podemos aprovechar son motivos de análisis cuidadosos. En ciertos casos ya se usa masivamente, como en la esterilización de productos médicos, en la producción de circuitos integrados o en la vulcanización de hules. Cuántos más procesos análogos tendremos en el futuro dependerá tanto de nuestro empeño en investigar la física y la química de las radiaciones y de los materiales, como de los métodos de transferencia de tecnología al sector industrial y la aceptación por Parte del público.



X. RADIACIÓN Y ENERGÍA

DURANTE los últimos diez o quince años el tema de moda en todo el mundo ha sido la energía. Alrededor de ella ha habido polémica, crisis, temor, predicciones fatalistas, búsqueda de otras fuentes, programas de conservación, elevación y caída de precios, inflación, políticas equivocadas, promesas, extrapolaciones, problemas políticos y todo lo que puede esperarse sobre un recurso indispensable para el desarrollo, pero mal distribuido, y en su mayoría no renovable. No vamos a unirnos a la polémica, sino a describir un tipo de energía que está íntimamente ligada a la radiación: la energía nuclear.

El sentir sobre la energía nuclear es una mezcla de esperanza y desconfianza, y tal vez nunca antes la implantación de una tecnología se ha visto más envuelta en dificultades e incompreensión. Esperanza porque se nos ha dicho que es una fuente casi ilimitada de energía, que podría satisfacer las demandas del desarrollo por miles de años. Desconfianza porque no podemos olvidar los estallidos de Hiroshima y Nagasaki en 1945 y porque los vaticinios sobre el tiempo que tardaría su aplicación resultaron demasiado optimistas. El hecho es que vale la pena averiguar todo lo posible sobre la energía nuclear, para poder tomar decisiones sobre su utilidad que sean basadas en conocimientos y hechos más que en supersticiones y confusión. La tecnología nuclear, como cualquier otra tecnología, tiene virtudes y defectos que habrá que ponderar. Hay predicciones que dicen que para el año 2050 habrá disminuido fuertemente el uso de petróleo y gas natural, por su costo y porque se comenzará a agotar. El carbón los podrá suplantar en parte (por cierto, México no cuenta con yacimientos importantes conocidos de carbón); pero la mayoría de la energía tendrá que provenir de otras fuentes, entre las cuales la nuclear es por el momento la única que ha demostrado ser viable y económica.

Hay más de 250 reactores nucleares en operación en todo el mundo y otros tantos en construcción, siendo los países que más los emplean los Estados Unidos, el Reino Unido, la URSS, Japón, Francia y la República Federal Alemana. En Francia, el 59% de la electricidad es de origen nuclear. Se ha acumulado ya suficiente experiencia en esos países para garantizar que el uso de la fisión nuclear sea factible, económico y seguro. México se sumará pronto a este grupo, pues se encuentra en construcción la planta de Laguna Verde, que tendrá dos reactores, cada uno de ellos de 650 megawatts (MW), o sea 6.5×10^8 watts. Se espera introducir el combustible al primero de ellos en 1986. Para poner en perspectiva el total de 1 300 MW, consideremos que será suficiente para mantener encendidos 13 millones de focos de 100 watts. Ésta es una cantidad considerable de energía, pero apenas una fracción de las necesidades, por ejemplo, del área metropolitana de la ciudad de México.

Ya sabemos que la operación de un reactor nuclear se basa en la fisión controlada de uranio, que al romperse su núcleo libera neutrones y dos fragmentos pesados que depositan su gran energía en forma de calor en los elementos combustibles y sus alrededores. La radiación, en este caso neutrones, produce la fisión y sostiene la reacción en cadena.

Los reactores de la planta nucleoelectrónica de Laguna Verde son de tipo de agua hirviente. En ellos, el corazón del reactor (las barras de combustible con enriquecimiento hasta de 2.45% de ^{235}U) está dentro de una vasija con agua que hierve produciendo vapor. Este vapor se suministra a las turbinas que producen la electricidad, y luego se condensa para recircularlo y suministrarlo otra vez al reactor, en un circuito cerrado. El condensador usa agua de mar directamente para enfriar y condensar el vapor del circuito primario. La generación de electricidad por la turbina es convencional, semejante a la de una planta termoeléctrica. La figura 50 muestra las partes principales de estos reactores.

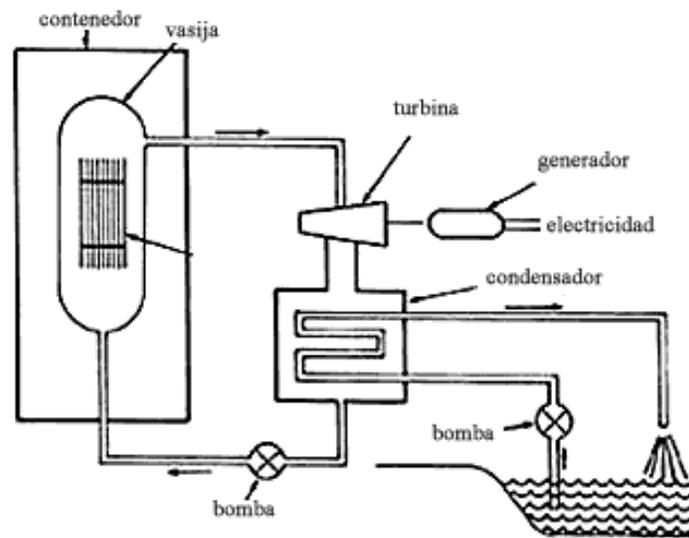


Figura 50. Diagrama de un reactor nuclear de agua hirviente. El combustible de uranio enriquecido dentro de una vasija hace hervir el agua. El vapor que produce mueve la turbina y el generador para extraer electricidad; luego cae al condensador para ser enfriado y que se le haga circular por el reactor nuevamente.

Hay otros tipos de reactor nuclear. En los de agua a presión, ésta se encuentra directamente en contacto con el combustible. Se hace circular en forma líquida y se pone en contacto con un segundo circuito que produce vapor, que a su vez mueve los turbogeneradores. Existen también los reactores de agua pesada a presión, que usan uranio sin enriquecer. El refrigerante es agua pesada, rica en el isótopo pesado de hidrógeno, el ^2H o deuterio. También usa un segundo circuito productor de vapor. Hay varios otros tipos según el combustible (natural o enriquecido), el moderador (agua, agua pesada o grafito), y el refrigerante (agua, vapor, gas, o metal líquido).

La decisión de los distintos países de usar energía nuclear se ve influida por una serie de circunstancias que incluyen costos, viabilidad técnica, disponibilidad de otras fuentes, seguridad, efecto en el medio ambiente y escala de tiempo, entre otras. Pueden darse algunos ejemplos muy sencillos. Japón casi no tiene fuentes propias de energía, y depende fuertemente de importaciones de petróleo. Éste y el gas natural, siendo no renovables, se terminarán en unas décadas, por lo que se deberá contar con otra fuente. Ya en la actualidad, casi el 25% de su electricidad es de origen nuclear. Los Estados Unidos tienen una vasta reserva de carbón que podría substituir al petróleo y al gas para producir electricidad por doscientos años más, aunque se tendrán que perfeccionar los métodos para aprovecharlo con eficiencia y limpieza. Aunque este país tiene el mayor número de reactores nucleares, sólo el 15% de su energía eléctrica proviene de ellos. El caso de México es más o menos claro. Actualmente usamos, exportamos y hasta derrochamos petróleo y gas natural. Dependemos de ellos para más del 80% de nuestra energía eléctrica (ni hablar del empleo para transporte). No tenemos carbón como substituto para dentro de unas décadas. La energía solar parece prometedora, pero aún no ha demostrado ser suficientemente barata y que se pueda usar masivamente. Las plantas hidroeléctricas y geotérmicas podrán aumentar en número, pero ni siquiera al ritmo de crecimiento de la demanda de energía. Parece ineludible que habrá que ir a la opción nuclear lo más pronto posible, pues instalar reactores y desarrollar tecnología nuclear no se logra en un día. Ya no estarán en juego la dependencia tecnológica o de recursos, sino la misma supervivencia y el desarrollo.

