

• **Postulados del Modelo atómico de Bohr.**

A partir de los estudios atómicos de Rutherford y de la teoría de la mecánica cuántica de Max Planck, estableció el modelo atómico por el que sería galardonado con el Premio Nobel en 1922. Supuso que los electrones que giraban alrededor de un núcleo central sólo podían situarse sobre determinadas órbitas, cada una de las cuales poseía un determinado nivel energético. Según él, un electrón emitía o absorbía cantidades discretas de energía (cuantos) cuando pasaba de una órbita a otra. Posteriormente realizó estudios para confirmar que en los elementos químicos con más de dos electrones, éstos se disponen en capas, siendo la más externa la que determinaba las propiedades químicas de la sustancia en cuestión.

El cada vez más evidente distanciamiento entre el mundo cotidiano y las descripciones

matemáticas que se ocupan de la ordenación subatómica, que permite paradojas como el doble comportamiento de onda y de partículas en los electrones, constituyó una de las principales preocupaciones para Bohr. Ello lo impulsó a enunciar el principio de

complementariedad, según el cual un fenómeno físico puede observarse desde dos puntos de

vista diferentes que no se excluyen entre sí.

Bohr propuso los siguientes postulados:

- Un átomo está constituido por una carga eléctrica (núcleo) alrededor de la cual giran los electrones, en número suficiente para compensar aquella, describiendo circunferencias.
- Cada electrón no puede moverse sobre una órbita cualquiera, sino solamente en aquellas en las cuales su impulso de rotación es un múltiplo entero de $h/2\pi$ (h , la constante de Planck).
- Cuando el electrón se mueve sobre una de sus órbitas, no irradia energía.
- Un electrón puede saltar espontáneamente de una órbita a otra más cercana al núcleo. Al hacerlo, su energía disminuye en W , y esa pérdida es emitida en forma de luz cuya frecuencia es:

$$V = \frac{W}{h}$$

h

Estas frecuencias (una para cada par de órbitas) concuerdan con las observaciones experimentalmente en las líneas espectrales de las series del hidrógeno

• **Ecuación de Planck**

a) Característica de la Teoría Cuántica

Después de que fracasaran diversas tentativas de conseguir una expresión matemática que

explicara la pauta de emisión de la energía que irradia un cuerpo negro, es decir, aquel artificio físico que absorbe todas las radiaciones que inciden sobre él, el físico alemán Max Planck ideó una audaz hipótesis, la del quantum de energía, que resolvió la cuestión y que ha sido uno de los puntos de arranque de la ciencia contemporánea.

La teoría cuántica engloba el conjunto de hipótesis físicas que analizan los fenómenos

subatómicos, es decir, el comportamiento de las partículas que integran el átomo, mediante

interpretaciones diferenciadas de las sostenidas por la mecánica tradicional y que se basan en la emisión discontinua de energía.

Radiación y cuerpo negro

El estudio de la radiación, o forma de energía que puede propagarse por el espacio sin medio material alguno y que se presenta bajo distintos aspectos –ondas electromagnéticas, rayos infrarrojos, luz visible, rayos ultravioleta, rayos X, rayos gamma–, llevó a la postulación de una serie de hipótesis y leyes basadas en la física clásica. Tales interpretaciones partieron del estudio de la radiación en un cuerpo negro que, al absorber

toda radiación incidente sin reflejar ninguna y emitir, pues, el máximo de energía, se podía

considerar como radiador ideal.

Estos estudios y medidas condujeron en algunos casos a resultados tan brillantes como, por

ejemplo, el cálculo de la temperatura de la superficie solar a partir de las leyes de Stefan–Boltzmann y Wien. Sin embargo, no consiguieron una expresión matemática universal

del problema, es decir, no permitieron conocer la composición del espectro integrado por todas las longitudes de onda en que se puede descomponer la radiación, en función de la temperatura. Ello planteó la necesidad de cambiar la base del razonamiento. No obstante, dado que los postulados clásicos de la física en los que se basaron los estudios habían dado

lugar a grandes éxitos científicos, los investigadores se encontraron perplejos ante el conflicto entre teoría y resultados experimentales. Fue Planck el primero en pensar que la clave del problema podía estribar en la discontinuidad de la energía radiante.

