COLEGIO DE BACHILLERES

DIRECCIÓN DE PLANEACIÓN ACADÉMICA

COORDINACIÓN DEL SISTEMA DE ENSEÑANZA ABIERTA

FÍSICA III

FASCÍCULO V

INTERACCIONES ATÓMICAS Y NUCLEARES

Javier Rojas Anaya
Armando de la Isla Quevedo

INTRODUCCIÓN

En el segundo fascículo de Física II se mencionó al Sol como una fuente de energía alternativa; posiblemente estimaste la intensidad de la radiación solar calentando agua con un bote expuesto al Sol, y concluiste que es posible considerar ésta como del orden de 1 kW/m^2; ahora estudiarás cómo se produce esa energía en su interior a partir de la síntesis de átomos de helio y revisarás algunos conceptos vistos en tus cursos de Química, que te ayudarán a entender de qué manera actúan los materiales radiactivos, explicando dicha actividad en términos de radiaciones alfa (α), beta (β) y gamma (γ), siendo esta última una radiación electromagnética, como las que estudiaste en el fascículo IV de Física III.

Por otro lado, puesto que de algún modo el presente fascículo cierra los contenidos de la materia de Física, encontrarás en él una breve Recapitulación del concepto de energía y de la importancia que tiene la Física dentro del universo del conocimiento humano.

CUESTIONAMIENTO GUÍA

Hasta ahora has estudiado a la energía y sus diversas manifestaciones: calor, luz, trabajo, presión en sólidos y en líquidos y en un circuito eléctrico, casos en que es fácil percibir los efectos de la energía con nuestros sentidos, lo cual nos permite tener cuidado en su manejo. Podemos sentir el calor, la presión de un fluido, el peso de un cuerpo o ver la luz y escuchar el sonido, pero, ¿conoces algún tipo de energía de la que nuestros sentidos no pueden dar cuenta y por ello requiera manejo especial? ¿Sabes qué es la energía nuclear, comúnmente llamada "atómica"? ¿Sabes cómo se genera? ¿Quiénes la descubrieron?

Asimismo, conoces a quien le hayan tomado radiografías con rayos X, pero ¿cómo funcionan los aparatos de rayos X? ¿Cómo se logran obtener fotografías de los huesos a través de la carne? ¿Conoces otras aplicaciones de los materiales radiactivos en la medicina? ¿Qué es un material radiactivo? Esperamos que con la lectura de este fascículo respondas a estas preguntas.

DESCUBRIMIENTO DE LA RADIACTIVIDAD

A finales del siglo XIX, entre 1895 y 1897, la Física progresó considerablemente con base en cuatro grandes descubrimientos: los rayos X, el electrón, el efecto Zeeman y la radiactividad, que se relacionaban con formas de transmisión y transformación de la energía, en aquellos años desconocidas. Mediante estos descubrimientos se supo que era posible transmitir energía de forma visible y sin necesidad de un medio material, y que la cantidad de energía factible de obtener sobrepasaba las magnitudes de energía que se producían en ese momento en la Tierra, mediante medios mecánicos o químicos. Así, preguntas a las que dieron respuesta son: ¿cómo se puede liberar gran cantidad de energía de los núcleos atómicos? y ¿qué beneficios aportaría a la humanidad el descubrimiento de dicha posibilidad?

En 1895, el alemán Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) descubrió que al aplicar una tensión suficientemente alta en un tubo de rayos catódicos (figura 1), como para originar una descarga en la pared del vidrio, se producía una flourescencia, cuyo color dependía del tipo de vidrio empleado.

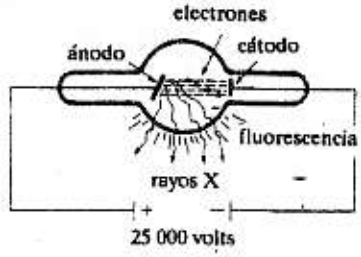


Figura 1. Obtención de los rayos X.

A los rayos invisibles que producían flourescencia, Röntgen los llamó rayos X, en virtud de su naturaleza misteriosa, y las características que observó en éstos fueron:

- Producían fluorescencia en determinadas sustancias.
- Atravesaban unos materiales y eran detenidos por otros.
- Podían revelar una placa fotográfica.
- Permitían fotografiar objetos ocultos, incluso los huesos de la mano.

En enero de 1896 la noticia del descubrimiento de los rayos X creó conmoción mundial. Podemos imaginar la admiración por estos rayos, ante los cuales casi todo era transparente y podía uno ver sus propios huesos; dedos sin carne pero con anillos puestos eran perfectamente visibles, lo mismo que un objeto metálico dentro de un cuerpo. Inmediatamente se advirtieron las implicaciones médicas que ello conllevaría.

En 1895 Röntgen comunicó su descubrimiento a varios investigadores, entre los cuales estaba el matemático francés Henri Poincaré, quien siempre había mostrado interés por la investigación en Física básica. Poincaré, miembro de la Académie des Sciences, en la reunión que ésta celebró el 20 de enero de 1896, mostró las primeras fotografías enviadas por Röntgen, y cuando Henri Becquerel le preguntó de qué parte del tubo surgían los rayos, respondió que al parecer era de la región opuesta al cátodo, aquella en que el gas se volvía fluorescente. Inmediatamente Becquerel pensó en la posible relación entre los rayos X y la fluorescencia, e investigó si las sustancias fluorescentes emitían rayos X, iniciando una serie de experimentos que en poco tiempo le condujeron al descubrimiento de la radiactividad.

En uno de sus experimentos Becquerel utilizó sal de uranio y sulfato uranílico de potasio, e informó a la academia lo siguiente:

> Envolví una placa fotográfica con dos hojas de papel negro, lo suficientemente grueso como para que la placa no fuera velada por la exposición al Sol durante un día entero. Coloqué sobre el papel una capa de sustancia fosforescente y expuse todo el conjunto al Sol durante varias horas. Cuando revelé la placa fotográfica, vi en el negativo la silueta en negro de la sustancia fosforescente [...] puede intentarse el mismo experimento colocando un vidrio delgado entre la sustancia fosforescente y el papel, lo cual excluye una acción química, resultante de los vapores que pueda emanar la sustancia cuando se calienta por los rayos del Sol. En consecuencia, podemos deducir de estos experimentos que la sustancia fosforescente en cuestión emite radiaciones que atraviesan papel opaco a la luz...[1]

Al parecer los rayos X eran realmente emitidos por el compuesto de uranio cuando flourescía; pero al reunirse la academia, Becquerel sabía algo más: al tratar de repetir los experimentos en días en que el Sol no apareció durante largos periodos, dejó en un cajón oscuro los objetos del experimento, junto con las muestras de la sal de uranio encima de las placas envueltas, ocurriendo lo siguiente:

> Puesto que el Sol no salió durante varios días, revelé las placas fotográficas el 1 de marzo, esperando encontrar imágenes muy débiles. Todo lo contrario: las siluetas aparecieron con toda intensidad. Pensé inmediatamente que la acción podía desarrollarse en la oscuridad...[2]

Becquerel había descubierto algo importante: la sal de uranio emitía rayos capaces de atravesar el papel negro, hubiera sido o no expuesto previamente a la luz del Sol. Posteriormente, el 9 de marzo de 1896, encontró que la radiación emitida por el uranio no sólo ennegrecía la placas fotográficas protegidas, sino que también ionizaba gases, convirtiéndolos en conductores. A partir de ese momento fue posible calcular la "actividad" de una muestra, midiendo simplemente la ionización que producía. El instrumento utilizado para ello fue un tosco electroscopio de hoja de oro.

En 1898 Marie Curie (1867-1934) y su esposo, el físico francés Pierre Curie (1869-1906), encontraron que el mineral de pecblenda (principalmente el U_3O_8) emitía una radiactividad más pronunciada que el uranio mismo, lo que advertía la presencia de elementos más activos que éste. Finalmente, Marie Curie aisló de dicho mineral dos nuevos elementos: el polonio y el radio. Poco después descubrió el torio y el actinio y desde entonces se han encontrado 30 elementos naturales radiactivos. También se estableció que todos los elementos químicos con número atómico mayor que 83 son radiactivos.

En la recepción del Premio Nobel de Física en 1903, Pierre Curie terminó su conferencia con las siguientes palabras:

> Es concebible que el radio pueda llegar a ser muy peligroso en manos criminales, y uno puede preguntarse si es conveniente para el hombre revelar los secretos naturales, si está preparado para beneficiarse con ellos o si este conocimiento va en detrimento suyo. El ejemplo de los descubrimientos de Nobel es característico: los explosivos de gran poder han permitido que el hombre lleve a cabo trabajos admirables. Son también un medio terrible de destrucción en manos de grandes criminales, que llevan a los pueblos a la guerra. Me cuento entre aquellos que creen, lo mismo que Nobel, que la humanidad obtendrá más bien que mal de los nuevos descubrimientos.[3]

[1] Comptes-rendus de l' Académie des Sciences, Paris 122, 1986, p. 420.

[2] Competes-rendus 126, 1086 [1896].

[3] Segre, Emilio: *De los rayos X a los quarks*. Folios Ediciones, México, 1983, pp. 110-120.

Estas palabras son notables porque revelan su conciencia de problemas que estamos debatiendo hoy.

Poco después del descubrimiento de la radiactividad, Ernest Rutherford y sus colaboradores encontraron que las sustancias radiactivas emitían gases, así como también tres tipos de rayos que llamó: alfa (α), beta (β) y gamma (γ), cada uno de los cuales mostró tener diferente capacidad de penetración en la materia. Asimismo, mediante el estudio del comportamiento de estos rayos con la acción de un campo eléctrico o uno magnético se estableció que los rayos alfa y beta son en realidad partículas cargadas, en tanto que los gamma son ondas electromagnéticas de frecuencia muy corta.

La figura 2 muestra un experimento similar al de Rutherford para determinar la carga eléctrica de las partículas α y β, así como también que los rayos γ no llevan carga. En éste, la separación de la radiación de una muestra radiactiva en sus componentes α, β y γ es mediante un campo eléctrico.

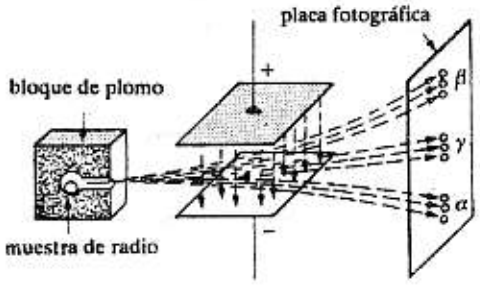


Figura 2.

Cuando el haz de rayos emergentes, provocado por el material radiactivo, sale del bloque de plomo y pasa a través de un campo eléctrico producido por placas cargadas, la trayectoria de algunos de los rayos se inclinan hacia la placa positiva (rayos β), otros hacia la placa negativa (rayos α) y unos más no se desvían (rayos γ). El campo magnético, producto de una corriente que circula en una espira, produce el mismo efecto (figura 3). Las líneas del campo son perpendiculares a la hoja y entran hacia ella.

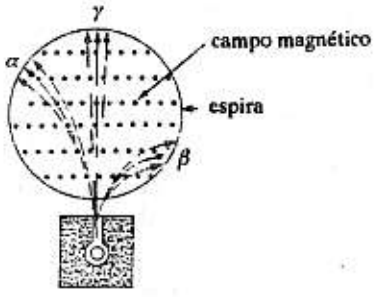


Figura 3.

Posteriormente Rutherford realizó un estudio más profundo de estas radiaciones y concluyó lo siguiente:

– Los rayos (partículas) alfa (α^+) son átomos de helio que han perdido sus dos electrones para formar iones $^{4}_{2}He^{2+}$. Estas partículas tienen carga eléctrica positiva y velocidad de 28 km/h. Por lo tanto, son de poca penetración, sin ser de mucho peligro, a menos que la fuente radiactiva esté en el interior de un organismo.

– Los rayos (partículas) beta (β^-) tienen una masa igual a la del electrón, es decir, son electrones que tienen carga eléctrica negativa y pueden viajar a velocidades próximas a la de la luz (3×10^8 m/s). Se originan porque el neutrón en sí mismo es inestable y cambia a un protón y a un electrón con emisión de energía. Cuando en un núcleo un neutrón se transforma de esta manera, el electrón resultante es rápidamente emitido como una partícula. Estos rayos son muy penetrantes y peligrosos.

– Los rayos gamma (γ) son radiaciones electromagnéticas, no tienen masa y eléctricamente son neutros. Su velocidad es la de la luz (3×10^8 m/s) y tienen gran poder de penetración. La longitud de onda de estas radiaciones es muy corta, generalmente mucho más corta que la de los rayos X. Es por ello que al usar estas radiaciones, por ejemplo en los hospitales, se deben utilizar delantales de plomo y extremar precauciones.

Los rayos α, β y γ son agentes ionizantes, es decir, penetran en la materia, sea en estado gaseoso, líquido o sólido, y al chocar contra los átomos desprenden algunos de sus electrones. Mientras más ionización produce un tipo de radiación, mayor será la energía que pierde; por lo tanto, penetrará menos en la materia. De esto se concluye que el poder de penetración es inversamente proporcional al poder de ionización.

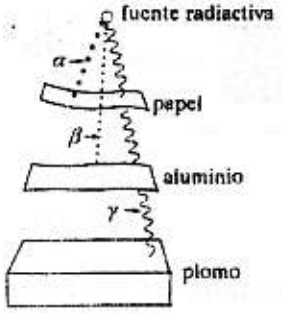


Figura 4. Materiales capaces de detener a las radiaciones α, β y γ.

CÁMARA DE NIEBLA DE WILSON

En 1912, el físico inglés C.T.R. Wilson (1859-1959) desarrolló una cámara de niebla para detectar la trayectoria de los rayos α, β y γ a simple vista, pues hasta ese momento sólo se habían observado los puntos dejados por las distintas radiaciones al llegar a una placa fotográfica, pero la trayectoria seguida realmente no se apreciaba. El principio del funcionamiento de esta cámara se basa en un conjunto de iones que deja el desplazamiento de partículas α o β; los iones se convierten en centros, alrededor de los cuales se condensa el vapor existente en la cámara y de esa manera el recorrido de las mismas se hace visible (figura 5). La cámara consta de un recipiente de vidrio a través del cual se efectúan las observaciones; el espacio encerrado de ésta contiene aire y vapor de agua saturado, y en el interior del aparato se introduce un trozo de material radiactivo. Si primero comprimimos lentamente el vapor y posteriormente lo dejamos que se expanda rápidamente (bajando el pistón súbitamente), se enfriará por debajo del punto de rocío y se precipitará la cantidad de humedad en exceso alrededor de algún núcleo de condensación que pueda estar presente. Estos núcleos son los iones formados por las partículas α o β emitidas por la muestra.