El costo de la energía nuclear es muy difícil de estimar, aunque sí es posible asegurar que ha resultado competitivo con otras fuentes de energía a los precios actuales, como lo han demostrado por lo menos dos países, Francia y Bélgica, que dependen de la energía nuclear para más de la mitad de su electricidad. La cantidad de energía que contiene un gramo de combustible enriquecido equivale a casi la de 3 toneladas de carbón. Con esta concentración de energía hay menos costo y dependencia de transporte (un vagón de ferrocarril en vez de tres millones de vagones); pero, en cambio, el proceso de extracción y refinación es más caro. A precios de 1980, el uranio era 4 veces más barato que el carbón y 12 veces más barato que el

petróleo, por cada watt que puede producir. Sin embargo, el costo total de producción de energía no proviene sólo del combustible; hay inversión y gastos de operación y mantenimiento. En una planta nucleoelectrica el combustible cuesta sólo una cuarta parte del total, mientras que en una termoelectrica es como la mitad. En las plantas geotérmicas y las solares no se usa combustible; el costo es 85% de inversión y 15% de operación y mantenimiento.

La generación nuclear de electricidad tiene riesgos como cualquier otra industria. Estos riesgos tienen que ponerse en la balanza cuando se toman decisiones de cómo y dónde operar una planta. Sorprendentemente, la energía nuclear resulta de bajo riesgo comparada con otros métodos de generación de energía. Esto se debe en buena parte a que, siendo la industria más reciente, ha podido recoger la experiencia generada en otros sistemas e incorporarla en los diseños. En segundo lugar, las normas de seguridad han sido cada vez más estrictas en las plantas nucleares, por la presión que ha ejercido el público en general. En cada una de las etapas de la industria nuclear hay riesgos, como en toda otra actividad humana.

En la etapa de extracción y procesamiento del mineral el riesgo más importante es la respiración del radón, que tiende a acumularse en las minas subterráneas, lo cual, provoca a largo plazo un aumento en la incidencia de cáncer pulmonar en los mineros. Esto se disminuye con una ventilación apropiada. Debe siempre llevarse un registro de niveles de radiación y vigilancia médica del personal. En las minas a cielo abierto no se acumula el radón. En la producción de combustible nuclear se requiere procesar 20 veces menos toneladas de mineral que en el caso del carbón para producir la misma cantidad de energía. Esto en sí reduce los peligros ordinarios de la industria minera, que incluyen accidentes de trabajo y enfermedades pulmonares por respirar polvos y gases tóxicos.

En la operación normal de un reactor hay descarga de pequeñas cantidades de radiactividad al aire o al agua, en virtud de que los neutrones activan los materiales del derredor. Una vez identificado este problema, los diseños de las plantas actualmente aseguran que esta emanación no exceda la dosis de 5 mrem/año en los linderos de la planta. Recordemos que ésta es la dosis aproximada recibida en un vuelo trasatlántico. Resulta mínima si se compara con los problemas causados por las emanaciones rutinarias de las plantas termoelectricas, en forma de humo, polvo y gases tóxicos, cuyos efectos en la población, por cierto, son muy difíciles de cuantificar, pero es clara su nocividad. En vista de la importancia de conocer la liberación de radiactividad en los alrededores de la planta de Laguna Verde, se tiene desde hace varios años un programa de registro rutinario en flora y fauna. Con estos datos podrá hacerse la comparación del nivel de radiactividad antes de la operación del reactor con el nivel cuando esté operando. Vale la pena mencionar que ésta es la primera vez en México que se hace un estudio a conciencia de los efectos en el medio ambiente de cualquier industria.

Hay otro producto que podríamos llamar contaminación en la operación de un reactor nuclear, en vista de que puede afectar la ecología de los alrededores. Se trata del calor producido en el agua de descarga que enfría los condensadores. La elevación de temperatura puede afectar las especies que viven en la zona, especialmente si la descarga es a un río o a un lago. En el caso de Laguna Verde, la descarga es al mar y los efectos serán en una región muy localizada. Todas las plantas generadoras descargan calor; las termoelectricas generalmente lo hacen al aire.

Uno de los problemas sobre los que ha habido más discusión es cómo disponer del combustible usado, que queda altamente radiactivo. En la fisión del uranio, los dos fragmentos pesados que quedan son elementos radiactivos. Como hay una gran gama de ellos, las vidas medias son muy variadas, pero la mayoría tiene vida media corta, de modo que en unas cuantas horas han decaído. Algunos tienen vidas medias largas, entre los que destacan el ^{137}Cs , el ^{90}Sr y el ^{85}Kr (30 años, 28.8 años, y 10.73 años, respectivamente). Como la actividad inicial es alta, estos desechos pueden tener niveles peligrosos de radiactividad por cientos de años. Se tiene que disponer de ellos de suerte que se garantice la seguridad no sólo en la actualidad, sino también en el futuro. Otro elemento que se encuentra presente es el plutonio (^{239}Pu), formado no por la fisión del uranio, sino porque éste absorbe neutrones. El ^{238}U , el isótopo más abundante, puede absorber un neutrón de los que mantienen la reacción en cadena, y así se transforma en ^{239}U , que decae por emisión β a neptunio (^{239}Np), y éste a su vez a ^{239}Pu . Como el ^{239}Pu es fisiónable,

hay una ventaja en separarlo químicamente del resto de los desechos para usarlo como combustible. Su vida media es de 24 400 años.

Generalmente las barras usadas de combustible de un reactor se guardan un tiempo en la misma planta bajo agua para enfriarlos y absorber radiación hasta que han decaído los elementos de vida media corta. Luego se transportan a plantas de reprocesamiento, donde se separan el plutonio y el uranio no gastado, y el resto se concentra. Los desechos concentrados de la operación de un año de un reactor de 1 000 MW ocupan 2 m³, en contraste con los miles de millones de toneladas anuales de desechos agrícolas, industriales y mineros, basura y demás desechos municipales que producimos. Obviamente el problema no radica en el volumen, sino en las características especiales de los desechos: alta radiactividad y persistencia. En un principio se echaban al mar para que se diluyeran y perdieran efectividad, pero en la actualidad se prefiere encapsularlos en vidrio o en tanques de acero inoxidable para luego almacenarlos en depósitos especiales subterráneos, libres de humedad y con gran estabilidad a largo plazo. La tecnología de desechos radiactivos merece la máxima atención, pues no se debe olvidar que es un problema que, aunque tiene solución, van a heredar nuestros descendientes durante cientos o miles de años.

El aspecto que más temor inspira es la posibilidad de un accidente violento en un reactor nuclear. Hasta se ha dramatizado en una película. Lo primero que hay que hacer notar es que un reactor nuclear no es una bomba. Por su diseño para mantener una reacción en cadena controlada, no pueden darse las condiciones de una bomba nuclear, en que el material fisionable se comprime rápidamente a una masa densa. Una vez establecido que los reactores no pueden producir una explosión nuclear, veamos el tipo de accidente que podría suceder, y contra el cual están diseñados los sistemas de seguridad que son parte fundamental de toda planta nuclear.

En el caso de pérdida accidental del fluido enfriador de un reactor nuclear, la temperatura comenzaría a aumentar. Cuando sucediera esto, se introducirían las barras de control para suspender la reacción en cadena y detener la fisión. La temperatura no bajaría de inmediato a causa de la alta radiactividad del combustible, así que habría el peligro de que los elementos combustibles se sobrecalentaran y luego se fundieran, cayeran al fondo de la vasija y tal vez la perforaran. De suceder esto, dependiendo del diseño del edificio, es posible que hubiera una expulsión de gases radiactivos; los líquidos y sólidos quedarían allí hasta que bajara la temperatura.

Como el accidente está bien tipificado, los reactores y sus edificios están especialmente diseñados para, por un lado, impedir que esto suceda y, por el otro, en caso de suceder, evitar que pueda haber daño a la población. Sistemas rígidos de control de calidad, circuitos alternativos de enfriamiento, diseños altamente conservadores, barreras múltiples, duplicación de sistemas de seguridad, procedimientos de emergencia: con todo esto se cuenta para prever cualquier contingencia que pueda suceder. De todas las industrias, la nuclear es la que tiene sistemas de seguridad más rigurosos. En consecuencia, se estima que la probabilidad de un accidente de consecuencias mortales en una planta nuclear es mucho menor, por ejemplo, que el peligro de accidentes de aviación. Para gente que vive en la proximidad de una planta nuclear, es más probable que muera fulminada por un rayo que por un accidente en la planta.