Teoría del quantum de acción de Planck

Al buscar una solución que fuera válida para todos los casos, Max Planck enunció su fórmula matemática, sin pronunciarse sobre la naturaleza de los fenómenos. Tal fórmula permitió fijar el poder emisor del cuerpo negro en función de la longitud de onda y en ella se relacionaban la constante de Planck, la velocidad de la luz, la constante de Boltzmann y la temperatura absoluta.

No dándose por satisfecho con una mera fórmula que no respondiera a la realidad física,

Planck realizó intensos estudios en los que partía de considerar a las moléculas del cuerpo negro como osciladores eléctricos lineales, aplicándoles las leyes de los movimientos armónicos e introduciendo su hipótesis para determinar el estado microscópico del sistema, lo que le permitió formular la teoría cuántica. A este respecto, se considera un oscilador armónico o lineal cualquier partícula oscilante en la que el desplazamiento sea periódico y

pueda representarse como función sinusoidal del tiempo. Según la hipótesis planteada por

Planck, la emisión de energía radiante de frecuencia f no tiene lugar de forma continua, sino que se verifica por múltiplos enteros de una cantidad, el quantum o cuanto, cuyo valor es hf , donde h es la constante universal de Planck, cuyo valor es de $6,62 \cdot 10^{-27}$ ergios por segundo.

La teoría de Planck de que la energía radiante es discontinua como la materia no sólo estaba en contradicción con las ideas admitidas hasta entonces, sino también con la naturaleza ondulatoria de esa energía que había sido comprobada en múltiples estudios experimentales. Por ello, Planck intentó conciliar su teoría con la física clásica al afirmar que, si bien la emisión era discontinua, la absorción se mantenía continua.

Se debe a Albert Einstein la generalización de esta discontinuidad al desarrollar sus estudios sobre el efecto fotoeléctrico, consistente en la liberación de electrones que tiene lugar al medir una radiación electromagnética sobre un material.

Poco después de que Gustav Ludwig Hertz observara, en 1887, que determinados materiales sometidos a la acción de una radiación emitían cargas eléctricas, se comprobó que todos los metales presentan este efecto al ser sometidos a la acción de rayos de longitud de onda suficientemente pequeña y que para los metales alcalinos el fenómeno tenía lugar dentro de la gama visible de radiaciones. Este efecto, llamado fotoeléctrico y que constituye el fundamento físico de las células fotoeléctricas y de las fotorresistencias, no tenía explicación posible según la teoría ondulatoria de la luz.

Al estudiar Einstein el fenómeno mediante la hipótesis de Planck, llegó más lejos que el postulador de la teoría, al admitir que la energía luminosa emitida en forma de cuantos conserva esa forma discontinua durante su propagación y se absorbe de la misma manera. Según esta interpretación, la energía luminosa de frecuencia f era transportada por corpúsculos de energía hf , a los que Einstein llamó cuantos de luz y que posteriormente se

denominarían fotones.

Como la energía hf de un fotón incidente se emplea en parte con la finalidad de realizar el trabajo de arrancar un electrón y en parte a fin de proporcionarle energía cinética, para que un fotón pueda arrancar un electrón es preciso que su energía hf sea mayor que el trabajo que hay que cumplir. Así pues, si un fotón no dispone de energía suficiente no es posible sumar la energía de otro fotón para conseguir el desprendimiento de un electrón. De todo ello se deduce que lo decisivo para el proceso de arranque no es la energía total de los rayos que inciden sobre el metal, sino la frecuencia f de los mismos, que es la que determina

la energía individual de cada fotón. Según este modelo físico, aunque un haz de rayos

pertenecientes al intervalo rojo del espectro visible tenga mucha energía en conjunto, es decir, muchos fotones, la energía de cada fotón es pequeña porque la luz roja, de elevada longitud de onda, es, por consiguiente, de baja frecuencia y el valor de hf pequeño.

Esta explicación del fenómeno fotoeléctrico fue la primera confirmación de la teoría cuántica.

Einstein la dio a conocer en 1905, el mismo año en que fue publicada la teoría de la relatividad.