Como recordarás, en el tercer fascículo de Física II se mencionó que cuando un gas se expande éste se enfría, porque realiza trabajo y disminuye su energía interna.

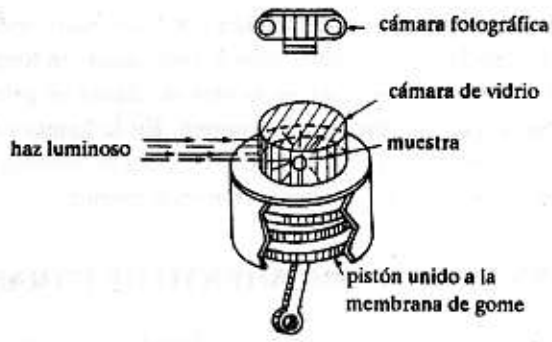


Figura 5. Cámara de niebla de Wilson.

Experimento

Para construir una cámara de niebla elemental (figura 6) se debe tener un cilindro de plexiglás cubierto con un disco de fieltro empapado con alcohol. El cilindro se apoya sobre un lecho de "hielo seco" (monóxido de carbono), el cual es un eficaz agente frigorífico, que al absorber calor se transforma en anhídrido carbónico. El alcohol evaporado desciende desde el fieltro, encuentra capas de aire cada vez más frías y se sobresatura. De este modo se obtiene una zona permanente de trabajo en la que dominan las condiciones de una cámara de niebla de Wilson.



Figura 6. Cámara de niebla elemental.

De las fotografías que se obtienen al experimentar con la cámara de niebla de Wilson se logra observar una serie de trazos rectos, gruesos, de partículas α fuertemente ionizantes, lo mismo que finas trayectorias tortuosas dejadas por los electrones o partículas β, que poseen menor poder de ionización (figura 7).



Figura 7. Cámara de niebla con dos clases de trazos dejados por las partículas α, unas más largas e intensas porque corresponden a partículas con más energía.

Las huellas de las partículas α individuales se distinguen con facilidad y, aproximadamente, constituyen grupos de igual longitud, no así las dejadas por las partículas β, que varían en longitud. Por otra parte, aunque los rayos γ también producen ionización en el aire, esto no ocurre mediante un proceso directo sino de una manera indirecta, mediante los electrones que los rayos γ desprenden. En la cámara de niebla sólo es posible ver las huellas de partículas secundarias, generadas por los electrones, pues las huellas mismas de los rayos γ no poseen carga y, por lo tanto, no pueden ser núcleos de condensación en sí mismos.

EL NÚCLEO ATÓMICO Y EL DESCUBRIMIENTO DE OTRAS PARTÍCULAS

Los avances científicos que contribuyeron al conocimiento del núcleo atómico, en orden cronológico fueron:

- El descubrimiento de la radiactividad por Henri Becquerel en marzo de 1896.
- El descubrimiento del electrón en 1897, por el científico inglés J. J. Thomson.

Pero quien dio el paso decisivo fue el científico inglés Ernest Rutherford en 1911, al formular la hipótesis de que toda carga positiva (Zw) y la masa se concentraban en un pequeño volumen, en un centro al que llamó núcleo. Éste estaba rodeado por Z electrones, que giraban alrededor de él. La atracción electrostática entre el núcleo y la carga positiva (sitio en el que se encuentran los protones) y los electrones de carga negativa, mantenían unido al átomo (con esto demostró que la materia es eléctricamente neutra).

El número Z, característico de la naturaleza química del blanco, se llamó número atómico porque representa la carga eléctrica del núcleo, medida en unidades iguales a la carga del electrón, pero de signo contrario.

La carga del electrón es igual a: -1.6×10^{-19} coulombs.
La carga eléctrica del protón es igual: $+1.6 \times 10^{-19}$ coulombs.

A cada elemento químico se le podía asociar un número entero Z, que también expresa los electrones que orbitan.

En 1929 se pensaba que la Física del futuro residía en la posibilidad de analizar el núcleo interno del átomo y se consideraba que el núcleo atómico de los elementos químicos estaba compuesto de protones o núcleos de hidrógeno y de electrones. Posteriormente se demostró que en el núcleo atómico no hay electrones libres sino que éstos rodean al núcleo y giran alrededor de él.

Sin embargo, en la combinación de varios protones, por ejemplo, cuatro para formar el átomo de helio, la masa del compuesto es ligeramente menor que la suma de las masas de los cuatro protones. Esta disminución se denomina defecto de masa del núcleo.[4]

Según lo exige la teoría de la relatividad, esta disminución de la masa debe acompañarse por la liberación de una enorme cantidad de energía. En estos fenómenos nucleares uno podría transformar materia en energía y viceversa, a razón de 25 millones de kW/h por cada gramo de materia transformada.

DESCUBRIMIENTO DEL NEUTRÓN Y DEL POSITRÓN

En 1928 Walther Bothe (1892-1957) y su alumno H. Becker dieron el primer paso hacia el descubrimiento del neutrón al bombardear berilio con partículas de polonio, y mediante métodos eléctricos de conteo descubrieron

[4] Fascículo II de Física II.

una radiación penetrante que interpretaron como rayos γ. Al tratar de medir su coeficiente de absorción, para estimar su energía y ampliar sus observaciones al litio y al boro, concluyeron que los rayos γ observados tenían más energía que las partículas α incidentes. Según ellos, esta energía tenía que provenir de la desintegración nuclear.

Fue en 1932 que los científicos franceses Irene Curie y su esposo Fréderic Joliot decidieron utilizar una muestra excepcionalmente poderosa de polonio para estudiar la radiación penetrante de Bothe: observaron mediante una cámara de ionización conectada a un electrómetro, que la radiación era capaz de expeler protones de una capa de parafina.

James Chadwick (1891-1974) repitió los experimentos de los Joliot Curie, utilizando como fuente polonio con berilio, pero hizo chocar la radiación emergente no sólo con hidrógeno sino también con helio y nitrógeno. Al comparar los retrocesos, demostró que la radiación contenía un componente neutral cuya masa era aproximada a la del protón. La denominó neutrón e hizo público el resultado mediante una carta que envió a *Nature* el 17 de febrero de 1932, fecha desde la cual se consideró al núcleo atómico compuesto por protones y neutrones; y según esta teoría el núcleo del nitrógeno de masa 14 contiene siete protones y siete neutrones. El modelo nuclear basado en la composición neutrónica-protónica es aceptado universalmente en la actualidad. Asimismo, el descubrimiento del neutrón marcó el inicio de la Física nuclear, ya que éste será la fuente de todas las aplicaciones industriales de esta disciplina.

EL POSITRÓN

En 1928 Paul M. Dirac predijo que debería encontrarse en la materia una partícula análoga al electrón pero de carga positiva, es decir, un positrón. Fue en 1932 que Carl Anderson, mientras estudiaba los rayos cósmicos, detectó en la cámara de Wilson una vía de niebla que sólo debía haberse producido por una partícula cargada positivamente y de masa muy pequeña. Atribuyó esta ruta al paso del positrón, conclusión confirmada por otros investigadores, quedando definitivamente establecida la existencia de estas partículas.

Aunque la masa del positrón es la misma que la del electrón, y su carga es igual en magnitud, pero de signo opuesto, su vida media es muy breve en comparación al electrón, que es estable. Al salir el positrón de un núcleo pierde su energía cinética rápidamente, en unos 10^{-10} segundos y al combinarse con un electrón se aniquilan ambas partículas. Para compensar la masa desaparecida se forman dos cuantos de radiación X, cuya energía total, igual a la masa desaparecida según la relación: E liberada $= (\Delta m)\, c^2$.

Existen algunos métodos disponibles en la actualidad para producir positrones; por ejemplo, cuando se bombardea el berilio, magnesio o aluminio, con partículas α, estos elementos se vuelven artificialmente radiactivos y emiten positrones. En cada caso el proceso comprende dos reacciones nucleares consecutivas, la primera de las cuales es la formación de un elemento radiactivo, en tanto la segunda es la emisión del positrón.

Para el aluminio se cumple:

$$_{13}Al^{27} + {}_{2}\alpha^{4} \longrightarrow {}_{15}P^{30} + {}_{0}n^{1} \qquad (1)$$

$$_{15}P^{30} \longrightarrow {}_{14}Si^{30} + e^{+} \qquad (2)$$

En estas ecuaciones e^+ es el símbolo para el positrón, mientras que n lo es del neutrón.

De acuerdo con la ecuación (1), el aluminio con una masa de 27 y carga de 13 reacciona con una partícula α, de masa 4 y número atómico 2, para formar fósforo de masa 30 y carga 15, y un neutrón de masa 1 y de carga cero. La ecuación (2) establece que el fósforo es radiactivo y se descompone para dar un positrón y silicio de masa 30 y número atómico 14.

Reacciones análogas resultan del bombardeo del nitrógeno, flúor, sodio, fósforo y potasio con partículas α, del bombardeo de diversos elementos con protones o neutrones; o bien, de la interacción del plomo con los rayos γ.

TEORÍA DE LA DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA

Rutherford y otros científicos concluyeron que "los átomos de una sustancia radiactiva están sujetos a una desintegración espontánea", es decir, los núcleos de los elementos radiactivos son inestables y se descomponen espontáneamente con emisión de una partícula α o β, formándose un nuevo elemento con propiedades físicas y químicas diferentes. Sin embargo, esta nueva sustancia es igualmente inestable y experimenta una transformación con la emisión de radiaciones α, β y γ.

De acuerdo con lo anterior, los átomos de algunos elementos están sujetos a la desintegración espontánea, acompañada con emisión de grandes cantidades de energía, en comparación con la cantidad de energía que se libera en las reacciones químicas ordinarias.

Después del descubrimiento del núcleo atómico quedó claro que éste sufre cambios durante las transformaciones radiactivas, pues no hay partículas α en la nube electrónica, y una disminución en una unidad del número de electrones de la nube electrónica convierte al átomo en un ion y no en un elemento químico nuevo. El lanzamiento de un electrón desde el núcleo significa un cambio en la carga eléctrica del mismo (aumenta) en una unidad. De esta manera, la *radiactividad* es la transformación espontánea de unos átomos en otros, acompañada de la emisión de diferentes partículas (α o β).

FENÓMENO DE DESINTEGRACIÓN

Cuando un átomo de radio emite una partícula α, tiene que perder una carga positiva de 2 y una masa igual a 4 protones. Esto se resume de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ccccc} \mathrm{Ra} & & \longrightarrow & \mathrm{Rn} & + \alpha \\ Z = 88 & & & Z = 86 & Z = 2 \end{array}$$

El radio se desintegra en un núcleo de radón emitiendo una partícula α.

DIFERENCIA ENTRE DESINTEGRACIÓN Y TRANSMUTACIÓN

Al fenómeno mediante el cual un núcleo determinado pierde su identidad original, para convertirse en un núcleo distinto, se le llama *desintegración*. En tanto, al cambio de identidad del núcleo se le nombra *transmutación*.

En el ejemplo propuesto, el radio se ha transmutado en radón y ha emitido una partícula α. Por consiguiente, se trata de una transmutación por desintegración espontánea, ya que no ha habido ningún agente externo que la produzca. En este fascículo es conveniente introducir una notación para designar a los núcleos atómicos en forma abreviada:

$$^{A}_{Z}\mathrm{E}$$

donde E es el nombre abreviado del elemento; el subíndice a la izquierda (Z) su número atómico y el supraíndice A, su número de masa atómica o peso.

Ejemplos

El núcleo de helio o partícula α se representa por $^{4}_{2}\mathrm{He}$, ya que su masa atómica es $A = 4$ y su número atómico es $Z = 2$.

Para el radio $Z = 88$, su número de masa es $A = 226$. Al radiar una partícula α su masa se reduce a 222 y su número atómico a 86, formando un nuevo elemento: el radón, que a su vez es radiactivo. Este proceso se puede indicar mediante la siguiente ecuación.

$$^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He} \qquad (3)$$

Se advierte en esta ecuación que la suma total de los supraíndices es igual en ambos lados de la flecha (miembros de la ecuación, es decir, $226 = 222 + 4$), lo que cumple con la Ley de conservación de la masa. La misma regla se aplica para los subíndices (en el mismo caso, $88 = 86 + 2$), aunque esto es consecuencia de la Ley de conservación de las cargas eléctricas.

¿Qué pasa con la emisión de un rayo β? La emisión de una partícula α, igual que la de una partícula β, provoca un cambio en el número atómico del núcleo en cuestión. Así, como el $^{226}_{88}\text{Ra}$ se transmuta en $^{222}_{86}\text{Rn}$ con la emisión de una partícula α, así también el polonio $^{210}_{84}\text{Po}$ se desintegra o decae en plomo, $^{208}_{82}\text{Pb}$, con la emisión de un rayo α.

LEY DE DESPLAZAMIENTO DE FAJANS-SODDY-RUSELL

Esta ley establece que si un núcleo emite una partícula α, su número atómico disminuye en dos unidades, y el nuevo elemento asciende dos posiciones hacia la izquierda en la tabla periódica. Por otra parte, cuando el núcleo original emite una partícula β, el número atómico aumenta a uno, de ahí que el producto se desplace un lugar hacia la derecha en la tabla.

¿Se puede predecir la desintegración de un núcleo? Este es un fenómeno al azar. Es imposible saber en qué momento un determinado núcleo se va a desintegrar; pero si hacemos mediciones, podremos calcular la probabilidad de que algún día decaigan, supongamos, 10 000 núcleos de Po.

VIDA MEDIA

En la teoría de la radiactividad de Soddy-Rutherford había una omisión significativa: nada decía acerca del tiempo en el cual cualquier átomo radiactivo determinado lanzaría una partícula y se transformaría con ello.

Para calcular el ritmo de desintegración, Rutherford y Soddy emplearon reglas estadísticas, en cierto sentido parecidas a las usadas por una compañía de seguros, para estimar qué tiempo vivirá una persona: como no se puede saber cuándo morirá un cliente, hacen estimaciones estadísticas y aumentando el número de sus asegurados logran cálculos aceptables; por ejemplo, estiman que toda persona de más de 50 años de edad no vivirá más allá de otros 20, aunque por otro lado se sabe que si una persona se cuida y posee una salud aceptable puede vivir hasta 70 años.

De esta manera se estableció que el radio tiene una semivida de 1 600 años, lo cual significa que después de 1 600 años la mitad de una cantidad grande de átomos de radio se habrá desintegrado formando radón, el siguiente producto de la desintegración del uranio.