Hasta la fecha ha habido accidentes de este tipo en reactores de plantas nucleoelectricas, pero no ha habido una sola muerte en consecuencia.¹ El caso más conocido y reciente ha sido el reactor de Three Mile Island, en que falló una bomba en 1979, lo cual dio lugar a una serie de acontecimientos que culminaron en la destrucción parcial del corazón del reactor y el escape de algunos gases radiactivos. Se dio amplia difusión alarmista al hecho a pesar de que no hubo muertos ni lesionados, ni se requirió evacuar la zona, y las dosis recibidas por el escape de gases radiactivos fueron del orden 100 mrem. Fue una dura pero afortunada prueba de la seguridad de una planta nuclear, si bien hubo ciertas fallas que nunca debieron suceder. Es interesante cómo ha habido tanta oposición al uso de plantas nucleoelectricas, a pesar de ser una de las industrias más seguras que hay, o tal vez la más segura. Recordemos el caso de Ixhuatepec, México (más de 500 muertos por una explosión de gas combustible), y el de Bhopal, India (más de 2 500 muertos por una fuga de gas tóxico).

Una opción fascinante que nos brinda la energía nuclear es la posibilidad de resolver el problema energético por miles de años, usando reactores de cría que producen más combustible del que consumen. Aunque esto suene disparatado, es una realidad tanto en concepto como en ejecución, pues hay varios reactores de cría en el mundo produciendo electricidad. Están diseñados para provocar la absorción de neutrones por parte del ^{238}U , que da lugar a ^{239}U , ^{239}Np , y ^{239}Pu , éste último fisionable y de vida media larga. El plutonio creado por este proceso en las barras de combustible después se separa de las barras usadas, para emplearse en nuevas barras. De esta manera es posible aprovechar todo el uranio, no sólo el 235 , que es fisionable pero poco abundante.

Esta panacea no está libre de problemas, y ha habido mucha polémica sobre si conviene construir reactores de cría o no. La dificultad principal es política y no técnica. El plutonio sirve también para hacer bombas y se teme que si no existe un estricto control en los combustibles y su reprocesado, podrían caer en manos irresponsables y crear peligros a todo el mundo. De hecho, ya hay grandes arsenales nucleares apuntados de unos países de otros. Algunos reactores han sido construidos expresamente para producir plutonio con fines bélicos, y no para producir electricidad. El manejo y almacenamiento de plutonio en sí tiene problemas, pues además de su gran potencial energético, es un material altamente tóxico.

He aquí una tecnología conocida y probada (Estados Unidos, Inglaterra, Rusia, Francia, Alemania, Japón y la India), que podría ayudarnos por miles de años, pero cuyas características especiales impiden que se puedan extender sus beneficios. Los países en desarrollo son de hecho los más alejados de ellos; pues, tratándose de alta tecnología en todos sus pasos (diseño del reactor, separación del plutonio, métodos de control, etc.), se carece de la experiencia y la organización para llevarlos a cabo. Los países poderosos no fácilmente van a ceder su hegemonía; así que no sería difícil que, de llegar algún día a una economía de reactores de cría, los subdesarrollados tengan que seguir comprando tecnología y tal vez hasta electricidad.

La energía solar es en realidad nuclear, pues son reacciones nucleares de fusión en el Sol las que lo han mantenido encendido por millones de años. Las reacciones de fusión, inversamente a las de fisión, producen energía cuando dos núcleos ligeros se funden para formar uno más pesado. Muchos elementos ligeros pueden producir reacciones de fusión, siendo unas importantes $^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + \text{n}$, y $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$. En vista de que el hidrógeno y aún el isótopo pesado deuterio (^2H) existen en grandes cantidades en la Tierra, de lograr provocar y controlar estas reacciones en número suficiente, tendríamos una fuente energética prácticamente inagotable.

Para lograr esto hay que inducir las reacciones nucleares con los proyectiles viajando a alta velocidad, como sucede en el Sol. Un acelerador modesto lo permite, pero en cantidades limitadas, y no suficientes para poder extraer energía. Para simular las condiciones del Sol, los proyectiles deben tener velocidades correspondientes a temperaturas de 100 millones de grados. Como ningún material podría sostener estas temperaturas, se ha ideado una "botella magnética" sin paredes, donde un campo magnético confina un plasma. Durante ya varias décadas se ha realizado un esfuerzo importante para lograr el primer reactor de fusión rentable (que genere más energía de la que consume); pero el problema es técnicamente tan complicado que, a pesar de que ha habido avances, todavía no se logra el objetivo. Otra estrategia que se ha experimentado es iluminar el combustible con rayos láser uniformemente por todos lados, para comprimirlo súbitamente a altas densidades y altas temperaturas.

Siendo tal vez el desarrollo más complicado que jamás se haya intentado, por la alta tecnología, sólo los países sumamente desarrollados tienen la técnica y los recursos para investigar la fusión controlada. Si se logra, no será antes del año 2020 cuando pueda producirse electricidad. Cuál será el costo es muy difícil de predecir, pues aún no se tiene ni un prototipo, ni se sabe si realmente competirá con otras fuentes energéticas que pueda haber en ese tiempo. En todo caso, parece ser que por lo menos durante un tiempo será la fuente energética de los países desarrollados.

NOTAS

[1](#) Al entrar este libro a impresión sucedió un accidente en un reactor nuclear en Chernobyl, cerca de Kiev, URSS. Se habla de una veintena de muertos, pero los detalles no se han dado a conocer. La nube de gases radiactivos fue detectada en Escandinavia.

Indice



XI. LOS NUEVOS USOS

LAS RADIACIONES encontraron usos casi desde el momento de descubrirse, gracias a sus características tan especiales. Desde luego, está su poder de penetración, que dio lugar a las radiografías y al uso de radioisótopos como trazadores. Luego está su poder de ionización, que permitió la radioterapia y muchos usos industriales, como la esterilización conservación de alimentos y curado de plásticos. Su relación con la energía nuclear resultó en los reactores de potencia y en posibilidades de energía ilimitada. Sus efectos en las distintas sustancias abre nuevas perspectivas en la ciencia de materiales.

Por otro lado, tienen la característica de afectar regiones microscópicas, átomos, electrones y núcleos. De hecho, se han convertido en la principal arma para investigar la materia, su estructura cristalina, la estructura de los átomos, de los núcleos y de los nucleones. Han sido piedra angular en el reconocimiento de leyes fundamentales de la física, como el principio de incertidumbre, la dualidad onda-partícula y el principio de exclusión. Permitieron el descubrimiento del núcleo, la búsqueda de nuevos elementos y la demostración de la estructura periódica de los sólidos.

En este capítulo vamos a describir cómo la radiación se emplea en técnicas analíticas muy finas, que son capaces de dar información que no se puede obtener con ningún otro método. Muchas de ellas son de aplicación reciente porque se basan en el desarrollo de métodos de generación, detección y análisis, los cuales siempre están mejorando y cada vez son más precisos y sensibles. La radiación está bien colocada dentro de la espiral de alta tecnología, cuyo desarrollo se da gracias a nuevos métodos que provienen de información más fina, que se obtiene aplicando a su vez la alta tecnología. Describiremos las técnicas de análisis por activación, la fluorescencia de los rayos X, la espectroscopía de electrones Auger, la retrodispersión de iones y la espectroscopía de iones secundarios.

El análisis por activación es un método de identificación de elementos químicos. Con él se pueden medir concentraciones de partes por millón y mucho menos. Fue posible emplearlo cuando comenzaron a fabricarse fuentes potentes de neutrones, como los reactores nucleares y los aceleradores. El método consiste en colocar la muestra que se desea analizar en un flujo intenso de neutrones. Estos producen en ella reacciones nucleares de diversos tipos, y así transforman algunos de los núcleos del material en otros que son radiactivos. Una vez que se retira la muestra de los neutrones, queda activada y decae con la vida media de los nuevos núcleos. Valiéndose de un detector de centelleo o de estado sólido, se puede medir la energía de los rayos γ que emite, y esto, junto con la vida media, permite identificar el elemento. La cantidad de rayos γ que se mide depende de la cantidad del elemento que está presente. En la figura 51 se muestra un espectro típico de rayos γ provenientes de una muestra activada.