Números cuánticos

La aplicación de la hipótesis de Planck al modelo atómico establecido con anterioridad por

Niels Bohr permitió explicar que la emisión de la energía radiante por un electrón se debe al salto de éste de una órbita a otra puesto que cada una de ellas queda determinada por un nivel energético, y que sólo eran posibles aquellas órbitas en las cuales el momento cinético del electrón era un múltiplo entero de un número

h denominado cuántico principal, relacionado a su vez con la constante de Planck h . El alemán Arnold Sommerfeld

modificó esta teoría e introdujo otro número cuántico, el secundario u orbital l , para hacer

la órbita elíptica. Con posterioridad se instauró un tercero, el número cuántico magnético m , que indica la inclinación de la órbita. Finalmente se estableció el número cuántico de spin s , que determinaba el sentido de giro del electrón. La ordenación de los valores que podían adoptar estos números dio lugar a una distribución de niveles y subniveles energéticos a partir de la cual pudo establecerse la estructura electrónica de los átomos y, consiguientemente, el sistema periódico de los elementos.

Sin embargo, estos modelos compatibilizaban la cuantización del átomo con la mecánica

clásica y se hacía así sentir la necesidad de una nueva base para la teoría cuántica, base que fue proporcionada por la interpretación física conocida como mecánica cuántica.

Mecánica cuántica

Según esta nueva concepción de la mecánica, la radiación, caracterizada anteriormente por

su continuidad, se reducía a gránulos materiales (cuantos) o cantidades discretas de energía. No obstante, al definir estados estacionarios del electrón, se le atribuía a éste un simultáneo carácter ondulatorio: a la cantidad de movimiento del electrón había que hacer corresponder una longitud de onda, con lo cual la constante de Planck, que había servido para introducir el carácter corpuscular en la teoría de la radiación, permitía trasladar

también la naturaleza ondulatoria a los corpúsculos materiales.

La concepción tradicional del electrón, que lo consideraba como una simple carga puntual en un medio sin estructura, quedaba descartada y había que aceptar, por el contrario, que el electrón en movimiento está siempre acompañado por una serie de ondas que, en último término, determinan la dirección que debe seguir.

El alemán Werner Heisenberg fue quien resolvió el problema de determinar la naturaleza de la onda asociada al electrón con una interpretación probabilística, según el llamado principio de incertidumbre. Según este resultado, el producto de las incertidumbres o imprecisiones con que se conocen dos magnitudes asociadas, es decir, parejas de magnitudes en las que ocurre que cuanto mejor se pretende medir una más imprecisa queda la otra, resulta ser del orden de la magnitud de la constante de Planck.

Se comprende la esencia de este principio de incertidumbre al considerar que, al realizar una medición en una partícula, es imposible no modificar el estado de la misma. Si, por ejemplo, se pudiera visualizar el electrón para estudiarlo, la luz empleada sería tan potente que modificaría su estado físico de forma radical. Llevando, pues, el principio de Heisenberg a sus últimas consecuencias cabe considerar que en mecánica cuántica se

puede calcular la energía de un electrón en casos particulares, pero no es posible determinar

simultáneamente su posición exacta. Así pues, sólo se puede dar una distribución de probabilidad para las diversas situaciones posibles.

Al aplicar la mecánica cuántica al estudio del átomo desaparecen las órbitas deterministas de los primeros modelos atómicos y se sustituyen por las expresiones de probabilidad o funciones onda ideadas por Erwin Schrödinger.

Desarrollada con estas directrices, la mecánica cuántica no sólo eliminó las grandes dificultades de tipo lógico que presentaba la física teórica, sino que permitió también resolver nuevos problemas, tales como la interpretación de las fuerzas de valencia y de las fuerzas intermoleculares.

Electrodinámica cuántica

La extensión de principios cuánticos a las interacciones que se establecen entre partículas cargadas y un campo electromagnético y a las que tienen lugar entre corpúsculos cargados entre sí hace de toda la física atómica y nuclear un amplio campo de ensayo para esta teoría, por el comportamiento fundamentalmente electromagnético de los átomos y las moléculas.

Esta interpretación, que así formulada se conoce como electrodinámica cuántica, ha demostrado su eficacia en la detección de algunas partículas subatómicas en las que se ha alcanzado precisión de millonésimas.

Desde que en 1931 el británico Paul Adrien Dirac sentó las bases de la electrodinámica cuántica con el descubrimiento de una ecuación explicativa del movimiento de spin o giro de los electrones, que incorporaba la teoría cuántica y la de la relatividad especial de Einstein, la disciplina física se ha ido puntualizando y completando hasta llegar a la conclusión definitiva de que las partículas cargadas interactúan por emisión y absorción de fotones. Estos fotones son virtuales, es decir, los fenómenos referidos a ellos suceden como si tales corpúsculos existieran, aunque no puedan verse o detectarse.