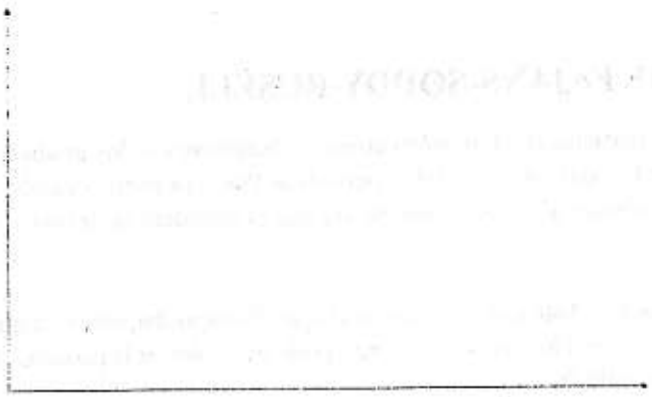
Con el objeto de darnos cuenta qué tan activa es una sustancia radiactiva, los físicos establecieron un concepto muy útil de vida media: tiempo que se requiere para que hayan decaído (desintegrado) la mitad del total de núcleos que había cuando se empezó a contar el tiempo.

Experimento

En el laboratorio o en el salón de clases formar 10 equipos, cada uno con 100 dados. Cada equipo debe arrojar los 100 dados y retirar del juego aquéllos que caigan en una cara predeterminada (seis por ejemplo).

Para facilitar la labor de retirar los dados que tengan seis puntos en una de sus caras, cubre con pintura del color que gustes la cara que tenga seis puntos, para poder identificarlos rápidamente. Con los dados restantes, "dados vivos", repite el juego sucesivamente, anotando el número de dados (vivos) que quedan en cada tirada. Posteriormente realiza una gráfica del número de dados vivos contra el número de tiradas.

Núm. de dados vivos



Núm. de tiradas

Dados vivos	*Dados muertos*	*Tiradas*
100	0	0

También puedes hacer una gráfica que tenga el resultado de todos los equipos, es decir, como si hubieran participado 1 000 dados.

La probabilidad de que un dado caiga mostrando una cara determinada es de $(\frac{1}{6})$. Puesto que el dado tiene seis caras, cada cara tiene la posibilidad de salir una vez si lo arrojamos seis veces, esto es, una sobre seis $(\frac{1}{6})$, con lo cual se muestra un comportamiento al azar, mismo caso que la desintegración de un núcleo atómico determinado: un proceso probabilístico.

Puedes observar el comportamiento de la curva obtenida en esta actividad, si al graficar consideras el conjunto total de los 1 000 dados, con lo cual puedes obtener un punto donde se muestre la vida media de los dados, y el de la figura que muestra la curva de desintegración del polonio, en donde la vida media para los átomos de polonio que han decaído es No/2 igual a 140 días.

De acuerdo con tu gráfica, ¿cuál fue el número de tiradas para 500 dados?

Con base en el experimento del lanzamiento de dados, para construir una gráfica de nt vs t (número de tiradas contra tiradas), considera n_0 = muestra = 100 dados y t = número de tiradas.

Primera tirada:

$$n_1 = \left(\frac{5}{6} n_0\right)$$

Por ejemplo, si $n_0 = 60$ dados, después de la primera tirada se retirarán los dados que cayeron en 6 y uno esperaría que permanecieran en el juego un número cercano a $\frac{5}{6}$ por 60, es decir, ya sean 50, 53, 51 ó cuarenta y nueve .

Segunda tirada:

$$n_2 = \left(\frac{5}{6}\right) n_1 = \left(\frac{5}{6}\right)\left(\frac{5}{6} n_0\right) = \left(\frac{5}{6}\right)^2 n_0$$

Tercera tirada:

$$n_3 = \left(\frac{5}{6}\right) n_2 = \left(\frac{5}{6}\right)\left[\left(\frac{5}{6}\right)\left(\frac{5}{6}\right) n_0\right] = \left(\frac{5}{6}\right)^3 n_0$$

$$nt = \left(\frac{5}{6}\right)^t n_0 = \left(\frac{5}{6}\right)^{-t} n_0$$

Con base en el razonamiento anterior demuestra que $n_5 = n_0 = \left(\frac{5}{6}\right)^5 n_0$.

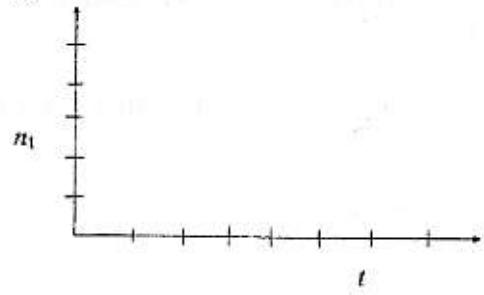
$\therefore n_t = (1.2)^{-t} n_o = 100\,(1.2)^{-t}$

$n_t = 100\,(1.2)^{-t}$

Tabular

n_t	t (*tiradas*)

graficar



Como ya se mencionó se necesitan 1 600 años para que la mitad de una cantidad dada de radio se convierta en radón; después de otros 1 600 años ya sólo quedará 1/4 de la cantidad de radio que había originalmente, y al cabo de 4 800 años ya sólo quedará 1/8, y así sucesivamente.

Ahora bien, ¿en cuánto tiempo se habrá desintegrado el polonio? La vida media del polonio es de 140 días, esto es, se desintegra más rápidamente que el radio. Por lo tanto, es más activo.

En general, mientras más corta sea la vida de un elemento tanto mayor será su actividad, por lo que decaerá en menos tiempo. La vida media de un elemento estable como el $^4_2$He o el $^1_1$H es infinita, ya que nunca se desintegra espontáneamente.

Ejemplo: Si tenemos una muestra radiactiva que tiene un número de átomos de polonio, conforme transcurre el tiempo (t), vamos midiendo el número de átomos de polonio que aún no han decaído y lo llamamos $N(t)$, indicando que el decaimiento de los átomos está en función del tiempo. Al cabo de 140 días N valdrá Número original de átomos (No)/2, después de 280 días habrá No/4 átomos de polonio que aún no han decaído, y así sucesivamente.

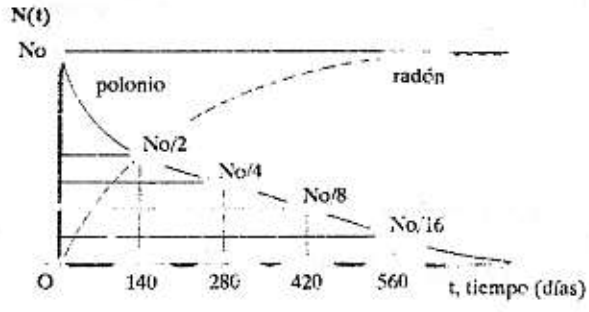


Figura 8. Curva de desintegración del polonio. La línea punteada es el número de núcleos de radón que se forman.

Puesto que al decaer cada núcleo de polonio se forma un núcleo de radón, en cualquier instante la suma de ambos debe ser igual a *No*. La curva para el radón tiene la misma forma que la del polonio, sólo que aumenta con t, en lugar de disminuir.

La actividad de un núcleo radiactivo se mide en curies (Ci).
1 Ci equivale a 3.7×10^{-10} desintegraciones sobre segundo:
1 Ci = 3.7×10^{-10} desint/s

Las unidades derivadas (submúltiplos) son el milicurie (mCi) y el microcurie (μCi), cuya equivalencia está dada por:

$1\text{m Ci} = 10^{-3}\text{ Ci} = 3.7 \times 10^{-13}$ desint/s

$1\mu\text{ Ci} = 10^{-6}\text{ Ci} = 3.7 \times 10^{-16}$ desint/s

La masa (en gramos) de un elemento radiactivo, cuya actividad es igual a un curie, se puede calcular mediante la ecuación:

$$M = 8.9 \times 10^{-14} AT\,\text{g} \qquad (4)$$

donde A es el número de masa y T la vida media en segundos.

Ejemplo

Para el polonio $A = 210$, $T = 140$ días $= 12.096 \times 10^6$ s, entonces mediante la ecuación (4):

$M(\text{g}) = 8.9 \times 10^{-14} \times 210 \times 12.096 \times 10^6 = 2.26 \times 10^{-4}$ g

Esto significa que 0.000 226 g de polonio producen una actividad de 1 Ci.

Si 2.26×10^{-4} g producen 3.7×10^{-10} desint/s, ¿cuántos gramos de polonio se necesitan para que ocurra una desint/s? Lo puedes calcular mediante una simple regla de tres:

2.26×10^{-4} g ——————→ 3.7×10^{-10} desint/s

X ——————→ 1 desint/s

Despejando X:

$$X = \frac{2.26 \times 10^{-4}\text{g} \times 1\,\frac{\text{desint}}{\text{s}}}{3.7 \times 10^{-10}\,\frac{\text{desint}}{\text{s}}} = 0.6108 \times 10^{6}\text{g}$$

$$\therefore 0.6108 \times 10^{6}\text{g} \times \frac{10^{-3}\text{kg}}{1} = 0.6108 \times 10^{3}\text{kg}$$

$X = 610.8$ kg de polonio

ISÓTOPOS

Frederick Soddy (1877-1956) contribuyó a la creación del concepto de isotopismo, según el cual, en su forma primitiva podía haber sustancias químicamente idénticas pero de propiedades radiactivas diferentes. Acuñó el término "isótopo" (que en griego significa mismo sitio) para indicar sustancias en el mismo lugar en el sistema periódico de los elementos químicos. En la naturaleza existen isótopos radiactivos e isótopos estables (ver ejemplos de isótopos radiactivos en la tabla 1).

Isótopos estables. Casi todos los elementos químicos tienen un isótopo estable, siendo uno de los ejemplos más notables el estaño, el cual llega a 10. Otros ejemplos de éste tipo de isótopos son: ${}^{4}_{2}He$, ${}^{12}_{6}C$, ${}^{16}_{8}O$, ${}^{88}_{38}Sr$ ${}^{208}_{82}Pb$.

Tabla 1. Algunos isótopos radiactivos.

Elemento	*Símbolo*	*Número atómico*	*Número de masa*	*Vida media*
Carbono	C	6	14	5 568 años
Azufre	S	16	35	87.1 días
Calcio	Ca	20	45	152 días
Cobalto	Co	27	60	5.3 años
Plata	Ag	47	110	270 días
Oro	Au	79	198	2.7 días
Mercurio	Hg	80	205	5.6 min
Plomo	Pb	82	209	3.3 h
Polonio	Po	84	210	140 días
Polonio	Po	84	213	10^{-6} s
Radio	Ra	88	225	14.8 días
Radio	Ra	88	226	1 600 años
Uranio	U	92	233	1.63×10^{5} años
Uranio	U	92	234	3×10^{5} años
Uranio	U	92	238	2×10^{9} años

Isótopos radiactivos

El átomo normalmente se forma por números iguales de protones y electrones; por ejemplo, al analizar la estructura atómica del hidrógeno vemos que todos los átomos de hidrógeno tienen un protón y un electrón, pero algunos tienen además uno o dos neutrones.

Las tres variedades del hidrógeno son químicamente iguales, ya que estas propiedades las determina el único electrón que posee el átomo de hidrógeno, aunque no tienen la misma masa atómica. Estas formas de un elemento se llaman isótopos. Por consiguiente, los isótopos pueden definirse como átomos que tienen diferentes masas atómicas, pero que pertenecen al mismo elemento químico y tienen el mismo número atómico.

Isótopos del hidrógeno: hidrógeno (${}^{1}_{1}H$), deuterio (${}^{2}_{1}D$) y tritio (${}^{3}_{1}T$)

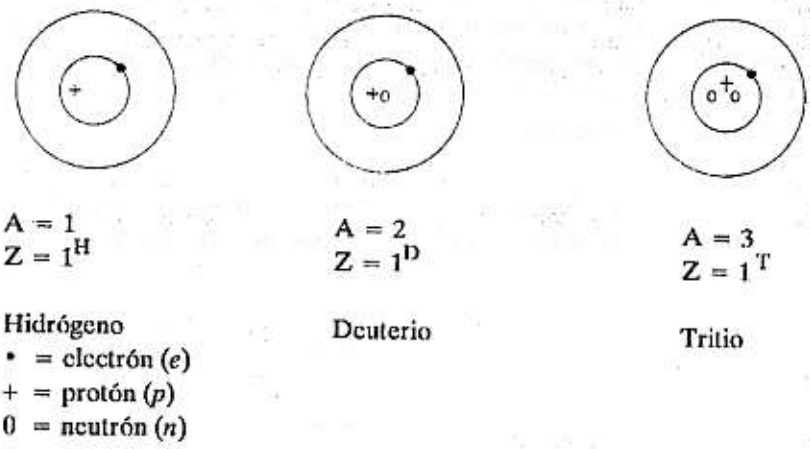


Figura 9. Isótopos del hidrógeno.

Z = número atómico = número de electrones que hay en un átomo en la vecindad (alrededor) del núcleo. También se define como el número de protones que hay en el núcleo atómico.

A = número de masa = número de protones + número de neutrones en el núcleo de un átomo = número de nucleones. El número de masa o número de nucleones = (A) siempre es un número entero.

RADIOISÓTOPOS

Los radioisótopos son isótopos radiactivos, esto es, al desintegrarse emiten algún tipo de radiación. Asimismo, aunque varían en la rapidez con la que se desintegran, los radioisótopos principalmente emiten tres tipos de radiación conocidas como: rayos α , β y γ. Un radioisótopo al desintegrarse forma nuevos radioisótopos, y al continuar las reacciones, finalmente el núcleo se convierte en un isótopo estable (no radiactivo).

Los radioisótopos y los átomos radiactivos, aunque de naturaleza inestable, reaccionan químicamente con el átomo estable (las propiedades químicas las da el número atómico Z y no el número de masa A, que es lo que distingue a un isótopo de otro, correspondientes al mismo elemento), hasta el momento en que emite sus radiaciones y se transforma en otra sustancia estable.

Actualmente se utilizan ciertos tratamientos con radiactividad para curar el cáncer, en estudios genéticos con cultivos y en cirugía cerebral. A continuación verás sus aplicaciones.

Aplicaciones en la industria

Para detección de fugas y obstrucciones en tuberías; detección de corrosión y velocidades de flujo, evaluación de la durabilidad de un equipo, producción y/o eliminación de electricidad estática, medición de volúmenes; eficiencia de mezclado en problemas de difusión; radiografías y gammagrafías industriales, etcétera.

Aplicaciones en la Medicina

Localización de tumores, radioterapia, tratamiento de tumores inoperables; funcionamiento de órganos como el corazón y la tiroides, metabolismo de grasas y azúcares, medición de volúmenes de fluidos en el organismo, vida

media de glóbulos rojos, esterilización de equipo médico y material quirúrgico, esterilización de sueros, vacunas, etcétera.

Aplicaciones en la agricultura

Control de plagas mediante la esterilización de machos, inhibición de brotes en tubérculos y raíces comestibles; producción de mutaciones benéficas en granos, plantas y semillas; radiopreservación de carnes, mariscos, hortalizas, etcétera.