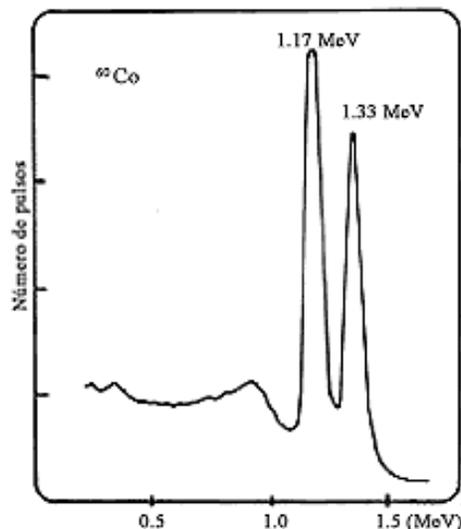


Figura 51. Espectro de rayos γ del ^{60}Co , mostrando las dos energías que emite.

Para hacer un análisis cuantitativo preciso, se necesita conocer bien las condiciones del experimento; por ejemplo, el flujo de neutrones y su energía y la probabilidad o sección de activación. Si la vida media es corta, perderá actividad en el lapso en que se transporta la muestra de los neutrones al contador. Al contar los rayos γ hay que corregir además por autoabsorción en la muestra, por radiación dispersada y por eficiencia del detector. En general las determinaciones se hacen por comparación con una muestra patrón que contiene una cantidad conocida del elemento.

Casi todos los elementos se pueden detectar por activación con neutrones, aunque para algunos elementos es más sensible que para otros. En ciertos casos difíciles existen otras posibilidades también basadas en reacciones nucleares, en que la activación se produce por protones, partículas α u otros proyectiles. Todos estos métodos se basan en que cada tipo de núcleo atómico tiene su propio modo de absorber radiación, sufrir transmutaciones y emitir fragmentos. Ni uno solo de éstos se repite entre núcleos diferentes, así que constituyen una huella digital que permite identificar elementos sin duda alguna.

La práctica del método generalmente se hace en reactores nucleares, para aprovechar el alto flujo de neutrones. Los reactores de investigación suelen estar provistos de un mecanismo neumático que transporta la muestra del corazón del reactor a los detectores con gran rapidez, para disminuir errores. También se puede llevar a cabo en un acelerador si se producen neutrones a propósito mediante alguna reacción nuclear como $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$. Se fabrican aceleradores diseñados especialmente para este uso.

Las aplicaciones del análisis por activación son prácticamente ilimitadas. Es útil en cualquier caso en que se requiera un análisis de trazas de elementos. Esto puede abarcar muestras geológicas y arqueológicas; se puede usar en biología y medicina, en estudios hidrológicos y para medir la contaminación ambiental. Se ha usado para medir la concentración de elementos en aerolitos y muestras de la Luna; también para detectar la presencia de elementos raros en minerales.

Una de las grandes ventajas de la activación por neutrones, además de su gran sensibilidad, es que no destruye la muestra, y esto es particularmente importante cuando se trata de muestras únicas o irremplazables, como las arqueológicas. La muestra puede quedar radiactiva, pero decae pronto, dependiendo de su composición, quedando esencialmente intacta. Por otro lado, tiene como desventaja su alto costo comparado con otros métodos, y, además, que no distingue compuestos químicos.

Aquí vale la pena hacer una digresión sobre cómo evaluar los distintos métodos analíticos. El usuario de cada técnica tiene la tendencia a afirmar que la suya es superior a cualquier otra, en buena parte para justificarse. La verdad es que depende del caso particular y de cada problema específico que se tiene que resolver. La activación por neutrones, por ejemplo, puede ser muy útil para un elemento, pero poco práctico para otro. En ese sentido todas las técnicas se complementan unas a otras. Algunas características que permiten averiguar qué técnica es la mejor para un análisis específico son las siguientes. La sensibilidad está relacionada con la mínima cantidad de un elemento que se puede detectar. Generalmente aumenta el costo si se requiere más sensibilidad, así que no conviene usar un aparato que rebase las necesidades del caso particular. Por ejemplo, si una muestra contiene 10% de un elemento dado, no tiene sentido usar un equipo que detecte partes por millón. El nivel de precisión de una técnica nos indica los errores cometidos al aplicarla, y por lo tanto qué tan confiables son los resultados. También la alta precisión va ligada con alto costo, y vale el mismo comentario sobre la determinación previa de los requisitos, a fin de no sobrepasarlos innecesariamente.

El tipo de información que se necesita de una muestra también determina qué técnica es más útil. El análisis por activación distingue elementos, pero no da información sobre qué compuestos químicos existen, sobre cómo son los enlaces químicos, ni si la muestra es cristalina o amorfa; para esto hay otras técnicas. La cantidad de información que da un solo análisis también es importante. Hay técnicas que analizan muchos elementos a la vez; otras que van de uno por uno, y por lo tanto son más tardadas.

Algunos aparatos están diseñados específicamente para una sustancia, por ejemplo, los monitores de monóxido de carbono en la emisión de un motor de combustión interna. Algunas veces puede requerirse información más detallada, como la localización precisa de una impureza, la profundidad de difusión de un gas en un sólido, la posición de un átomo en la red cristalina o la existencia de defectos en la red; cada uno de estos casos se puede estudiar con la técnica apropiada.

Desde el punto de vista práctico, cuentan la rapidez con que pueden obtenerse los resultados y la sencillez del procedimiento. También la forma física de la muestra es importante que sea compatible con el equipo. Un líquido, por ejemplo, no se puede introducir a un acelerador o a un microscopio electrónico para analizarlo con rayos X; habría que hacer antes una transformación química para convertirlo en sólido o en polvo, y en dicha transformación se puede perder parte de la información que se necesita. Desde luego, a todo esto hay que agregar la disponibilidad del equipo y el costo, factores que muchas veces son los determinantes cuando se selecciona una técnica. Sin embargo, si un país no quiere quedarse a la zaga del desarrollo tecnológico moderno, debe mantener, si no todas, por lo menos la mayoría de las técnicas analíticas en operación continua, segura y confiable. En la actualidad, en México este servicio lo cubren principalmente las instituciones de educación superior y las de investigación, aunque en algunos casos se tiene que recurrir al extranjero.

La fluorescencia de rayos X también da la composición química de una muestra. Se ha usado ya por muchos años para analizar minerales. Ya sabemos que cuando un átomo de una sustancia se ioniza (lo cual puede ser provocado por partículas α o β , rayos X o γ , protones, electrones, o iones pesados), al perder un electrón queda un hueco en alguna capa electrónica. Este hueco es llenado por un electrón de una capa más externa, menos ligado, y por lo tanto debe ceder energía. Un modo de hacerlo es emitir un fotón con la energía que sobra, y si la transición es entre capas K, L o M, casi siempre corresponde a rayos X. La figura 52 muestra la estructura de capas típica de un átomo, y se indican las transiciones más importantes con emisión de rayos X. Ahora bien: cada elemento tiene una separación propia entre niveles, así que la energía de los rayos X que emite es una marca característica del elemento. Uno mide entonces esta energía para identificar los elementos de una muestra.

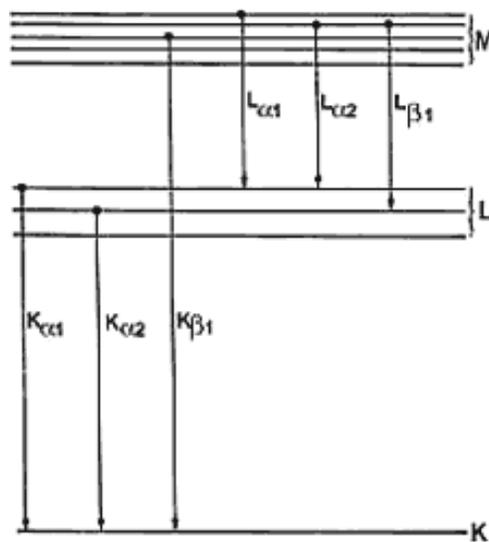


Figura 52. Transiciones más importantes entre niveles de energía atómicos.