La interacción de dos partículas cargadas tiene lugar en series de procesos de complejidad creciente. En el caso más sencillo sólo interviene un fotón; en un proceso de segundo orden son dos los fotones implicados, y así sucesivamente.

Tales procesos corresponden a todas las formas posibles en las que pueden interactuar las partículas por intercambio de fotones virtuales y cada uno de ellos se puede representar

gráficamente mediante el modelo de diagrama ideado por Richard Phillips, físico estadounidense que desarrolló la electrodinámica cuántica de la forma que más se ha generalizado. Según su interpretación, la emisión y absorción de fotones, partículas

de luz que transmiten fuerzas electromagnéticas, se realizan a través de la acción de partículas cargadas, tales como electrones o positrones.

Todos los fenómenos que tienen lugar en sistemas submicroscópicos exhiben una cuantización. Los fenómenos, pues, mantienen en este nivel su desarrollo según múltiplos de

valores discretos, los cuantos.

b) Relación entre radiación y frecuencia de radiación.

Según la hipótesis de Planck, la emisión de energía por los cuerpos no es continua, sino que se realiza por paquetes o cuantos de acción cuya energía viene dada por la expresión:

$$E = h \cdot f$$

Siendo f la frecuencia de la radiación, y h , un parámetro denominado constante de Planck.

c) Valor de la constante h de Planck

Para dar explicación a los fenómenos que observaba, Planck dedujo la necesidad de que la emisión y la absorción de energía se produjeran en cantidades discretas (discontinuas) y estableció la constante universal de la teoría de los cuantos.

Que es una constante de desproporcionalidad entre la energía luminosa emitida o absorbida en un sistema elemental y la frecuencia de la luz. Su valor es $6,62 \cdot 10^{-27}$ ergios por segundo. Se lo denomina también cuanto de acción de Planck y se designa por la letra h . Constante universal de la física.

d) ¿Que es un fotón?

Einstein dio el nombre de fotón a las partículas de luz, y luego su nombre se generalizó a otras regiones del espectro electromagnético, tales como rayos X, radiación ultravioleta.

e) Rayos X y radiación ultravioleta

Rayos X:

La naturaleza desconocida y misteriosa de la radiación que descubrió de forma un tanto accidental el físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen, y con la que obtuvo una fotografía de la estructura ósea de la mano de su esposa, lo llevó a denominar a sus haces como las incógnitas matemáticas: rayos X.

Los rayos X son emisiones de naturaleza electromagnética análoga a la luz visible que aportan cantidades de energía superiores.

Las experiencias elaboradas por Roentgen, tras su detección en 1895 como ecos o ruidos de energía producidos a lo largo de sus investigaciones acerca de los rayos catódicos emanados desde fuentes de radiación electromagnética sobre pantallas fluorescentes, establecieron las propiedades fundamentales de la nueva radiación llamada X: su alto poder de penetración, indicativo de un gran contenido energético

asociado; su ausencia de desviación en su trayectoria al ser sometidos a campos eléctricos y magnéticos externos; y su capacidad para producir fluorescencia. Los estudios sobre la difracción de rayos X, mecanismo de desviación y extensión de las radiaciones que les permite bordear obstáculos, llevada a cabo por el equipo científico de Max von Laue en los inicios del siglo XX, completó el conocimiento del origen y las características de los mismos.

Se dedujo así que los rayos X provenían del choque de los electrones, partículas elementales de carga eléctrica negativa, que componen los rayos catódicos al ser emitidas a grandes velocidades contra la superficie de impacto. Tal colisión actúa como freno del haz electrónico y libera energía electromagnética en forma de radiación.

Esta interpretación explica el efecto llamado *bremsstrahlung* (del alemán, radiación de freno) por el cual la emisión de rayos X desde un objeto no posee, en general, una frecuencia única sino que la retención de electrones produce un espectro o amplitud de radiación relativamente ancho.