Aplicaciones en Química

En catálisis de reacciones químicas, inducción de polimerización, desalinización del agua de mar, en análisis por dilución isotópica, análisis por activación, en el Cracking del petróleo, añejado de vinos, etcétera.

Entre otras aplicaciones de los radioisótopos destacan: el fechado con carbono 14 y con el uranio.

Fechado con carbono 14

Sobre la superficie de la Tierra hay cierto número de elementos radiactivos, que se producen continuamente en la atmósfera, debido al bombardeo de los rayos cósmicos. Entre éstos el más interesante es el isótopo de carbono-14, que se produce a partir del nitrógeno atmosférico, por el choque (impacto) de un neutrón de alta energía

$$\left({}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \longrightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}\right),$$

y se incorpora a las moléculas de bióxido de carbono atmosférico. Éste lo emplean las plantas para su crecimiento (consumido en la fotosíntesis, en la cual se libera oxígeno), el carbono radiactivo se incorpora en cada planta. En consecuencia, todas las plantas tienen una pequeñísima cantidad de C-14, radiactivo; los animales comen plantas y, por lo tanto, tienen en su organismo un poco de carbono-14. Al morir una planta o un animal, sus procesos metabólicos se detienen en su cuerpo, ya no hay suministro nuevo de C-14, y su cantidad disminuye gradualmente a una tasa conocida, conforme transcurre el tiempo.

La forma de fechar con C-14 se puede ilustrar como sigue: en las viejas novelas policiacas, un recurso para determinar la hora en que sucedió el crimen era ver el reloj del occiso, pues era común leer que, al ser asesinado y caer, golpeaba su reloj y éste se detenía. Pensemos ahora que cierto individuo usa un reloj siempre marcando las 0:00 hrs. y que al ser asesinado y caer, el golpe activa el reloj, de tal manera que al ser encontrado y mirar su reloj se sabría el tiempo que transcurrió desde el asesinato; puesto que el C-14 tiende a disminuir gradualmente después de que el ser vivo que lo contiene muere, es una forma de marcar el tiempo que ha pasado desde su muerte.

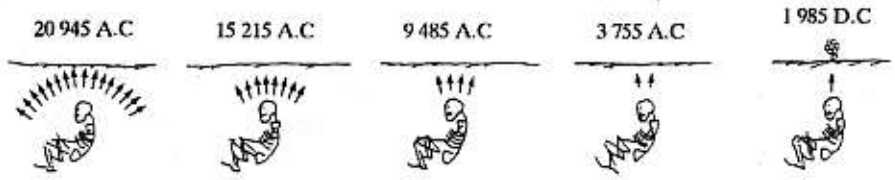


Figura 10.

La vida media del isótopo de C-14 es de aproximadamente 5 730 años y su decaimiento de milenios. Por consiguiente, al medir la razón de $^{14}_{6}C$, a $^{12}_{6}C$, en muestras arcaicas de madera, seremos capaces de estimar en forma bastante exacta los restos de su origen (figura 11).

Mediante el C-14 es posible medir la radiactividad actual de plantas y animales y compararla con la radiactividad de materia orgánica antigua. De esta manera podemos sondear hasta 50 000 años en el pasado y averiguar cuestiones como la edad de los restos fósiles que existieron en las civilizaciones antiguas, o cuando la Era Glacial cubría la Tierra.

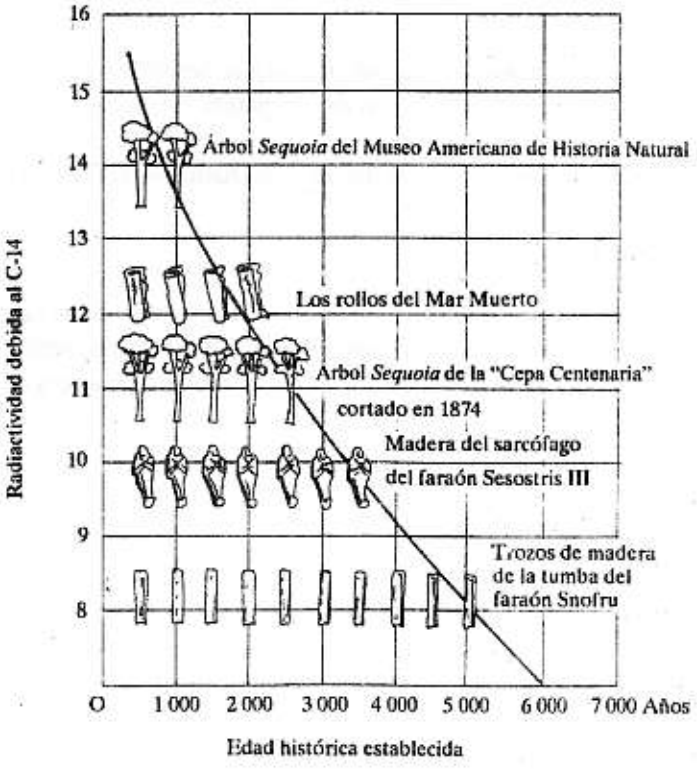


Figura 11. Algunas formas de fechar con carbono-14.

Fechado con uranio

El fechado de objetos más antiguos, pero de origen inorgánico, se realiza con minerales radiactivos, como el uranio. Ya vimos que el uranio es el padre de todos los elementos radiactivos que pertenecen a su familia, y que el producto final de toda desintegración es un isótopo estable de Pb^{206}. Los isótopos que se presentan en forma natural, U-238 y U-235, se desintegran con bastante lentitud, y finalmente se transforman en isótopos de plomo. Conociendo la vida media de los isótopos del uranio se puede determinar el porcentaje de cada isótopo radiogénico del plomo en una muestra de roca, por lo que es posible calcular el tiempo de desintegración del uranio presente en ella. Por este procedimiento se han determinado edades de rocas hasta de 3 700 millones de años. También se han analizado algunas muestras de la luna, donde ha habido menos erosión e intemperismo de las rocas primitivas que en la Tierra, y se han fechado en 4 200 millones de años, lo cual en principio concuerda con la edad establecida que tiene el planeta y el sistema solar: 4 600 millones de años.

FISIÓN NUCLEAR

¿Cómo se descubrió la fisión nuclear? ¿Cuáles son sus principales aplicaciones? ¿Qué sucede al bombardear un núcleo pesado con neutrones? ¿Qué es una reacción en cadena y por qué ocurre en la fisión del uranio-235? ¿Por qué un neutrón es mejor proyectil nuclear que un protón o un electrón?

En 1938 dos científicos alemanes, Otto Hahn y Fritz Strassman, descubrieron la fisión nuclear. Al bombardear una muestra de uranio con neutrones, encontraron entre los productos resultantes bario radiactivo, un elemento con aproximadamente la mitad del tamaño del uranio. Al tener noticias de este descubrimiento, en enero de 1939 Lise Meither y Otto Frisch, quienes se encontraban trabajando en Suecia, al repetir el experimento encontraron que el núcleo del uranio, activado por el bombardeo de neutrones, se había partido por la mitad. Meither nombró al proceso fisión, debido al proceso similar de división celular que se presenta en la biología.[5]

La energía liberada al llevarse a cabo la fisión es de 200 millones de eV, en un tiempo de 10^{-14} segundos (la explosión de una molécula de TNT libera 30 eV). La reacción que se produce en la fisión del uranio-235 es la siguiente:

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{91}_{36}Kr(\text{kriptón}) + {}^{192}_{56}Ba(\text{bario}) + 3\left({}^{1}_{0}n\right) $$

En el proceso de fisión nuclear se liberan neutrones (como se observa en la ecuación anterior), que a su vez desintegran a otros átomos de uranio, originándose una reacción en cadena (figura 12).

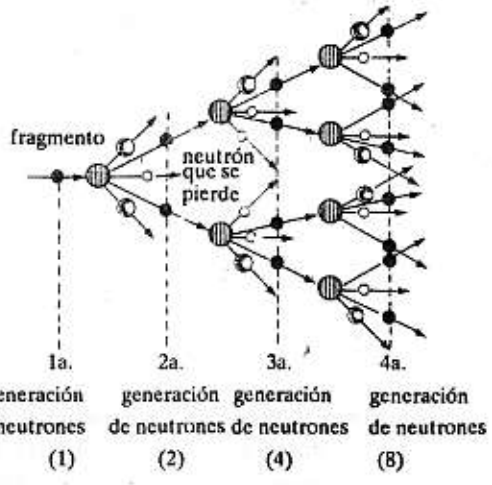


Figura 12. Reacción en cadena.

OTROS ASPECTOS DE LA FISIÓN

- Todos los elementos más pesados que el ${}^{56}_{26}Fe$ (hierro) son fisionables.
- Los "neutrones lentos" con energías del orden del eV, no ocasionan ningún efecto sobre el U-238, pero en cambio producen la fisión del U-235.

[5] Lovett C., Barbara: *Los creadores de la nueva Física. Los físicos y la teoría cuántica*. FCE, México, 1983, pp. 11-30.

Energía cedida por la fisión

Mediante mediciones directas de calor, se puede determinar la energía promedio cedida en la fisión. Ésta se reparte como sigue:

	MeV
Energía cinética de los fragmentos	159
Energía cinética de los neutrones	7
Rayos β de los productos de la fisión	11
Rayos α de los productos de la fisión	23
Total	200 MeV

Para obtener una estimación de la energía total cedida se hace un balance de masas mediante la expresión E (liberada) = $(\Delta m)\ C^2$, como se ilustra en el siguiente ejemplo:

Cálculo de la energía cedida en la fisión del U-235 que produce zirconio (Zr) estable y praseodimio (Pr).

Masas iniciales	u.m.a.
235 U	235.124
1 neutrón	1.009
Masa de los productos	236.133
92 Zr	91.942
141 Pr	140.959
3 neutrones	3.027
	235.928

Δm = m(inicial) – m (producto) = 0.205 u.m.a.

Otra unidad de energía usada en los procesos nucleares es el *megatón*. En Física II leíste que al quemar un kilogramo de combustible "químico" se libera energía del orden de 10 MJ. Por consiguiente, al quemar una tonelada de combustible (o se hace explotar una tonelada de dinamita) se liberan más de 10 MJ $\times$ 1 000 = 10^4 MJ y para un millón de toneladas la energía liberada sería del orden de 10^4 MJ $\times$ 10^6 = 10^{10} MJ. Esto corresponde a lo que se llama un megatón, que es la unidad de energía liberada en un segundo.

Lisa Meitner y Otto Frisch utilizaron el modelo de gota, propuesto por Gamow y mejorado por Bohr, para explicar el fenómeno de la fisión. En éste el núcleo se trata como una gotita de líquido. Según Gamow, los núcleos atómicos de los diferentes elementos se pueden considerar como gotitas de diverso tamaño de un fluido nuclear (figura 13).

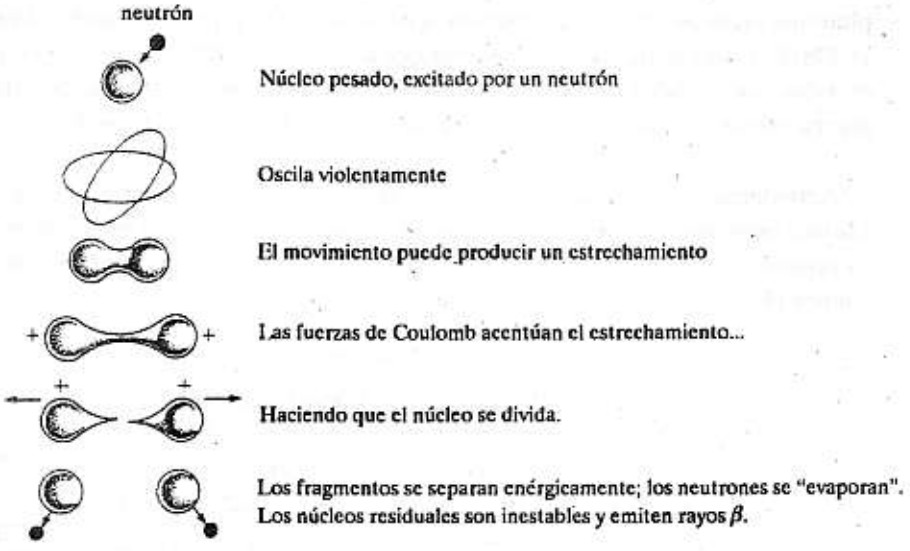


Figura 13. Fisión de un núcleo pesado según el modelo de la gota.

La semejanza cualitativa del modelo de gotas con el núcleo, aunque sólo es una representación esquemática, resulta muy expresiva para comprender la fisión.

APLICACIONES DE LA FISIÓN NUCLEAR

Este proceso se aplicó por primera vez en la construcción de la bomba nuclear. Fue el 2 de diciembre de 1942 que el físico italiano y jefe del proyecto Manhattan, Enrico Fermi, produjo la primera reacción en cadena dentro de la primera pila atómica hecha de ladrillos de grafito, la que contenía uranio-235, logrando desintegrar la materia para obtener energía.

Posteriormente, el 6 de agosto de 1945, la ciudad de Hiroshima, Japón, fue arrasada por la explosión de una bomba nuclear con lo que el mundo entraba en la Era Atómica.

El uranio de una bomba nuclear se desintegra en billones de fragmentos atómicos en fracciones de segundo, originando esta explosión millones de grados de temperatura y un devastador huracán que avanza en todas direcciones; el aire incandescente se eleva formando una nube parecida a un hongo gigantesco y en el suelo, el agua y la atmósfera, quedan muchas partículas con mortal radiactividad.

No obstante, la fisión nuclear también se utiliza con fines pacíficos. Si la reacción en cadena ocurre con gran rapidez y de manera incontrolada, se produce una violenta explosión; mas si la reacción se controla y se lleva a una situación estacionaria, se tiene una fuente de energía.

No todo el uranio es fisionable, pues una reacción en cadena no es posible en el uranio natural puro, ya que éste es en su mayor parte uranio-238. El uranio fisionable es el U-235, presente en el uranio natural con una proporción de una parte en 140. Había dos caminos para construir una bomba nuclear: la separación isotópica del uranio-235 o la formación de una cantidad suficiente de plutonio (Pu^{239}).

El objetivo principal de la pila atómica de Fermi fue producir el elemento químico artificial plutonio, siendo el plutonio-239, al igual que el U-235, fisionable. La bomba atómica que explotó sobre Nagasaki se fabricó con

plutonio, elemento que no se encuentra en la naturaleza, pero se puede fabricar en forma sintética a partir del U-238. Por otra parte, como el plutonio es un elemento diferente al uranio, puede separarse de éste en la pila atómica por métodos químicos comunes. En ésta se realiza un proceso para hacer material fisionable puro, con mucha mayor facilidad que mediante la separación del U-235 a partir del uranio natural.