En el Instituto de Física de la UNAM se usa este método provocando la ionización inicial con un haz de protones (véase la Fig. 53). Estos proyectiles, provenientes del acelerador Van de Graaff de 700 keV (Fig. 54), inducen la emisión de rayos X, los cuales son recogidos por un detector de silicio con litio difundido, que produce, por cada fotón que llega, un pulso de tamaño proporcional a su energía. El resultado es un espectro de energías como el de la figura 55, en que cada pico corresponde a una transición, y permite identificar tanto los elementos que la produjeron como su abundancia. En un solo espectro aparecen los picos de todos los elementos presentes; el método sirve para análisis simultáneo de todos los elementos, desde el sodio hasta el uranio.



Figura 53. Detector de rayos X acoplado a la línea de un acelerador para observar los rayos producidos al ser bombardeada la muestra por el haz de protones.

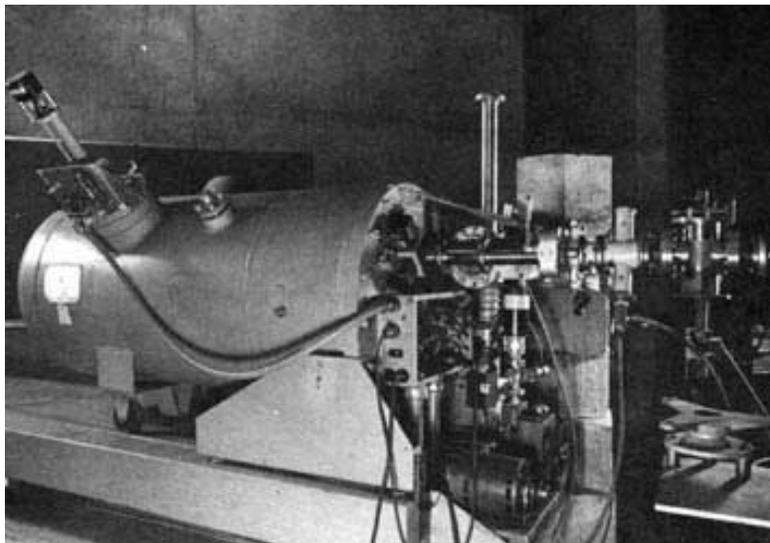


Figura 54. Acelerador de Van de Graaff de 700 kV del Instituto de Física de la UNAM.

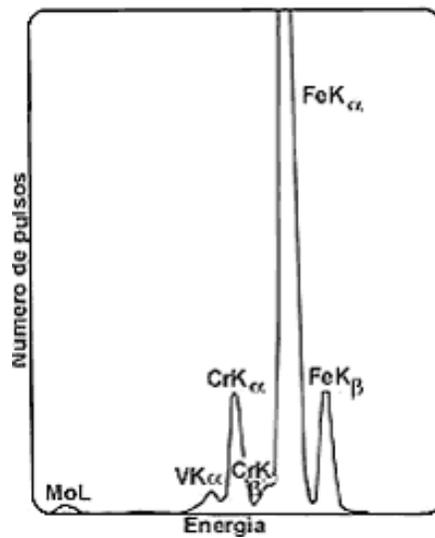


Figura 55. Espectro de energías de rayos X emitidos por una muestra de acero al ser bombardeada

con protones. Se distinguen con claridad los picos correspondientes al hierro, cromo, vanadio y molibdeno.

Estrictamente hablando, se llama fluorescencia cuando la excitación o ionización inicial es causada por rayos X incidentes. Este método es el que se ha usado comercialmente por muchos años, especialmente en minería, para analizar las componentes de un mineral con gran sensibilidad. Se usa un tubo de rayos X y se lanzan éstos sobre la muestra que se desea estudiar. Los rayos X que ésta emite pasan luego a un cristal analizador, que separa por difracción las longitudes de onda y las emite a su vez en diferentes direcciones, de acuerdo con la ley de Bragg. El detector barre todas las direcciones de salida para identificar los picos. Con este método se tiene mayor sensibilidad, pero la cuantificación es mucho más difícil que si la ionización se efectúa con protones.

Si a un microscopio electrónico se le adapta un detector de silicio, se pueden ver los rayos X inducidos por el bombardeo con electrones. Esto tiene la gran ventaja de que, además de observar la muestra con una alta amplificación, se puede saber qué elementos contiene. Si además se sincroniza la salida de pulsos del detector con el rastreo del haz de electrones, es posible saber dónde están colocados los diferentes elementos. El aparato que hace esto se llama microsonda.

Así como la ionización o la excitación atómica pueden ser provocadas por distintas radiaciones, también la desexcitación puede ser causada por un mecanismo distinto de los rayos X. Se trata de la emisión de electrones Auger, que se muestra en la figura 56. En el caso mostrado la ionización inicial se produce en la capa K. Un electrón de la capa L pasa a llenar el hueco, pero en vez de emitir un fotón, la energía que sobra se la transmite a un segundo electrón de la capa L, que sale despedido con la diferencia de energías de las capas K y L. Este proceso se denomina KLL porque en él entran un electrón K y dos L. Así como en la fluorescencia, la energía con que sale el segundo electrón L (electrón Auger) es propia de cada elemento. Para medirla se usa un analizador electrostático (Fig. 57) que produce trayectorias curvas de los electrones y las selecciona de acuerdo con su energía. Se obtiene una gráfica como la de la figura 58, en que los picos corresponden a diferentes elementos.

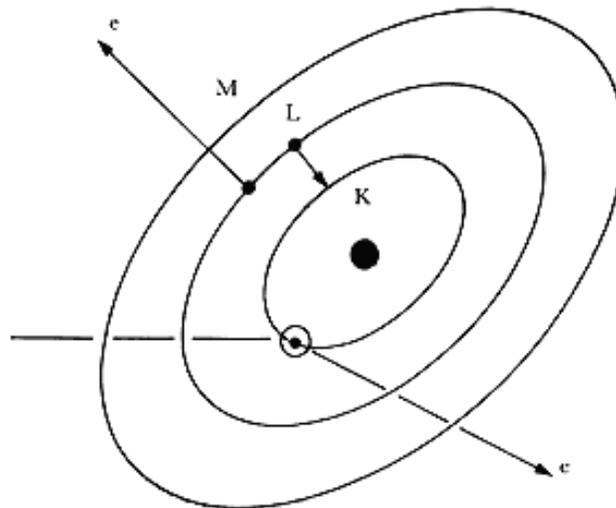


Figura 56. Mecanismo de desexcitación atómica emitiendo electrones Auger.

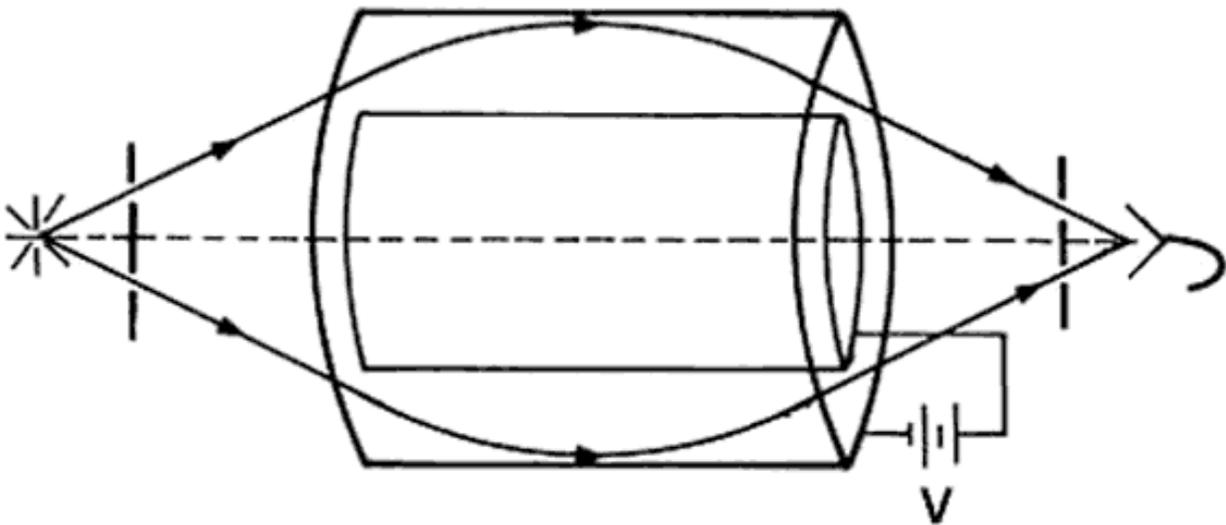


Figura 57. Analizador electrostático para medir las energías de los electrones Auger. De los múltiples electrones que emite la muestra, sólo los de la energía correcta pasan hasta el detector de la derecha.