Las aplicaciones de los rayos X se fundamentan preferentemente en su capacidad de penetración, lo que permite obtener imágenes y fotografías del interior de los objetos, en el caso de la industria, y del cuerpo humano, de importancia para diagnósticos médicos. Un exceso de exposición a rayos X ocasiona lesiones sobre los órganos y los tejidos del cuerpo, por lo que se establecen unos índices de tolerancia radiactiva que en ningún caso se deben superar. El estudio de la radiación X proveniente del espacio extraterrestre adquirió durante el siglo XX relevancia en las investigaciones astrofísicas del universo.

Radiación:

Las investigaciones científicas de los siglos XIX y XX detectaron un elevado número de radiaciones procedentes de diversas fuentes naturales: luz, radiactividad, ondas de radio, etc. Sin embargo, el espectro de variedades de radiación se abre hacia diversos

aspectos aún ignotos y entre los que se cuentan las emisiones radiantes de la mente humana que, según algunos estudiosos de tales cuestiones, provocan fenómenos catalogados como paranormales.

Radiación es todo proceso de emisión de energía o materia por parte de los cuerpos. Los

principales tipos de radiación de energía, como el calor, la luz visible, infrarroja y ltravioleta, los rayos X y gamma (g), se engloban bajo la denominación común de electromagnéticos. La emisión material se efectúa en forma de rayos compuestos por partículas subatómicas, ya sean electrones, protones, neutrones, partículas alfa (a), núcleos de helio, etc

Tipos de radiación

La coherencia de los modelos teóricos de la física desarrollada desde el primer cuarto del siglo XX, y avalada por comprobaciones experimentales, llevó a una interpretación uniforme de la composición de los distintos tipos de radiaciones. El principio de dualidad, derivado de ella, supone que las partículas constituyen una combinación de masa y energía, esto es, de corpúsculo material y onda que conforman una unidad de modo que toda radiación se compone de una partícula elemental y un tipo específico de onda asociada.

Las radiaciones electromagnéticas se sustentan en partículas llamadas fotones que carecen de masa, si bien manifiestan su naturaleza material al experimentar bajo condiciones extremas una atracción gravitatoria por parte de grandes acumulaciones de materia. Las

radiaciones electromagnéticas, cuyo prototipo es la luz, se desplazan en el espacio absoluto

a una velocidad fija aproximada a los 300.000 kilómetros por segundo. Predichas en 1864 por James Clerk Maxwell y descubiertas por Heinrich Hertz en 1877, comprenden una amplia gama de frecuencias en la que se incluyen las ondas de radio, la luz visible, la infrarroja y la ultravioleta, los rayos que acompañan a procesos radiactivos y los rayos X.

Las radiaciones de partículas son aquellas que se desplazan a velocidades inferiores a la de la luz. En su estructura material, se detectan partículas subatómicas de masa no nula, entre las que sobresalen: los electrones, unidades elementales de carga eléctrica negativa que soportan los rayos beta (b), de carácter radiactivo, y los rayos catódicos; los protones, partículas de carga equivalente a la de los electrones aunque de signo positivo que producen los rayos canales o positivos; los neutrones o corpúsculos neutros en forma de radiación desde los núcleos atómicos en los procesos de fisión nuclear; las partículas a, núcleos de helio de carga positiva que sustentan los rayos a; etc.

Efectos de la radiación sobre la materia

Las teorías atómicas desarrolladas desde las postrimerías del siglo XIX postulan que la materia se halla dividida en átomos de diferentes clases con una estructura interna común: un núcleo central constituido por protones y neutrones y una envoltura exterior de forma variable en la que circulan los electrones distribuidos en varios niveles. En su estado neutro, los átomos contienen idéntico número de protones y electrones.

Al incidir un haz de radiación sobre un átomo, comunica a éste parte de la energía que aporta e induce sobre él una desestabilización capaz de producir tres tipos de resultados:

una excitación, en la que un electrón de la corteza absorbe la energía recibida y la invierte en

situarse en un nivel atómico más alejado del núcleo; una ionización, en la que un electrón adquiere suficiente energía para abandonar el campo de fuerzas del átomo, que queda cargado positivamente, por defecto, en forma de ion; y una interacción nuclear, donde la radiación incide sobre el núcleo en el que desencadena posibles procesos radiactivos de fisión nuclear, emisión de rayos β , etc.