Actualmente el uso principal que se le da a los reactores nucleares es para la producción de energía eléctrica. México tiene uno en operación en Laguna Verde, Veracruz; en éste el "calor" generado hace hervir el agua para producir el vapor que acciona la turbina, la cual a su vez hace funcionar los generadores de energía eléctrica (figura 14).

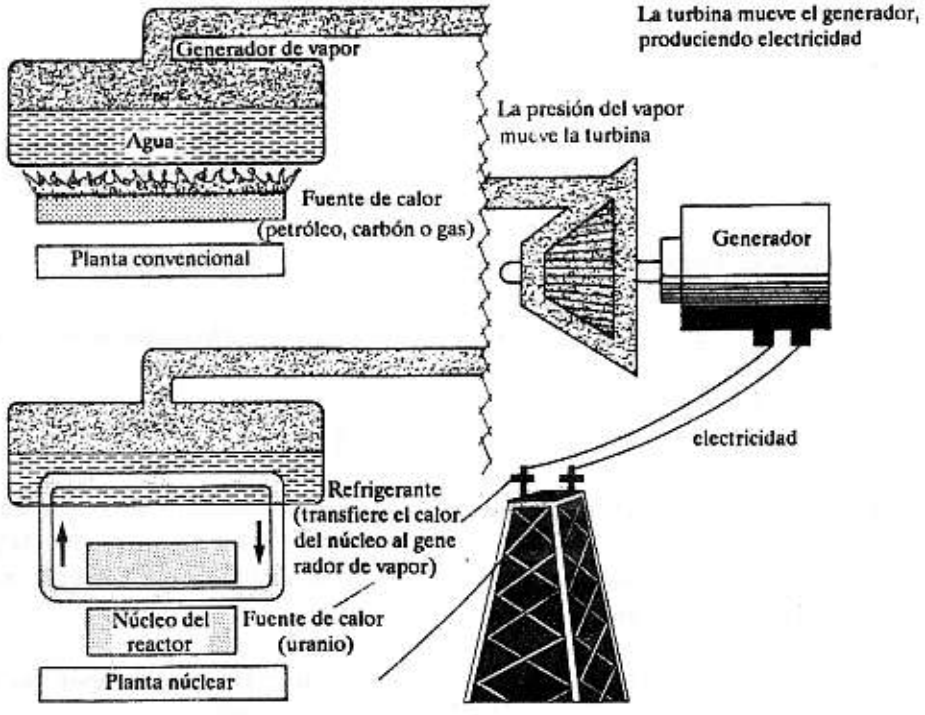


Figura 14. Reactor nuclear.

Los beneficios de la energía obtenida por la fisión son electricidad abundante; la conservación de muchos miles de millones de toneladas de carbón, petróleo y gas natural, que en lugar de quemarse como combustible, a la larga son más provechosos como fuentes de moléculas orgánicas que como fuentes de calor; y con ello combatir la contaminación atmosférica, eliminando millones de toneladas de óxidos de azufre y otros gases venenosos, que cada año se liberan en el aire. Entre las desventajas está el problema de los desechos radiactivos (problema actual en México), la producción del plutonio y el peligro de la proliferación de armas nucleares, además del riesgo de una liberación accidental de grandes cantidades de radiactividad.

FUSIÓN NUCLEAR

En el interior del Sol ocurren colisiones entre núcleos atómicos, de las que resultan transformaciones de átomos livianos en átomos pesados, de manera que se forman los átomos de helio y otros elementos a partir del hidrógeno. ¿Qué se requiere para este proceso?

En 1929 Atkinson y Houtermans sugirieron a la fusión nuclear como fuente de energía del Sol y de las estrellas; una década después Hans Bethe, a partir de esta idea, propuso una secuencia de reacciones nucleares que podrían liberar grandes cantidades de energía similar a la que creemos ocurre en el Sol. Ello se logró en 1954 al estallar la primera bomba de hidrógeno.

Si en la química clásica existen dos procesos o reacciones químicas que son cualitativamente iguales a la fusión y la fisión, ¿por qué entonces en una reacción química, como la que a continuación describiremos, los científicos no fueron capaces de descubrir la equivalencia entre masa y energía desde hace siglos? Porque las energías involucradas son incomparablemente menores que en el dominio nuclear, de modo que las correspondientes pérdidas de masa son indetectables, aun para los aparatos más modernos.

Cuando moléculas de oxígeno se mezclan con moléculas de hidrógeno para formar agua:

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O + \text{energía liberada}$$

tiene lugar una reacción exoenergética (es decir, se libera energía) en la cual se produce una cantidad considerable de calor; de hecho la temperatura de la flama que se produce en la reacción alcanza los 2 800 °C. Este es el análogo químico de la fusión.

La energía liberada en la anterior reacción es apenas del orden de unos cuantos electronvolts (eV), que comparados con los millones de electronvolts (MeV) de una reacción nuclear, resultan despreciables.

Por otra parte, el fulminato de mercurio —compuesto de mercurio cuya fórmula es $Hg(CNO)_2$— proporciona un ejemplo químico análogo a la fusión. En efecto, cuando se le golpea, explota, es decir, se parte bruscamente en sus componentes, produciéndose una violenta expansión de los gases a altas temperaturas, lo cual se manifiesta como una onda de choque explosiva que se propaga con una velocidad de aproximadamente 3 000 metros/segundo.

REACCIONES TERMONUCLEARES O DE FUSIÓN

Una reacción de fusión es más eficiente que una de fisión, porque aproximadamente el 1% de la masa inicial se transforma en energía, en contra de un 0.09% en la fisión, es decir, diez veces más. Con base en esto muy bien podríamos preguntar ¿por qué el hombre ha construido reactores de fisión y no de fusión? La respuesta nos la da la dificultad de iniciar y mantener estable un proceso autosostenido de fusión.

Las reacciones de fusión que ocurren en el Sol y en otras estrellas se denominan reacciones termonucleares, lo cual no es otra cosa que la soldadura de los núcleos atómicos por la alta temperatura. Para que ocurra una reacción de este tipo los núcleos deben chocar a velocidades muy altas, con el fin de vencer la repulsión eléctrica mutua, y éstas únicamente corresponden a temperaturas extremadamente altas que se encuentran en el Sol y en las estrellas. A la elevada temperatura del Sol, alrededor de 657 millones de toneladas de hidrógeno se convierten en 653 millones de toneladas de helio cada segundo. Los restantes cuatro millones de toneladas se descargan como energía. Se puede decir, en forma un tanto literal, que estas reacciones son combustiones nucleares, en tanto las reacciones termonucleares son análogas a la combustión química común.

Antes de la reacción de la bomba atómica, las temperaturas requeridas para iniciar la fusión nuclear sobre la Tierra eran inalcansables, mas al descubrirse que las temperaturas en el interior de la explosión de una bomba atómica son de cuatro a cinco veces la correspondiente al centro del Sol, la bomba termonuclear quedó al alcance de la mano. Esta primera bomba de hidrógeno se detonó en 1954.

En tanto que la masa crítica[6] del material fisionable limita el tamaño de una bomba de fisión (bomba atómica), no existe límite alguno de este tipo para la bomba de fusión (bomba termonuclear o de hidrógeno). Como en el caso de un depósito de petróleo, aunque un simple fósforo puede encender un depósito de petróleo, nada que sea menos energético que una bomba de fisión puede iniciar la combustión de una bomba termonuclear. Por ello, cualquier cantidad de combustible nuclear puede almacenarse de manera segura, hasta que se enciende.

REACCIONES DE FUSIÓN

Las reacciones de fusión que parecen más prometedoras como origen de energía son: la combinación directa de dos deuterones de una de las siguientes maneras:

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 3.26\ MeV$$

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{0}H + 4.0\ MeV$$

Y la combinación directa de un deuterón y un tritón para formar una partícula α:

$$^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17.6\ MeV$$

Los isótopos del hidrógeno, deuterio, $^{2}_{0}H$, y tritio, $^{3}_{0}H$, son las sustancias químicas necesarias para llevar a cabo las reacciones anteriores, y se encuentran en forma abundante en los océanos. Por ejemplo, 30 litros de agua de mar contienen un gramo de deuterio, que al fusionarse, libera tanta energía como 10 000 litros de gasolina o el equivalente a 80 toneladas de nitrotolueno (TNT). Esta abundancia de combustible para fusión hace que la cantidad de energía que puede liberarse de manera controlada sea casi ilimitada.

La fusión controlada se produce empleando gases calientes, completamente ionizados, dentro de un campo magnético potente. La finalidad de tener una temperatura elevada, es asegurar que los núcleos individuales de $^{2}_{1}H$ y $^{3}_{1}H$ tengan energía suficiente para reunirse y reaccionar a pesar de la repulsión electrostática. El campo magnético se emplea como recipiente, para guardar el gas reactivo de cualquier contacto con otro material que pueda enfriarlo o contaminarlo; la posibilidad de que se funda la pared es mínima puesto que el gas, aunque tenga una temperatura de varios millones de °C, no tiene una densidad de energía elevada. Aunque los reactores de fusión presentan más dificultades prácticas que los de fisión, se tiene la esperanza que llegarán a ser una realidad en el siglo XXI.

[6] Masa crítica: mínimo material fisionable en un reactor o bomba nuclear que sostendrá una reacción en cadena.

LECTURA

RELACIÓN DE LA FÍSICA CON OTRAS CIENCIAS *

Introducción

La física es la más fundamental y general de las ciencias, y ha tenido un profundo efecto en todo el desarrollo científico. En realidad, la física es el equivalente actual de lo que se acostumbra a llamar filosofía natural, de la cual provienen la mayoría de nuestras ciencias modernas. Estudiantes de muchas disciplinas se encuentran estudiando física a causa del rol básico que ésta juega en todos los fenómenos. En este capítulo trataremos de explicar cuáles son los problemas fundamentales en las otras ciencias, pero, por supuesto, es imposible realmente tratar en un espacio tan reducido las materias complejas, sutiles y hermosas de esos otros campos. La falta de espacio también impide que discutamos la relación entre la física y la ingeniería, la industria, la sociedad y la guerra, o aun la más notable relación entre la matemática y la física. (La matemática no es una ciencia desde nuestro punto de vista, en el sentido que no es una ciencia natural. El experimento no es una prueba de su validez.) Debemos, incidentalmente, dejar en claro desde un comienzo que si una cosa no es una ciencia, no es necesariamente mala. Por ejemplo, el amor no es una ciencia. De manera que, si se dice que algo no es ciencia, no significa que haya algo malo en esto; significa simplemente que no es una ciencia.

Química

La ciencia que es quizás la más profundamente afectada por la física es la química. Históricamente, en su comienzo, la química trataba casi enteramente de lo que ahora llamamos química inorgánica, la química de las sustancias que no están asociadas con los objetos vivientes. Se necesitó de un análisis considerable para descubrir la existencia de muchos elementos y sus relaciones –cómo forman los numerosos compuestos relativamente simples que se encuentran en las rocas, la tierra, etc. Esta química primitiva fue muy importante para la física. La interacción entre las dos ciencias era muy grande porque la teoría de los átomos fue comprobada en gran parte con experimentos de química. La teoría de la química, es decir, de las reacciones mismas, fue resumida ampliamente en la tabla periódica de Mendeléev, la cual establece numerosas relaciones extrañas entre los diversos elementos, y fue la colección de reglas sobre qué sustancia se combina con cuál otra y cómo, lo que constituyó la química inorgánica. Todas estas reglas fueron últimamente explicadas en principio por la mecánica cuántica, de manera que la química teórica es en realidad física. Por otro lado, debe ponerse énfasis en que esta explicación es *en principio*. Ya hemos discutido la diferencia entre saber las reglas del juego de ajedrez y ser capaz de jugar. De manera que podemos conocer las reglas, pero no podemos jugar muy bien. Resulta así muy difícil predecir precisamente qué sucederá en una reacción química dada; sin embargo, la parte más profunda de la química teórica debe terminar en la mecánica cuántica.

Hay también una rama de la física y la química que ambas ciencias desarrollaron conjuntamente y que es extremadamente importante. Este es el método estadístico aplicado a una situación en que hay leyes mecánicas, que se llama propiamente, *mecánica estadística*. En cualquier situación química está implicado un gran número de átomos y hemos visto que los átomos se agitan todos en una forma complicada y casual. Si pudiéramos analizar cada colisión y fuéramos capaces de seguir en detalle el movimiento de cada molécula, esperaríamos poder deducir lo que sucede, pero los muchos números que se necesitan para seguir la trayectoria de todas esas moléculas exceden tan enormemente la capacidad de cualquier computador, y ciertamente la capacidad de la mente, que fue necesario desarrollar un método para tratar con tales situaciones complicadas. La mecánica estadística es entonces la ciencia de los fenómenos del calor, o la termodinámica. La química inorgánica es una ciencia,

* Feynman: *The feynman lectures of physcis*. Fondo Educativo Interamericano.

ahora reducida esencialmente a lo que se llaman la físico-química y la química cuántica; la físico-química para estudiar las velocidades con que ocurren las reacciones y qué es lo que está sucediendo en detalle (¿cómo chocan las moléculas? ¿cuáles partes saltan primero?, etc.), y la química cuántica para ayudarnos a comprender lo que sucede en términos de las leyes físicas.

La otra rama de la química es la *química orgánica*, la química de las sustancias que están asociadas con las cosas vivientes. Por un tiempo se creyó que las sustancias que están asociadas con las cosas vivas eran tan maravillosas que no podían ser hechas a mano a partir de materiales inorgánicos. Esto no es absolutamente cierto; son exactamente lo mismo que las sustancias hechas en química inorgánica, pero comprenden disposiciones más complicadas de los átomos. Evidentemente, la química orgánica tiene una relación muy estrecha con la biología que suministra sus sustancias y con la industria; más aún, puede aplicarse mucha físico-química y mecánica cuántica tanto a los compuestos orgánicos como a los inorgánicos. Sin embargo, los principales problemas de la química orgánica no están en esos aspectos, sino más bien en el análisis y síntesis de las sustancias que se forman en los sistemas biológicos, en las cosas vivas. Esto conduce imperceptiblemente, a pasos, hacia la bioquímica y luego a la biología misma, o biología molecular.

Biología

Así llegamos a la ciencia de la *biología*, que es el estudio de las cosas vivas. En los primeros días de la biología, los biólogos tenían que tratar con problemas puramente descriptivos de buscar *qué* cosas vivas había, y así ellos tenían sólo que contar cosas tales como los pelos de los miembros de las pulgas. Después que estos asuntos fueron resueltos con gran interés, los biólogos se fueron hacia la *maquinaria* interior de los cuerpos vivos, primero desde un punto de vista global, naturalmente, porque se requiere algún esfuerzo para entrar en los detalles más finos.

Había una interesante relación primaria entre la física y la biología en la cual la biología ayudaba a la física en el descubrimiento de la *conservación de la energía*, lo cual fue primeramente demostrado por Mayer en conexión con la cantidad de calor que recibe y cede una criatura viva.