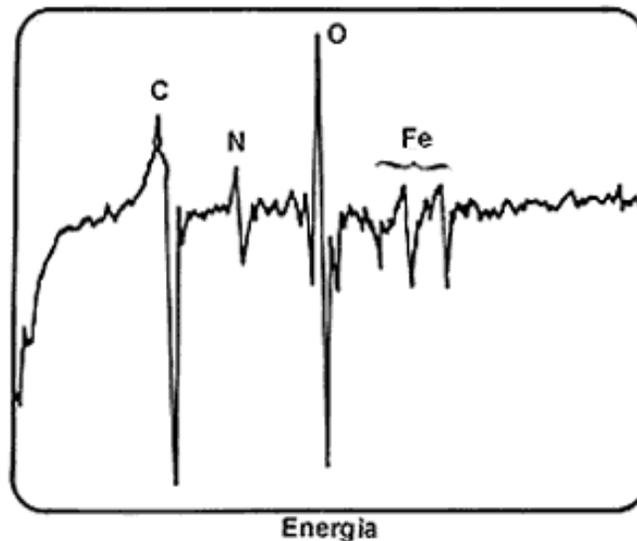


Figura 58. Espectro de energías de electrones Auger emitidos por una muestra de acero nitrurado. Se distinguen carbono, nitrógeno, oxígeno y fierro.

La espectroscopía Auger tiene la característica de que la energía de los electrones es relativamente baja; si se produce un electrón Auger muy dentro de la muestra, no logra salir. Por lo tanto, se deduce que cuando sale un electrón, éste proviene de la superficie o cuando mucho de 4 o 5 capas atómicas por debajo. Este método es, pues, muy útil para identificar elementos en la superficie de cualquier sólido, y se ha convertido en la principal herramienta para esto. Las superficies que manejamos normalmente están cubiertas por suciedad, grasa y vapores absorbidos, que ni aun los solventes pueden eliminar fácilmente; hasta en alto vacío están sucias. Por ello se usan presiones hasta de 10^{-13} de atmósfera (región de ultraalto vacío) para estas determinaciones. Para la ionización inicial, en la actualidad se usa la espectroscopía Auger en combinación con el rastreo de un haz de electrones sobre la muestra. Así puede uno tener no sólo el análisis de los elementos en la superficie, sino también su localización precisa. La figura 59 muestra un microscopio Auger de barrido que se encuentra en el laboratorio de Ensenada del Instituto de Física de la UNAM.

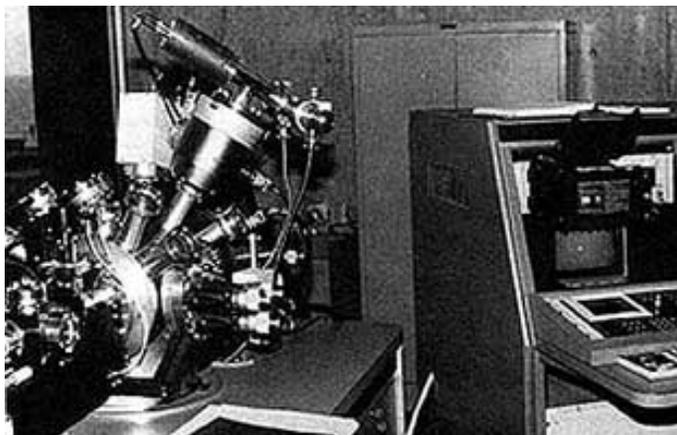


Figura 59. Microscopio de electrones Auger de barrido en el laboratorio de Ensenada del Instituto de Física de la UNAM.

La emisión de rayos X y la emisión de electrones Auger son complementarias. En general, los elementos ligeros emiten preferentemente electrones Auger, y los pesados rayos X. De ahí que cada método es más sensible para diferente región de la tabla de los elementos.

Muchas de las técnicas analíticas que emplean radiación tienen una característica especial, a saber: que el estudio se hace a golpes. Esto se realiza de la siguiente manera: se lanza un proyectil que golpea la muestra, y luego se averigua cuáles son los fragmentos que salen del choque. Es algo así como si en boliche se colocaran los pinos en cualquier posición y de cómo se dispersan al lanzarles la bola se tratase de averiguar en dónde estaban originalmente y qué características tiene cada uno. Además, el jugador está ciego, pues no sabe siquiera en qué dirección lanzar la bola, ni cuántos pinos hay. Se recurre entonces a enviar un gran número de proyectiles y hacer estudios estadísticos.

Otro método que permite hacer análisis químico de una muestra es la retrodispersión nuclear, llamada también de Rutherford, en honor de quien descubrió la existencia de los núcleos con este proceso. Si se lanzan proyectiles ligeros como protones o partículas α sobre núcleos, rebotan en ellos. La energía con que emergen después del rebote depende de la masa del núcleo: cuanto mayor sea ésta, más energía se llevará el protón. Esto se puede visualizar como un juego de canicas. Si una canica le pega a otra igual, se reparten la energía, y siempre ambas se mueven hacia adelante. En cambio, si se lanza la canica sobre una bola de boliche, ésta se mantiene prácticamente inmóvil, y la canica rebota hacia atrás casi con la misma energía que llevaba en un principio. Como se cuenta con medidores de energía de protones (y otros proyectiles) muy precisos, es posible de esta manera ir relacionando elemento por elemento con la energía del rebote. La figura 60 muestra un espectro de energías de protones rebotados en una película delgada de plástico; cada pico corresponde a un elemento. El método es muy útil para identificar elementos ligeros; los picos de los elementos pesados se amontonan unos sobre otros, y esto dificulta la interpretación.

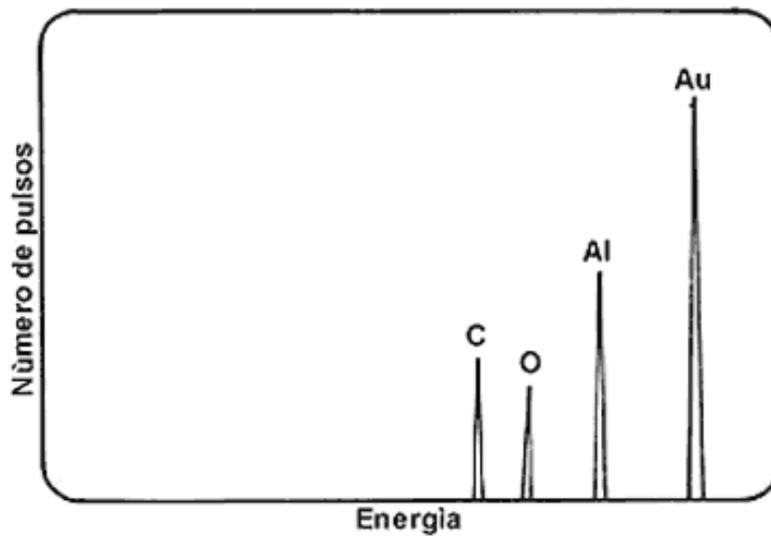


Figura 60. Espectro de protones retrodispersados por una película muy delgada de un plástico con cubierta de aluminio y oro.