De especial trascendencia histórica resultaron los fenómenos de interacción de la radiación

electromagnética con la materia, llamados efectos fotoeléctrico y Compton. En el primero, un fotón es portador de energía suficiente para extraer un electrón del átomo con el que colisiona; el fotón se aniquila y el electrón puede detectarse con una célula fotoeléctrica. En el efecto Compton, el fotón no se destruye y emerge de nuevo desde el átomo junto al electrón extraído, si bien modifica su frecuencia, es decir, el color de la luz que soporta.

Desde una perspectiva general, la radiación puede crear variaciones apreciables en la estructura y la química de la materia que atraviesa: cambios en las propiedades físicas (dureza, elasticidad) y la cohesión cristalina; alteraciones en las características de conductividad eléctrica y calorífica de los materiales; ionización y modificación en la composición química; etc.

Efectos biológicos de la radiación

La acción de radiación sobre los organismos vivos produce efectos beneficiosos o nocivos en función de su naturaleza y su intensidad.

La interacción de la luz con determinados componentes de los organismos provoca procesos tan conocidos como la fotosíntesis que, desarrollada en la clorofila de las plantas verdes, constituye el principal mecanismo de que se sirve la naturaleza para generar oxígeno. Asimismo, la recepción de la luz solar gobierna los ciclos metabólicos, fisiológicos y de comportamiento de los animales y las plantas.

No obstante, una excesiva exposición a la radiación, incluso la luminosa visible, puede lesionar las células y los tejidos. Estos efectos perniciosos, de tipo somático causante de

enfermedades y genético de carácter hereditario, provienen de la capacidad de la radiación para ionizar los átomos de las células vivas, que origina en ellas un desequilibrio que desemboca ocasionalmente en su degeneración e incluso muerte. El poder de ionización de las radiaciones depende de la energía que conllevan y del lapso de tiempo durante el que se

reciben, de manera que las radiaciones electromagnéticas de los tipos ultravioleta, X y γ poseen mayor peligrosidad para los organismos.

Los rayos procedentes en su mayor parte de reacciones nucleares, y en menor medida los

rayos X, causan con mayor facilidad, dado su enorme poder de penetración e ionización

celular, enfermedades, tumores y malformaciones genéticas. A su vez, estas características les permiten ser usados en técnicas terapéuticas, con una aplicación local que destruye las células del tumor y en inspección de los órganos internos corporales como método de prevención, respectivamente.

Las dosis de radiación se miden habitualmente en rad, cantidad de radiación absorbida por un tejido determinado, y rem, equivalente a la radiación que produce idénticos efectos biológicos sobre el cuerpo humano que un rad de rayos X. Los centros de salud y

protección ambiental elaboran periódicamente estudios sobre la contaminación de radiación de la atmósfera

y establecen unos índices de permisividad máxima para cada uno de sus tipos.

- **Estudio de la serie de Balmer**

a) Características de la serie de Balmer

Los espectros de línea de emisión de algunos elementos tienen algunas decenas de líneas; los de otros, centenares y otros como el del hierro, millares de líneas. Pero a simple vista se advierte en algunos casos, como en el espectro del hidrógeno, cierta regularidad en la posición de líneas, lo que revela que alguna ley vincula las longitudes de onda de las distintas líneas.

En 1885 Balmer descubrió que las longitudes de onda de todas las líneas del espectro del hidrógeno se podían obtener de la fórmula

$$N^2$$

$$= 3645,6 n^2 - 4$$

siendo $n = 3, 4, 5, 6, \dots$, para la primera, la segunda, la tercera, la cuarta, etc., líneas de la serie del hidrógeno, a la que se llamó desde entonces serie de Balmer.

b) ¿Que es la espectroscopia?

Desde los albores de la ciencia resultó extraordinariamente difícil el establecimiento de las fórmulas químicas correspondientes a ciertas sustancias, a través de grandes esfuerzos que con frecuencia conducían al fracaso. La aparición de los métodos espectroscópicos permitió liberar a los experimentadores de esta ingrata tarea y consiguió reducir considerablemente tanto los tiempos de respuesta como el tamaño de las muestras empleadas.