Si miramos más de cerca a los procesos biológicos de los animales vivos, vemos *muchos* fenómenos físicos: la circulación de la sangre, bombas, presión, etc. Hay nervios: sabemos qué es lo que pasa cuando nos paramos sobre una piedra puntiaguda, y que de una manera u otra la información va desde la pierna hacia arriba. Es interesante cómo sucede. En sus estudios sobre los nervios, los biólogos han llegado a la conclusión que los nervios son tubos muy finos con una compleja pared, que es muy delgada; a través de esta pared la célula bombea iones; así que hay iones positivos en el exterior y negativos en el interior, como en un capacitor. Ahora bien, esta membrana tiene una propiedad interesante; si se "descarga" en un lugar, es decir, si algunos iones son capaces de atravesar en algún lugar de manera que allí se reduce el voltaje eléctrico, dicha influencia eléctrica se hace sentir sobre los iones vecinos y afecta la membrana de tal manera, que deja pasar también los iones en los puntos vecinos. Esto a su vez la afecta más allá, etc., y así hay una onda de "penetrabilidad" de la membrana que recorre la fibra cuando está "excitada" en un extremo al pararse sobre una piedra puntiaguda. Esta onda es algo análogo a una larga secuencia de fichas de dominó verticales; si se empuja la del extremo, ésta empuja a la próxima, etc. Por cierto, esto transmitirá solamente un mensaje, a no ser que las fichas de dominó se paren de nuevo; y análogamente en una célula nerviosa hay procesos que bombean lentamente de nuevo los iones hacia afuera para que el nervio quede listo para el próximo impulso. Así es como sabemos lo que estamos haciendo (o por lo menos dónde estamos). Por supuesto, los efectos eléctricos asociados con este impulso nervioso pueden ser captados con instrumentos eléctricos y, debido a que son efectos eléctricos, evidentemente la física de los efectos eléctricos ha tenido mucha influencia en la comprensión del fenómeno.

El efecto opuesto es que, desde algún lugar del cerebro, se envía hacia afuera un mensaje a lo largo de un nervio. ¿Qué sucede en el extremo del nervio? Allí el nervio se ramifica en cositas finas, conectadas a una estructura cerca de un músculo, llamada placa terminal. Por razones que no son exactamente comprendidas, cuando un impulso llega al término del nervio, se eyectan pequeños paquetes (cinco a diez moléculas de una vez) de un compuesto químico llamado acetilcolina y ellos afectan la fibra muscular y la hacen contraerse –¡Cuán simple!– ¿Qué hace que se contraiga un músculo? Un músculo es un número muy grande de fibras muy cerca unas de otras, que contiene dos sustancias diferentes, miosina y actomiosina, pero el mecanismo mediante el cual la reacción química inducida por la acetilcolina puede modificar las dimensiones de la molécula es aún desconocido. Así, los procesos fundamentales en el músculo que producen los movimiento mecánicos no son conocidos.

La biología es un campo tan enormemente vasto que hay montones de otros problemas que ni siquiera podemos mencionar: problemas de cómo funciona la visión (qué produce la luz en el ojo), cómo funciona el oído, etc. (La forma en que funciona el *pensamiento* la discutiremos más tarde bajo psicología). Bien, esas cosas concernientes a la biología que hemos discutido aquí no son, desde un punto de vista biológico, realmente fundamentales en el fondo de la vida, en el sentido que aun si las comprendiéramos todavía no comprenderíamos la vida misma. Para dar un ejemplo: los hombres que estudian los nervios estiman que su trabajo es muy importante porque, después de todo, usted no puede tener animales sin nervios. Pero se puede tener vida sin nervios. Las plantas no tienen ni nervios ni músculos, pero están funcionando, están igualmente vivas. Así, para los problemas fundamentales de la biología debemos observar más profundamente; cuando así hacemos, descubrimos que todos los seres vivientes tienen un gran número de características en común. El rasgo más común es que están hechos de células, dentro de cada una de las cuales hay un mecanismo complejo para hacer cosas químicamente. En las células de las plantas, por ejemplo hay un mecanismo para recoger luz y generar sacarosa, la que es consumida en la oscuridad para mantener la planta viva. Cuando la planta está siendo comida, la sacarosa genera en el animal una serie de reacciones químicas muy estrechamente relacionadas con la fotosíntesis (y su efecto opuesto en la oscuridad) en las plantas.

En las células de los sitemas vivos hay muchas reacciones químicas complicadas en las cuales un compuesto se transforma en otro y otro. Para dar una idea del enorme esfuerzo que se ha hecho en el estudio de la química, la figura 1 resume nuestro conocimiento actualizado sobre justamente una pequeña parte de las muchas series de reacciones que ocurren en las células, quizás un pequeño porcentaje o algo así de ellas.

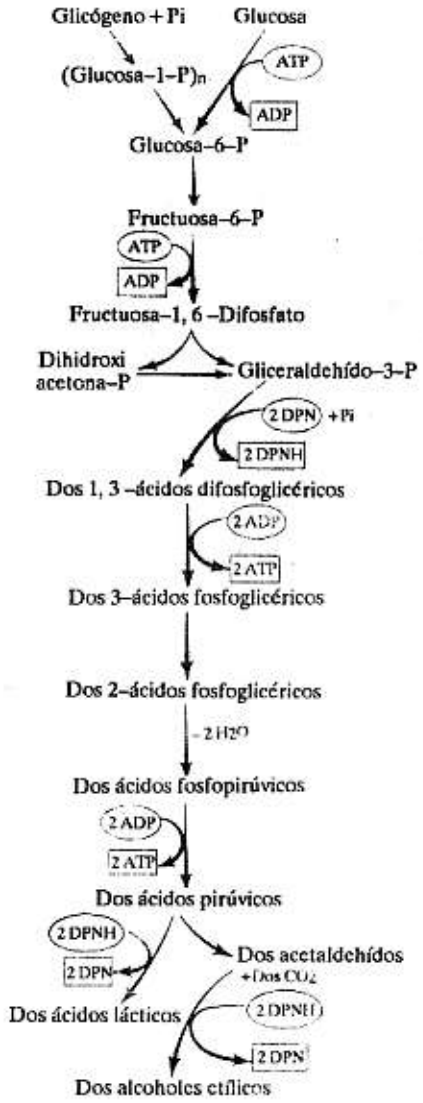


Figura 1. El ciclo de Krebs.

Aquí vemos una serie entera de moléculas que cambian de una a otra en una secuencia o ciclo de pasos más bien pequeños. Se le llama el ciclo Krebs, el ciclo respiratorio. Cada uno de los compuestos químicos y cada uno de los pasos es bastante simple, en función de qué cambios se hacen en la molécula, pero –y esto es un descubrimiento central importante en bioquímica– estos cambios son relativamente difíciles de llevar a cabo en un laboratorio. Si tenemos una sustancia y otra muy similar, la primera no se convierte simplemente en la otra porque las dos formas están corrientemente separadas por una barrera o "loma" de energía. Consideren esta analogía: si queremos trasladar un objeto de un lugar a otro que está en el mismo nivel pero en el otro lado de una loma, podemos empujarlo por encima de la cumbre; pero hacerlo así requiere que se le agregue alguna energía. Así la mayoría de las reacciones químicas no ocurren, porque hay lo que se llama una *energía de activación* de por medio. Para agregar un átomo extra a nuestro compuesto químico se necesita que lo acerquemos lo suficiente para que pueda ocurrir un reordenamiento; entonces se pegará. Pero si no podemos darle suficiente energía para acercarlo suficientemente, no completará el propósito, realizará parte del camino hacia arriba de la loma y volverá hacia abajo de nuevo. Sin embargo, si pudiéramos literalmente tomar las moléculas en nuestras manos y empujar y tirar los átomos alrededor de tal manera de abrir un hueco para permitir la entrada de un nuevo átomo, y luego dejarlos volver, habríamos encontrado otro camino alrededor de la loma, el cual no necesitaría de energía extra, y la reacción procedería fácilmente. Ahora, realmente hay en las células moléculas muy grandes, mucho más grandes que aquéllas cuyos cambios hemos estado describiendo, que en alguna forma complicada sujetan a las moléculas pequeñas en forma adecuada para que la reacción pueda realizarse fácilmente. Esas cosas muy grandes y complicadas se llaman *enzimas*. (Primeramente se llamaron fermentos porque se descubrieron originalmente en la fermentación del azúcar. En realidad, algunas de las primeras reacciones en el ciclo fueron descubiertas allí.) La reacción procederá en presencia de una enzima.

Una enzima está hecha de otra sustancia llamada *proteína*. Las enzimas son muy complicadas y cada una es diferente, estando cada una construida para controlar cierta reacción especial. Los nombres de las enzimas están escritos en la figura 1 en cada reacción. (Algunas veces la misma enzima puede controlar dos reacciones.) Ponemos énfasis en que las enzimas mismas no intervienen directamente en la reacción. Ellas no cambian; solamente dejan pasar un átomo de un lugar a otro. Habiendo hecho esto, la enzima está lista para hacerlo con la próxima molécula, como una máquina de una fábrica. Por cierto, debe haber un suministro de ciertos átomos y una forma de disponer de otros átomos. Tómese el hidrógeno, por ejemplo: hay enzimas que sobre ellas tienen unidades especiales que transportan el hidrógeno para todas las reacciones químicas. Por ejemplo, hay tres o cuatro enzimas hidrógeno-reductoras que se usan en diferentes lugares sobre todo nuesto ciclo. Es interesante que el mecanismo que libera algún hidrógeno en un lugar tomará aquel hidrógeno y lo usará en algún otro lugar.

La característica más importante del ciclo de la figura 1 es la transformación de GDP en GTP (di-fosfato de guanidina en trifosfato de guanidina) porque una sustancia contiene mucha más energía que la otra. Justamente, así como hay una "caja" en ciertas enzimas para transportar átomos de hidrógeno, hay ciertas "cajas" transportadoras de energía que implican al grupo trifosfato. Entonces, la GTP tiene más energía que la GDP y si el ciclo se desplaza en un sentido, estamos produciendo moléculas que tienen una energía extra que puede movilizar otro ciclo que requiere energía, por ejemplo la contracción de un músculo. El músculo no se contraerá a no ser que haya GTP. Podemos tomar fibra muscular, ponerla en agua y agregar GTP, y las fibras se contraerán transformando GTP en GDP si está presente la enzima correcta. Así el sistema real está en la transformación GDP-GTP; en la oscuridad la GTP, que se ha estado almacenando durante el día, se usa para producir el ciclo completo en la otra dirección. Una enzima, ustedes ven, no se preocupa en qué dirección procede la reacción pues, si lo hiciera, violaría una de las leyes de la física.

La física es de gran importancia en la biología y otras ciencias por otra razón aún que tiene que ver con *técnicas experimentales*. En realidad, si no fuera por el gran desarrollo de la física experimental, estos cuadros bioquímicos no se conocerían hoy. La razón es que la herramienta más útil de todas para el análisis de este sistema

fantásticamente complejo es *marcar* los átomos que se usan en las reacciones. Así, si pudiéramos introducir en el ciclo algún dióxido de carbono que tiene una "marca verde", y luego medir después de tres segundos donde está la marca verde, y de nuevo medir después de 10 segundos, etc., podríamos seguir el curso de las reacciones. ¿Qué son las "marcas verdes"? Son *isótopos* diferentes. Recordemos que las propiedades químicas de los átomos están determinadas por el número de *electrones*, no por la masa del núcleo. Pero puede haber, en el carbono por ejemplo, seis neutrones o siete neutrones junto con los seis protones que tienen todos los núcleos de carbono. Químicamente, los dos átomos C^{12} y C^{13} son iguales, pero difieren en peso y tienen propiedades nucleares diferentes, y por eso son distinguibles. Usando estos isótopos de pesos diferentes, o aun isótopos radiactivos como el C^{14}, lo que da un medio más sensible para seguir cantidades muy pequeñas, es posible seguir las reacciones.

Ahora volvemos a la descripción de enzimas y proteínas. Todas las proteínas no son enzimas, pero todas las enzimas son proteínas. Hay muchas proteínas, tales como las proteínas de los músculos, las proteínas estructurales que están, por ejemplo, en los cartílagos, pelo, piel, etc., que no son enzimas en sí mismas. Sin embargo, las proteínas son una sustancia muy característica de la vida: en primer lugar forman todas las enzimas, y segundo forman gran parte del resto de la materia viviente. Las proteínas tienen una estructura muy interesante y simple. Son una serie, o cadena, de diferentes *aminoácidos*. Hay veinte aminoácidos diferentes, y todos ellos pueden combinarse entre sí para formar cadenas cuya espina dorsal es CO-NH, etc. Las proteínas no son otra cosa que cadenas de varios de estos veinte aminoácidos. Cada uno de los aminoácidos sirve probablemente para algún propósito especial. Algunos, por ejemplo, tienen un átomo de azufre en cierto lugar; cuando dos átomos de azufre están en la misma proteína, forman un enlace, esto es, unen la cadena en dos puntos y forman un anillo. Otro tiene átomos de oxígeno extra que lo hace una sustancia ácida, otro tiene una característica básica. Algunos tienen grandes grupos colgando hacia afuera por un lado, de modo que ocupan mucho espacio. Uno de los aminoácidos llamado prolina no es realmente un aminoácido, sino un iminoácido. Hay una pequeña diferencia, con el resultado que cuando la prolina está en la cadena hay un retorcimiento en la cadena. Si quisiéramos producir una proteína en particular, daríamos estas instrucciones: ponga uno de esos ganchos de azufre aquí; luego agregue algo que ocupe lugar; luego prenda algo para poner una enroscadura en la cadena. En esta forma obtendremos una cadena de aspecto complicado, enganchada a sí misma y teniendo una estructura compleja; presumiblemente ésta es justamente la manera en que se forman todas las variedades de enzimas. Uno de los grandes triunfos en los tiempos recientes (desde 1960), fue descubrir por fin la disposición atómica espacial exacta de ciertas proteínas, las que envuelven unos 56 a 60 aminoácidos en hilera. Más de un millar de átomos (más cercano a dos mil, si contamos los átomos de hidrógeno) han sido localizados en una estructura compleja en dos proteínas. La primera fue la hemoglobina. Uno de los aspectos tristes de este descubrimiento es que no podemos ver cosa alguna de esta estructura; no comprendemos cómo funciona y la forma en que lo hace. Por cierto, ése es el próximo problema por atacar.