Hay técnicas que, además de identificar los elementos que contiene una muestra, nos indican su localización. Desde luego, los microscopios, y especialmente los electrónicos y las microsondas, nos dan una imagen con muchos aumentos de la superficie, pero aquí nos vamos a referir a la localización por debajo de la superficie, a cierta profundidad dentro del objeto. Una manera de hacerlo es ir quitando capas y observar a cada paso los elementos que van apareciendo en la superficie. Esto, sin embargo, destruye la muestra e impide otras clases de observaciones o usos de ella. La retrodispersión de iones no destruye la muestra y sí nos da información sobre su interior. Cuando los protones o partículas α llegan a una muestra sólida, penetran en ella, y con ello pierden energía poco a poco en el proceso. Por ejemplo, un protón de 3 MeV penetra en cobre hasta 30 micras; una partícula α de 3 MeV, 5 micras. En un sólido típico, 1 micra corresponde a unas 3 000 capas atómicas. Cuando la retrodispersión sucede a cierta profundidad, el proyectil ya perdió energía, y al regresar después del choque nuevamente pierde algo, como lo muestra la figura 61. Entonces la energía con que se detecta la partícula dispersada depende no sólo del elemento con que chocó, sino también de su profundidad dentro del sólido. El espectro de energías que se obtiene es como el de la figura 62, que es esencialmente un perfil de la muestra.

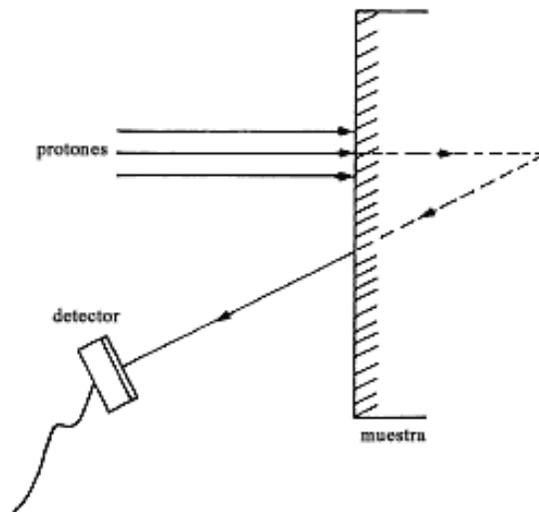


Figura 61. Arreglo de un experimento de retrodispersión de protones por un sólido.

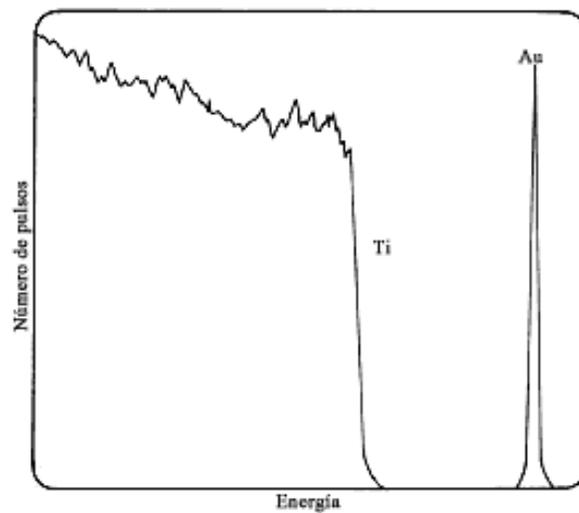


Figura 62. Espectro de energías de partículas α de 2 MeV dispersadas de una muestra de titanio sólida, con un recubrimiento muy delgado de oro.

Desde luego, cuando uno de estos proyectiles penetra, además de retrodispersarse, puede producir rayos X, electrones Auger, partículas β , rayos γ y otros productos de reacciones nucleares. Cada uno de éstos se puede observar y correlacionar con las propiedades de la muestra. Se puede determinar la abundancia, localizar impurezas y conocer perfiles, espesores de películas delgadas como óxidos, profundidad de átomos implantados y hasta estructura cristalina y daños en la red

Ya hemos visto que una superficie se erosiona cuando es bombardeada por iones. Esta erosión iónica se usa en combinación con las otras técnicas mencionadas, porque se puede ir quitando capa por capa de manera controlada, con mucha más exactitud que con un ataque químico o un desbastado mecánico. Si entre capa y capa se hace un estudio, por ejemplo de electrones Auger, se puede tener un perfil muy preciso de la composición. Muchos equipos de estudio de superficies traen integrado un cañón de iones para provocar la erosión, no sólo para ir quitando capas, sino también para limpiar las muestras al iniciar el experimento.

Cuando se erosiona una muestra, los átomos eyectados se pueden recoger en otra superficie para un análisis posterior, pero también es posible analizarlos durante su paso por el sistema de vacío. Si se les aplican en su camino un campo eléctrico y un campo magnético, se puede hacer que iones de distintas masas sigan distintas trayectorias. Éste es el método tradicional con que se han medido con gran precisión las masas atómicas. En el caso que nos interesa, es posible identificar la masa de cada uno de los productos de la erosión iónica, y con ello se obtiene la composición original. El proceso, llamado espectroscopía de masas de iones secundarios, tiene una alta sensibilidad y complementa los descritos previamente.

Las técnicas que hemos revisado aquí son sólo algunas de las muchas que hay para investigar la materia. Saltan a la vista varios puntos. Primero, todas son de alta sensibilidad, y no hay otros modos de obtener la misma información. Segundo, implican átomos individuales, los choques suceden uno por uno, aunque tal vez necesitemos millones de millones de ellos para concluir algo. Tercero, todas emplean tecnología avanzada, a saber: aceleradores o reactores, fuentes de iones, ultraalto vacío, alta precisión en la medición de campos eléctricos y magnéticos, detectores sensibles a distintas radiaciones, electrónica digital y computación.





XII. ¿HACIA DÓNDE VAMOS?

EL MUNDO actual es tecnológico. Algunos critican la tecnología porque produce humo y basura, tala de bosques, peligros nuevos, sobrepoblación y enajenación. Sin embargo, encienden su luz en la noche, se trasladan en automóvil, tienen reloj digital, refrigerador y televisor, hablan por teléfono a otro continente y de vez en cuando viajan en avión. La tecnología está aquí, nos guste o no. Rechazarla significaría volver a las cavernas, sólo que ya no hay suficientes cavernas para todos, ni animales que cazar, ni madera para quemar en las noches frías.

La tecnología para el bienestar ha predominado sobre la tecnología de la destrucción. Dependiendo de cómo la usemos, puede ser nuestra fiel amiga. No debemos desperdiciar esta oportunidad, y menos negarnos su uso. Cuando hay tecnologías probadas, como la de la radiación, estamos prácticamente en la obligación de conocerla y aplicarla.

En los países en desarrollo es común la carencia de tecnología de la radiación. Esto es especialmente alarmante cuando se trata de hospitales, como ya mencionamos, o de la generación de energía, que puede llegar a una crisis en algunos años. Sin embargo, en nuestro país los esfuerzos por desarrollar esta tecnología han sido demasiado dispersos y faltos de coordinación, si bien merecen reconocimiento por las condiciones precarias en que se han hecho y por la dedicación que han demostrado los contados ingenieros y científicos que los han llevado a cabo.

Los intentos aislados de producir alta tecnología en los países en desarrollo rara vez llegan al final del proceso. Para tener éxito, una tecnología debe estar incorporada a un proceso global que incluya otras tecnologías que la puedan apoyar. Debe nutrirse continuamente de desarrollos innovadores y métodos de investigación, y necesita tener una relación clara con las necesidades del mercado y apoyarse en procedimientos comerciales y disposiciones legales; todos ellos han de reforzarse mutuamente. Además, el desarrollo debe estar regido por programas a largo plazo, que tengan metas claras y realistas y no sean sexenales, sino sostenidos.

Veamos un ejemplo hipotético, aunque muy parecido a muchos que hemos podido observar. Supóngase que se desea desarrollar un contador de centelleo para medir la energía de rayos γ , por ejemplo, para efectuar un análisis por activación. En la figura 63 se muestra un esquema de la configuración típica de una unidad consistente, en cristal de centelleo y fotomultiplicador, diseño que se ha usado rutinariamente desde hace más de 30 años. El cristal (A) de yoduro de sodio (NaI) produce pequeñas centellas cuando le llega una radiación γ . Esta luz se transmite a un tubo fotomultiplicador (C) de vidrio a través de un buen acoplamiento óptico (B). En la superficie fotosensible (D) produce electrones que se dirigen a los electrodos en secuencia (E), llamados dinodos. Éstos aumentan en cada paso el número de electrones hasta que su corriente es suficiente para ser recogida a través del conector (F) y medirse en un circuito electrónico.

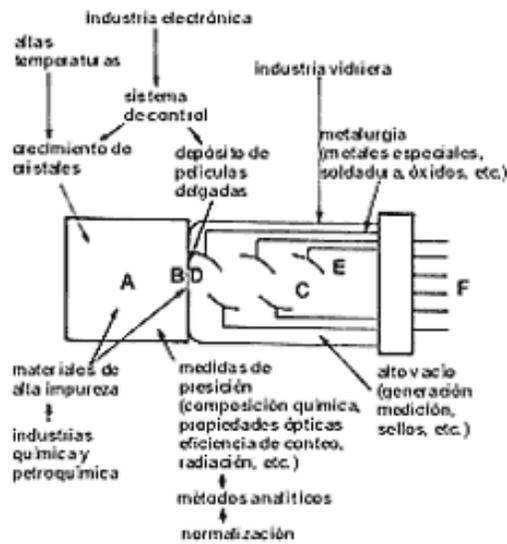


Figura 63. Un contador de centelleo. (A) es el cristal de yoduro de sodio con talio; (B) el acoplamiento óptico; (C), el tubo fotomultiplicador; (D), la superficie fotoeléctrica; (E), los dinodos, y (F) , el conector al circuito electrónico externo.

Independientemente de este circuito, que incluye tecnología de alto voltaje, electrónica digital y computación, que en si son de alta tecnología, vamos a limitarnos al cristal y fotomultiplicador. En la figura se mencionan algunos de los aspectos que implica su construcción, procesos de apoyo, e incluso las industrias que los generan. A lo indicado en la figura podemos agregar toda una lista de actividades adicionales, como el diseño, la técnica de encapsulado, el acoplamiento eléctrico, la óptica de electrones, la selección de materiales, los estudios de degradación, los cuidados especiales y la elaboración de manuales e instructivos; asimismo, se debe ofrecer servicio, elaborar estudios de mercado y establecer políticas de patentes y marcas y de transferencia de tecnología. El punto importante es que se necesitan todos ellos, y tal vez otros no considerados. En la medida en que el entorno dentro del cual se desarrolla sea capaz de proveer todos estos factores con eficiencia, calidad, confiabilidad y costo aceptable, se podrá tener éxito. Es patente que la alta tecnología no surge aisladamente, sino que es generada por la misma alta tecnología.

Los países desarrollados han logrado esta retroalimentación positivamente, para avanzar cada vez más. El proceso no ha sido rápido, pues ha requerido de muchos pasos que debieron darse con solidez. En la mayoría de los casos se ha iniciado con la investigación básica, llevada a cabo en las universidades. Luego han intervenido los grandes laboratorios nacionales y finalmente las unidades de investigación y desarrollo de las empresas. A esto todavía hay que agregar los sistemas de comercialización. Entre etapas existió un acoplamiento de lo que uno tenía que ofrecer con lo que el otro necesitaba. Además, en cada etapa había tal cantidad de acciones desarrolladas, que aunque la mayoría no progresase, las pocas que sí lo lograban fueron suficientes para sostener el avance.

Puede emplearse aquí el símil de masa crítica, que se popularizó cuando comenzó a hablarse de reacciones en cadena para liberar energía nuclear de fisión. De acuerdo con lo visto en la figura 38, si los núcleos de uranio son escasos, no se puede garantizar que por lo menos uno de los dos o tres neutrones producidos en una fisión llegue a otro núcleo para sostener la reacción en cadena. La cantidad de núcleos de uranio, y su concentración, que asegura que la reacción se mantenga es la masa crítica.

Cuando una acción científica y tecnológica encuentra apoyos en su alrededor, es posible que se genere una cadena de acciones que conducen al desarrollo tecnológico. Si no los encuentra, la acción, por valiosa, prometedora o innovadora que sea, muere. Cada paso se tiene que perfeccionar; cada acción de calidad merece apoyo, hasta que se llegue a la masa crítica.

No se malentienda que se pretende un total nacionalismo para un desarrollo tecnológico. En estos tiempos

de abundantes intercambios entre países esto se torna cada vez más difícil y es común que dependan unos de otros en tecnología, materia prima y hasta en maquila. Sin embargo, sería deseable una integración por lo menos suficiente para liberarse de presiones políticas y económicas, y hasta de aranceles, autorizaciones, convenios, licencias y disponibilidad de divisas.

El papel de las universidades y otras instituciones de educación superior es vital, no sólo porque son el único medio para garantizar la transmisión de conocimientos, sino porque en ellas se logran los primeros pasos de la cadena, la investigación básica y la orientada. Las universidades tienen también la misión de proporcionar el ambiente intelectual necesario para un desenvolvimiento serio y eficiente. Deben ofrecer todos los servicios para apoyar la investigación. Deben sostener proyectos de investigación en número suficiente para que se pueda aspirar a la masa crítica.

El investigador científico debe antes que nada estar 100% comprometido con la ciencia, porque ésta no se puede hacer sólo a ratos. Requiere de una total dedicación y disciplina mental, y exige trabajo de alta calidad y competitivo. Además, el científico es el explorador de nuestros días; debe siempre estar dispuesto a entrar en nuevas áreas. Debe también mantenerse en continuo contacto con el medio científico de todo el mundo y poder sostener colaboración intensa con sus colegas. Debe plantear sus objetivos con precisión y exigirse a sí mismo el máximo de productividad.

La radiación ha demostrado su potencialidad en un sinnúmero de aplicaciones. Nos toca ahora aprovecharla e incorporarla juiciosamente en nuestros sistemas productivos; además, con confianza y seguridad. Esto se irá logrando conforme se cuente con más personal capacitado para hacerlo responsablemente.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 2000 ejemplares.

La ciencia para Todos es una colección coordinada editorialmente por *Marco Antonio Pulido* y *María del Carmen Farías*



CONTRAPORTADA

¿Qué está en todos lados y no podemos ver? ¿Qué puede atravesarnos sin que nos demos cuenta? ¿Qué nos puede curar y, también, matar? ¿Qué nos aporta datos sobre lo más profundo de la materia? ¿Qué puede mostrar nuestros huesos sin necesidad de remover nuestra piel? y, sobre todo, ¿Qué mantiene encendido al Sol y las demás estrellas? Todas estas interrogantes tienen, sorprendentemente, una sola respuesta; la radiación ionizante.

En los últimos años tanto los científicos como las instituciones tecnológicas de todo el mundo han hecho esfuerzos considerables de investigación en el campo de las radiaciones. En consecuencia, se cuenta actualmente con un acervo considerable de información sobre un fenómeno que, a la mayoría de los hombres, parece cosa misteriosa aunque, en nuestra calidad de seres vivientes, estemos perfectamente adaptados a la radiación ambiental. Nos extraña porque no sabemos cómo funciona, cuándo se convierte en amenaza y cuándo en bendición. Los científicos han convivido ya casi cien años con ella y, poco a poco, han ido dando respuesta a las miles de interrogantes que tal fenómeno induce.

Tratar de entender las radiaciones a fondo requiere de entrenamiento profesional. Sin embargo, en palabras del doctor Jorge Rickards Campbell, autor de *Las radiaciones: reto y realidades*, "no hay razón para que no se puedan conocer ampliamente algunas de sus características primordiales. Esta es mi razón para escribir este libro con el que espero, por un lado, disipar dudas o aclarar conceptos erróneos y, por otro lado, tal vez despertar en algunos la curiosidad que conduzca, como en mi caso, a una trayectoria de investigación".

Jorge Rickards ha dedicado toda su vida profesional a la investigación y la enseñanza de la física, ciencia en la que se licenció y doctoró en la UNAM. Ha dedicado algunas etapas de su vida a la investigación en universidades e instituciones de Estados Unidos e Inglaterra. De mente analítica y ordenada, tiene gran curiosidad por conocer la naturaleza y descubrir sus secretos.