Otro problema es: ¿cómo saben las enzimas qué cosa son? Una mosca de ojos rojos forma una mosca de ojos rojos, y así la información de la estructura entera de enzimas para hacer un pigmento rojo debe pasar de una mosca a la siguiente. Esto es hecho por una sustancia en el núcleo de la célula, no una proteína, llamada DNA (abreviación de ácido desoxiribonucleico). Esta es la sustancia clave que pasa de una célula a otra (por ejemplo, las células de semen consisten principalmente en DNA) y lleva la información de cómo hacer las enzimas. El DNA es el "programa". ¿Qué aspecto tiene el programa y cómo funciona? Primero, el programa debe ser capaz de reproducirse a sí mismo. Segundo, debe ser capaz de instruir a las proteínas. Respecto a la reproducción, podemos pensar que procede como en la reproducción celular. Las células simplemente aumentan de tamaño y luego se dividen por la mitad. ¿Deberá ser así con las moléculas de DNA, entonces, de modo que ellas también aumentan de tamaño y se dividen por la mitad? ¡Cada átomo por cierto no aumenta de tamaño y se divide por la mitad! No, es imposible reproducir una molécula excepto de un modo algo más inteligente.

La estructura de la sustancia DNA fue estudiada por un largo tiempo, primero químicamente para encontrar la composición, y luego con rayos X para encontrar la estructura en el espacio. El resultado fue el siguiente descubrimiento notable: la molécula de DNA es un par de cadenas enrolladas una sobre la otra. La espina dorsal de cada una de estas cadenas, que son análogas a las cadenas de las proteínas pero químicamente bastante diferentes, es una serie de grupos azúcar y fosfato, como se muestra en la figura 2. Ahora vemos cómo la cadena puede contener instrucciones, pues si pudiéramos dividir esta cadena por la mitad, tendríamos una serie BAADC... y cada cosa viviente podría tener una serie diferente. Así tal vez, de alguna manera, las instrucciones específicas para la manufactura de proteínas están contenidas en la serie específica del DNA.

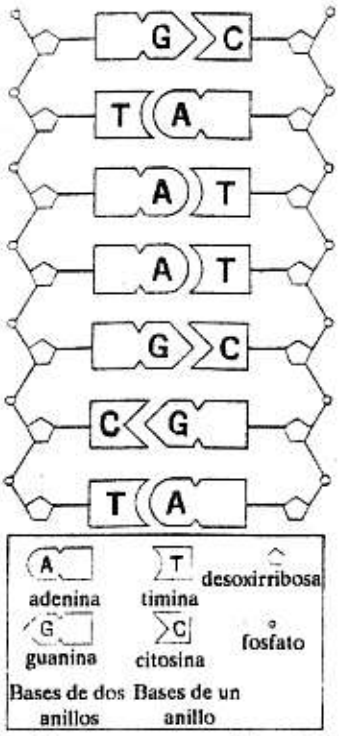


Figura 2. Diagrama esquemático del DNA.

Unidos a cada azúcar a lo largo de la línea y ligando las dos cadenas entre sí hay ciertos pares de uniones cruzadas. Sin embargo, no son todas de la misma naturaleza; hay cuatro tipos, llamados adenina, timina, citosina y guanina, pero llamémoslas *A*, *B*, *C*, y *D*. La cosa interesante es que sólo ciertos pares pueden situarse uno opuesto al otro, por ejemplo *A* con *B* y *C* con *D*. Estos pares están puestos en ambas cadenas de tal manera que "encajan entre sí" y tienen una fuerte energía de interacción. Sin embargo, *C* no encajará con *A*, y *B* no encajará con *C*; sólo encajarán en pares, *A* contra *B*, y *C* contra *D*. Por lo tanto, si uno es *C* el otro debe ser *D*, etc. Cualesquiera sean las letras en una cadena, cada una debe tener una letra complementaria específica en la otra cadena.

¿Qué pasa entonces con la reproducción? Supóngase que separamos esta cadena en dos. ¿Cómo podemos hacer otra justamente como ésta? Si, en las sustancias de las células hay un departamento productor que entrega fosfato, azúcar y unidades de *A, B, C, D,* que no están conectadas en cadena, los únicos que se unirán a nuestra cadena separada serán los correctos, los complementos de *BAADC...*, es decir, *ABBCD...* Así lo que sucede es que la cadena se divide por la mitad durante la división celular, una mitad que terminará por ir con una célula y la otra mitad que terminará en la otra célula; cuando se separan, se forma una nueva cadena complementaria de cada mitad de cadena.

A continuación viene la pregunta, precisamente, ¿cómo determina el orden de las unidades *A, B, C, D* la disposición de los aminoácidos en la proteína? Este es el problema central no resuelto actualmente en biología. Las primeras claves o partes de información, sin embargo, son éstas: hay en la célula pequeñísimas partículas llamadas microsomas, y se sabe ahora que éste es el lugar donde se fabrican las proteínas. Pero los microsomas no están en el núcleo, donde están el DNA y sus instrucciones. Algo parece que sucede. Sin embargo, también se sabe que pequeñas piezas moleculares se desprenden del DNA –no tan largas como la gran molécula de DNA que lleva toda la información en sí misma, pero como una pequeña sección de ella–. Ésta se llama RNA, pero esto no es esencial. Es una especie de copia del DNA, una copia resumida. El RNA, que en cierta forma lleva un mensaje acerca de qué proteína debe fabricar, va hacia el microsoma. Eso es conocido. Sin embargo, los detalles de cómo los aminoácidos entran y se disponen de acuerdo con el código que está contenido en el RNA, son, por de pronto, aún desconocidos. No sabemos cómo leerlo. Si conociéramos, por ejemplo, la "alineación" A, B, C, C, A, no podríamos decirle a usted qué proteína será producida.

Ciertamente ninguna otra materia o campo está haciendo más progresos en tantos nuevos frentes en el momento presente que la biología, y si tuviéramos que nombrar la suposición más poderosa de todas que conducen a uno más y más a un intento de comprender la vida, es aquella en que *todas las cosas están hechas de átomos*, y en que todo lo que las cosas vivas hacen puede ser comprendido en términos de las agitaciones y movimientos de los átomos.

Astronomía

En esta explicación fugaz del mundo entero, debemos ahora pasar a la astronomía. La astronomía es más antigua que la física. En realidad, dio origen a la física al mostrar la hermosa simplicidad del movimiento de las estrellas y planetas, cuya comprensión fue el comienzo de la física. Pero el descubrimiento más notable de toda la astronomía es que *las estrellas están hechas de átomos de la misma naturaleza que los que se encuentran en la Tierra.** ¿Cómo se hizo esto? Los átomos liberan luz que tiene frecuencias definidas, algo así como el timbre de un instrumento musical que tiene tonos definidos o frecuencias de sonido. Cuando estamos escuchando varios tonos diferentes podemos distinguirlos, pero cuando miramos con nuestros ojos una mezcla de colores no podemos distinguir las partes de que está hecha, porque el ojo no es ni cercanamente tan discernidor como el oído a este respecto. Sin embargo, con un espectroscopio podemos analizar las frecuencias de las ondas luminosas y de esa manera podemos ver los tonos de los átomos que hay en las diferentes estrellas. De hecho, dos elementos químicos se descubrieron en una estrella antes que se descubrieran en la Tierra. El helio fue descubierto en el Sol, de ahí su nombre, y el tecnecio fue descubierto en ciertas estrellas frías. Esto, por supuesto, nos permite progresar en la comprensión de las estrellas, porque ellas están hechas de los mismos tipos de átomos que existen en la Tierra. Ahora sabemos mucho acerca de los átomos, especialmente en cuanto a su comportamiento bajo condiciones de alta temperatura, pero no de alta densidad; así podemos analizar con la mecánica estadística el comportamiento de la sustancia estelar. Aun cuando no podemos reproducir las condiciones en la Tierra usando leyes básicas de la física, podemos a menudo decir precisamente, o muy aproximadamente, qué sucederá.

*¡Qué manera de precipitarme a través de esto! Cuánto contenido tiene cada frase de esta breve historia. "Las estrellas están hechas de los mismos átomos que los de la tierra". Corrientemente yo tomo un pequeño tópico como éste para dictar una clase. Los poetas dicen que la ciencia elimina la belleza de las estrellas —meros globos de átomos de gas—. Nada es "mero". Yo también puedo ver las estrellas en una noche despejada y sentirlas. ¿Pero veo yo más o menos? La vastedad de los cielos ensanchan mi imaginación —clavado en este carrusel, mi pequeño ojo puede coger luz de un millon de años de edad. Una vasta estructura de la cual yo soy una parte— quizás mi material fue arrojado de alguna estrella olvidada, como el que está arrojando una allí. O verlas con el ojo más grande de Palomar, apartándose desde un punto común de partida donde quizás estuvieron todas juntas. ¿Cuál es la estructura, o el significado, o el porqué? No le hace daño al misterio conocer un poco de él. ¡Porque mucho más maravillosa es la verdad que la que cualquier artista en el pasado imaginó! ¿Por qué los poetas del presente no hablan de ella? ¿Qué hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter como si fuera un hombre, pero si es una inmensa esfera rotante de metano y amoniaco deben permanecer mudos?

Así es como la física ayuda a la astronomía. Por extraño que parezca, comprendemos la distribución de materia en el interior del Sol mucho mejor que lo que comprendemos el interior de la Tierra. Lo que sucede en el interior de una estrella se comprende mejor que lo que pudiera adivinarse de la dificultad de tener que mirar un pequeño punto luminoso a través de un telescopio, porque podemos calcular qué deben hacer los átomos en las estrellas en la mayoría de las circunstancias.

Uno de los descubrimientos más impresionantes fue el origen de la energía de las estrellas, que las hace continuar quemándose. Uno de los hombres que descubrió esto había salido con su amiga la noche siguiente de haberse dado cuenta que en las estrellas se debían estar produciendo *reacciones nucleares* para que brillaran. Ella dijo: "¡Mira qué bonito brillan las estrellas!" El dijo: "Sí, y justamente ahora yo soy el único hombre en el mundo que sabe por qué brillan." Ella simplemente se rió de él. Ella no estaba impresionada de haber salido con el único hombre del mundo que, en ese momento, sabía por qué brillan las estrellas. Bueno, es triste estar solo, pero así son las cosas en este mundo.

Es la "combustión" nuclear del hidrógeno la que suministra la energía del Sol; el hidrógeno se convierte en helio. Además, en última instancia, la producción de los diversos elementos químicos se verifica en los centros de las estrellas a partir del hidrógeno. El material del que estamos hechos nosotros fue "cocinado" una vez en una estrella y escupido hacia afuera. ¿Cómo lo sabemos? Porque hay una clave. La proporción de los diferentes isótopos (cuánto C^{12}, cuánto C^{13}, etc.) es algo que nunca cambia en las reacciones químicas, porque las reacciones químicas son tan idénticas para las dos. Las proporciones son puramente el resultado de reacciones nucleares. Observando las proporciones de los isótopos en el rescoldo frío y apagado en que estamos, podemos descubrir cómo fue el horno donde se formaron los materiales de que estamos hechos. Aquel horno fue como las estrellas, y así es muy probable que nuestros elementos fueron "hechos" en las estrellas y escupidos en las explosiones que llamamos novas y supernovas. La astronomía está tan cerca de la física que estudiaremos muchas cosas astronómicas a medida que prosigamos.

Geología

Ahora pasemos a lo que se llama *ciencias de la tierra*, o geología. Primero la meteorología y el tiempo. Por cierto, que los instrumentos de meteorología son instrumentos físicos, y el desarrollo de la física experimental hizo posible estos instrumentos, como se explicó anteriormente. Sin embargo, la teoría de la meteorología nunca ha sido investigada satisfactoriamente por los físicos. "Bien", dirán ustedes "no hay otra cosa que aire, y conocemos las ecuaciones de los movimientos del aire". Sí, es cierto. "Así, si sabemos las condiciones del aire de hoy, ¿por qué no podemos calcular las condiciones del aire de mañana?" Primero, no sabemos realmente cuál es la condición de hoy, porque el aire está arremolinándose y dando vueltas por todas partes. Resulta ser muy susceptible y aún inestable. Si han visto alguna vez correr suavemente el agua sobre una represa y luego convertirse en un gran número de burbujas y gotas cuando cae, comprenderán lo que quiero decir con inestable. Ustedes conocen la condición del agua antes que traspase el vertedero; es perfectamente tranquila; pero en el momento que comienza a caer, ¿dónde empiezan las gotas?¿Qué determina lo grande que van a ser los trozos y dónde estarán? Esto no se sabe, porque el agua es inestable. Aún una masa de aire moviéndose suavemente, al traspasar una montaña se convierte en complejos remolinos y torbellinos. En muchos campos encontramos esta situación de *flujo turbulento* que no podemos analizar actualmente. ¡Dejemos rápidamente el asunto del tiempo y discutamos sobre geología!

El asunto básico para la geología es: ¿qué hace que la Tierra sea lo que es? Los procesos más obvios están al frente de nuestros ojos, los procesos de erosión de los ríos, los vientos, etc. Es bastante fácil comprenderlos, pero por cada poco de erosión hay algo más que está sucediendo. Las montañas no son más bajas hoy en promedio de lo que fueron en el pasado. Debe haber procesos *formadores* de montañas. Encontrarán, si estudian geología,

que hay procesos formadores de montañas y volcanismos, los que nadie comprende pero que son la mitad de la geología. El fenómeno de los volcanes no se comprende realmente. Lo que produce un terremoto, a la postre, no se comprende. Se comprende que si hay algo empujando a otra cosa, cede repentinamente y se desliza –eso está bien–. Pero ¿qué es lo que empuja, y por qué? La teoría es que hay corrientes en el interior de la Tierra –corrientes circulantes, debido a la diferencia de temperatura interior y exterior–, las cuales en su movimiento empujan ligeramente la superficie. Así, si hay dos circulaciones opuestas vecinas, la materia se acumula en la región donde se juntan y forman cadenas de montañas que están en condiciones desafortunadas de tensión y así producen volcanes y terremotos.

¿Qué pasa en el interior de la Tierra? Mucho se sabe acerca de la velocidad de las ondas sísmicas a través de la Tierra y la distribución de densidades de la tierra. Sin embargo, los físicos han sido incapaces de obtener una buena teoría sobre lo densa que deberá ser una sustancia a las presiones que se esperaría en el centro de la Tierra. En otras palabras, no podemos calcular las propiedades de la materia muy bien en dichas circunstancias. Lo hacemos mucho menos bien con la Tierra que lo hacemos con las condiciones de la materia en las estrellas. La matemática implicada parece ser un poco difícil, hasta ahora, pero quizás no pasará mucho tiempo antes de que alguien se dé cuenta que es un problema importante y que realmente lo solucione. El otro aspecto, por cierto, es que aun si supiéramos la densidad, no podríamos calcular las corrientes de circulación. Tampoco podemos realmente deducir las propiedades de las rocas a elevadas presiones. No podemos decir con qué rapidez las rocas "cederán"; todo eso debe ser resuelto por el experimento.

Psicología

Consideremos a continuación la ciencia de la *psicología*. Incidentalmente, el psicoanálisis no es una ciencia: en el mejor de los casos es un proceso médico, o quizás aun brujería. Tiene una teoría acerca de qué produce la enfermedad –muchos "espíritus" diferentes, etc.–. El hechicero tiene una teoría de que una enfermedad como la malaria está causada por un espíritu que viene del aire; no se sana agitando una culebra sobre él; en cambio, la quinina si ayuda la malaria. Así, si están enfermos, yo les aconsejaría que vayan al hechicero, porque es el hombre en la tribu que sabe más acerca de enfermedades; por otro lado, su conocimiento no es ciencia. El psicoanálisis no ha sido cuidadosamente comprobado por el experimento, y no hay manera de encontrar una lista del número de casos en los cuales resulta, el número de casos en que no resulta, etc.

Las otras ramas de la psicología, que implican cosas como la fisiología de las sensaciones –qué sucede en el ojo, y qué sucede en el cerebro– son, si quieren, menos interesantes. Pero cierto progreso pequeño, pero real, se ha hecho al estudiarlas. Uno de los progresos técnicos más interesantes puede ser o no llamado psicología. El problema central de la mente, si quieren, o del sistema nervioso es éste: cuando un animal aprende algo, puede hacer algo diferente de lo que podía hacer antes y sus células cerebrales deben haber cambiado también, si es que está hecho de átomos. ¿En qué sentido es diferente? No sabemos dónde mirar, o qué buscar, cuando algo se memoriza. No sabemos qué significa o qué cambio hay en el sitema nervioso cuando se aprende una realidad. Este es un problema muy importante que no ha sido resuelto en absoluto. Suponiendo, sin embargo, que existe algo como la memoria, el cerebro es una masa tan enorme de alambres y nervios interconectados que probablemente no puede ser analizado en una forma directa. Hay una analogía de esto con las máquinas computadoras y los elementos de computación, en que también tienen muchas líneas, y que tienen algún tipo de elemento análogo, quizás, a la sinapsis o conexión de un nervio con otro. Esto es una materia muy interesante que no tenemos tiempo de discutir más allá –las relaciones entre el pensamiento y las máquinas computadoras–. Debe apreciarse, por cierto, que esta materia nos dirá muy poco acerca de las complejidades reales del comportamiento humano ordinario. Todos los seres humanos son tan diferentes. Pasará mucho tiempo antes que lleguemos ahí. Debemos empezar mucho más atrás. Si pudiéramos siquiera deducir cómo funciona un perro, habríamos avanzado bastante. Los perros son más fáciles de comprender, pero nadie aún sabe cómo funcionan los perros.

¿Cómo se llegó a eso?

Para que la física sea útil a las otras ciencias en una forma teórica, que no sea la invención de instrumentos, la ciencia en cuestión debe suministrar al físico una descripción del tema en el lenguaje del físico. Ellos pueden decir: "por qué salta una rana?, y el físico no puede contestar. Si ellos le dicen lo que es una rana; que hay tantas moléculas; que hay un nervio aquí, etc., eso es diferente. Si ellos nos dijeran, más o menos, a qué se parecen la tierra y las estrellas, entonces podemos resolverlo. Para que la teoría física sea de alguna utilidad, debemos saber exactamente dónde están colocados los átomos. Para comprender la química, debemos saber exactamente qué átomos están presentes, pues de lo contrario no podemos analizarla. Esta es solamente la primera limitación, por supuesto.

Hay otro tipo de problema en las ciencias hermanas, que no existe en la física; podemos llamarlo, a falta de un término mejor, el asunto histórico. ¿Cómo se llegó a eso? Si comprendemos todo acerca de la biología, quisiéramos saber cómo todas las cosas que hay en la Tierra fueron a dar en ella. Existe la teoría de la evolución, una parte importante de la biología. En geología, no sólo queremos saber cómo se están formando las montañas, sino cómo se formó la Tierra entera en el comienzo, el origen del sitema solar, etc. Esto, por supuesto, nos conduce a querer saber qué tipo de materia existía en el mundo. ¿Cómo evolucionan las estrellas? ¿Cuáles fueron las condiciones iniciales? Este es el problema de la historia de la astronomía. Se ha descubierto mucho acerca de la formación de las estrellas, de la formación de los elementos de los cuales estamos hechos y hasta un poco acerca del origen del Universo.

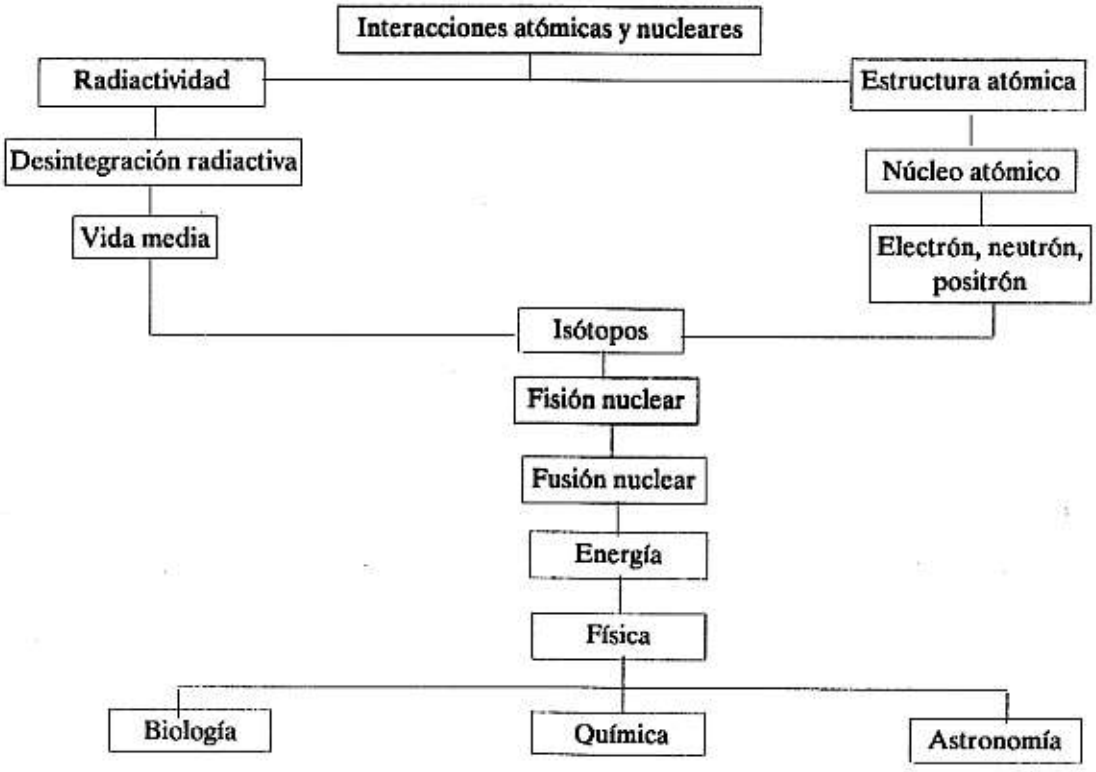
No hay problemas históricos que se estén estudiando en la física actualmente. No tenemos una pregunta: "Aquí están las leyes de la física, ¿cómo se llegó a ellas?" No nos imaginamos, por ahora, que las leyes de la física están en cierto modo cambiando con el tiempo, que en el pasado fueran diferentes de lo que son en el presente. Por supuesto que pueden ser, y en el momento en que encontremos qué son, la pregunta histórica de la física estará ligada con el resto de la historia del universo y entonces los físicos estarán hablando de los mismos problemas que los astrónomos, los geólogos y los biólogos.

Finalmente, hay un problema físico que es común a muchos campos, que es muy viejo y que no ha sido resuelto. No es el problema de encontrar nuevas partículas fundamentales, sino algo que quedó desde hace mucho tiempo atrás –más de cien años–. Nadie en la física ha sido realmente capaz de analizarlo matemáticamente en forma satisfactoria a pesar de su importancia para las ciencias hermanas. Es el análisis de *fluidos circulantes o turbulentos*. Si observamos la evolución de una estrella, se llega a un punto donde podemos deducir que va a comenzar la convección, y a partir de esto ya no podemos deducir qué va a pasar. Unos pocos millones de años más tarde la estrella hace explosión, pero no podemos explicar la razón. No podemos analizar el tiempo. No conocemos los esquemas de los movimientos que debería haber en el interior de la Tierra. La forma más simple del problema es tomar una cañería que es muy larga y empujar agua a través de ella a gran velocidad. Preguntamos: para empujar una cantidad dada de agua a través de esa cañería, ¿cuánta presión se necesita? Nadie puede analizarlo partiendo de principios primarios y de las propiedades del agua. Si el agua fluye muy lentamente, o si usamos algo espeso como la miel, entonces podemos hacerlo exactamente. Ustedes lo encontrarán en su texto. Lo que no podemos realmente hacer es tratar con agua real y fresco que corre a través de una cañería. Este es el problema central que deberíamos resolver algún día y que no lo hemos hecho.

Decía una vez un poeta: "El universo entero está en un vaso de vino". Probablemente nunca sabremos lo que quería decir, pues los poetas no escriben para ser comprendidos. Pero es cierto que si miramos un vaso de vino lo suficientemente cerca, vemos el universo entero. Ahí están las cosas de la física: el líquido que se arremolina y se evapora dependiendo del viento y del tiempo, las reflexiones en el vidrio, y nuestra imaginación agrega los átomos. El vidrio es un derivado de las rocas terrestres y en su composición vemos los secretos de la edad del

universo y la evolución de las estrellas. ¿Qué extraño arreglo de elementos químicos hay en el vino? ¿Cómo llegaron a ser? Están los fermentos, las enzimas, los sustratos y los productos. Allí en el vino se encuentra la gran generalización: toda vida es fermentación. Nadie puede descubrir la química del vino sin descubrir, como lo hizo Louis Pasteur, la cauda de muchas enfermedades. ¡Cuán vívido es el vino tinto que imprime su existencia dentro del conocimiento de quien lo observa! ¡Si nuestras pequeñas mentes, por alguna convivencia, dividen este vaso de vino, este universo, en partes –física, biología, geología, astronomía, psicología, etc.–, recuerden que la naturaleza no lo sabe! Así, reunamos todo de nuevo sin olvidar en última instancia para qué sirve. Dejemos que nos dé un placer final más: ¡bébanlo y olvídense de todo!

RECAPITULACIÓN



ACTIVIDADES DE CONSOLIDACIÓN

I. Relaciona ambas columnas, poniendo dentro del paréntesis la letra que le corresponda:

a) Electrones en rápido movimiento
b) Radiaciones electromagnéticas de muy alta frecuencia.
c) De las radiaciones α, β y γ ¿cuál tiene mayor poder de ionizacion, pero poco poder de penetración?
d) Tienen carga positiva y se identifican como átomos de helio que han perdido sus electrones.
e) Descubrimiento que marcó el inicio de la física nuclear.

(e) Descubrimiento del neutrón hecho por Chadwick
(d) Radiación α
(c) Radiación γ
(b) Radiación β

II. En los siguientes cuestionamientos coloca dentro del paréntesis la letra que corresponda.

1. Descubrió que una solución de sal de uranio funcionaba como agente radiactivo, sin la necesidad de ser expuesto al Sol y, con ello, que la radiación era independiente de la influencia de la luz solar. (a)

a) Röntgen *b*) Becquerel *c*) Rutherford *d*) Curie

2. Realizó la separación del polonio y el radio mediante el tratamiento químico de una tonelada de pecblenda. (d)

a) Röntgen *b*) Becquerel *c*) Rutherford *d*) Curie

3. Al someter un campo electromagnético a radiaciones α y β ¿con qué signo resultan sus cargas? (c)

a) Ambas partículas con carga positiva.
b) Ambas partículas con carga negativa.
c) Las partículas α con carga positiva y las partículas β con carga negativa.
d) Las partículas α con carga negativa y las partículas β con carga positiva.

4. ¿Qué fenómeno físico ocurre cuando determinado núcleo pierde su identidad original y se convierte en un núcleo distinto? (a)

a) Una transmutación *b*) Una desintegración
c) Una dispersión *d*) Una integración

5. ¿De qué depende la desintegración de un núcleo atómico? (d)

a) Temperatura *b*) Presión *c*)Densidad *d*) Número de neutrones

6. ¿Mediante qué proceso se produce la fisión? (b)

a) Se forma un núcleo pesado mediante la colisión de núcleos ligeros.
b) Se forman dos o más núcleos a partir del bombardeo de dos o más núcleos pesados.
c) Cuando tiene lugar una reacción en cadena.
d) Se emiten uno o más neutrones en una transmutación.

7. ¿Para qué tipo de estimaciones podemos usar la expresión de Einstein: $E = mc^2$? (d)

a) Estimar la energía cinética de los productos de fisión.
b) Estimar la energía requerida para producir la fisión.
c) Estimar el defecto de masa que se observa en un fenómeno de fisión.
d) Estimar la energía total, liberada en un proceso de fisión.

8. ¿Qué papel desempeña un reactor nuclear en una planta nucleoeléctrica? (b)

a) Generador eléctrico. *b*) Fuente de calor.
c) Turbina. *d*) Transformador de calor en energía eléctrica.

III. Resuelve los siguientes problemas:

1. Si la vida media de cierto isótopo radiactivo es de 10 días, ¿en cuánto tiempo quedará 1/128 de dicho isótopo?

2. Considerando que la intensidad de la radiación solar sobre la Tierra es del orden de 1 kW/m^2 y que la energía liberada es posible estimarla con la expresión E liberada = $(\Delta m)\, c^2$, comprueba que la intensidad de la radiación solar total, a la distancia que hay entre el Sol y la Tierra, es del orden de 3×10^{23} kW o 3×10^{26} watts.

LINEAMIENTOS DE AUTOEVALUACIÓN

I.

(*e*)
(*d*)
(*c*)
(*b*)
(*a*)

II.

1. *b*) Bequerel.
2. *d*) Curie.
3. *c*) Las partículas α con carga positiva y las partículas β con carga negativa.
4. *b*) Desintegración.
5. *d*) El número de neutrones.
6. *b*) Se forman dos o más núcleos a partir del bombardeo de dos o más pesados.
7. *c*) Estimar el defecto de masa que se observa en un fenómeno de fisión.
8. *b*) Fuente de calor.

III.

1. Días: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70

Producto: 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128

2. La radiación total del Sol a la distancia que hay entre él y la Tierra, se debe entender como la radiación que se emite en el área de una esfera cuyo radio es la distancia Sol-Tierra. Por lo tanto, primero debes calcular dicha área mediante la expresión $4\pi r^2$, considerando que $r = 1 \times 10^{11}$ m (distancia Sol-Tierra). En segundo lugar, si la radiación en 1 m^2 de esa área es de 1 kW ¿cuál será para el área que obtienes?