La espectroscopia es un método de análisis que determina la estructura química de una

sustancia, los elementos y los grupos funcionales que la componen. Los procesos espectroscópicos actúan, en general, de manera no destructiva, con gran precisión, en

cortos intervalos de tiempo y con muestras de magnitud mínima. Los diferentes tipos de

espectroscopias se adecuan a los diversos compuestos que hayan de analizarse, aunque en la mayoría de ellos se investigan los espectros absorbidos o emitidos por la sustancia en relación con unos parámetros de referencia. Espectro es el resultado de la descomposición de las radiaciones emitidas o absorbidas por un cuerpo, que abarca desde las bajas

frecuencias, como las térmicas, hasta las más altas, entre las que se encuentran el ultravioleta y los rayos X, a través de las ondas hertzianas de la radio y toda la gama de colores de la luz visible. La técnica espectroscópica se basa en la naturaleza ondulatoria

de la luz y otros tipos de radiación, y considera como variables de referencia fundamentales la frecuencia, que determina el número de repeticiones por segundo de la onda, que es una función periódica del tiempo, y la longitud de onda o distancia que recorre ésta por unidad de frecuencia. El producto de estas dos variables suministra la velocidad de propagación de la onda.

Los diversos métodos espectroscópicos (absorción atómica y molecular, resonancia magnética nuclear, espectroscopia de masas, etc.), complementados con la cromatografía de gases, han permitido desechar el

uso de múltiples reactivos para realizar análisis con frecuencia inseguros, complicados e imprecisos.

Espectroscopia de absorción atómica

La teoría atómica cuántica postula la existencia, en el interior del átomo, de un núcleo formado por protones de carga positiva y neutrones o partículas eléctricamente neutras, en torno al cual se mueven los electrones o cargas elementales negativas en diversos orbitales o niveles de energía. Así, el método espectroscópico de absorción atómica se basa en la diferente capacidad de absorción de radiación de los átomos de los distintos elementos en estado fundamental, en presencia de átomos excitados del mismo tipo. Se llama estado fundamental de un átomo a una disposición de los electrones en sus órbitas de mínima energía, que son las más próximas al núcleo atómico; un átomo excitado, por el contrario,

posee electrones que ocupan las órbitas más alejadas y dejan vacías algunas de las interiores. Cuando un átomo recibe una radiación electromagnética (luz visible, infrarroja, rayos X, etc.) de la frecuencia o longitud de onda adecuada, absorbe un fotón, que es un cuanto o cantidad mínima e indivisible de energía electromagnética, y pasa a un estado excitado al transferir uno de sus electrones interiores a una órbita más alejada. Por el

contrario, si un electrón cae de una órbita exterior a otra interior, emite un fotón, cuya frecuencia de vibración puede determinarse mediante la fórmula de Planck $E = h \cdot f$, donde E es la energía de la radiación electromagnética, h es la constante de Planck y f la

frecuencia del fotón emitido. La espectroscopia de absorción atómica requiere una disociación previa de la muestra, o separación de las partes que componen sus moléculas, y una posterior observación de su línea de resonancia, también llamada característica espectral del elemento, magnitud que disminuye progresivamente al aumentar el grosor de la muestra. Como segundo paso se hace pasar la radiación no captada por la muestra a través de un filtro especial llamado monocromador, con el que se separa la línea de resonancia correspondiente a la frecuencia estudiada de todas las restantes. La intensidad de esta

línea suministra información acerca de la proporción en la que se encuentra este elemento en la muestra: cuanto más oscura sea la línea de resonancia, menos radiación ha llegado al

monocromador y mayor número de átomos han absorbido dicha radiación.

La sensibilidad del aparato con el que se realiza una espectroscopia de absorción viene dada por la concentración o proporción de metal disuelto en el líquido que produciría una absorción del 1 %. Éste es un dato orientativo sobre la precisión del espectrógrafo, ya

que varía según la muestra.

La espectroscopia atómica es útil para determinar las proporciones de metales y semimetales en disolución. Otros sistemas analíticos derivados de la absorción atómica son: la cámara de grafito, el método de absorción atómica sin llama y a baja temperatura, el análisis de mercurio y los procedimientos específicos de arsénico, selenio, antimonio, telurio, bismuto y estaño.

Espectroscopias moleculares

Basados en las propiedades de la materia en el nivel molecular, existen diversos métodos de espectroscopia que atienden al carácter y a la estructura interna de la muestra de análisis. La espectroscopia infrarroja, que utiliza zonas del espectro comprendidas entre 2,5 y 16 micras de longitud de onda, se emplea especialmente en análisis químico orgánico. En este rango de valores se obtiene el espectro molecular vibracional, alcanzado cuando la frecuencia de oscilación de una molécula, vista como un muelle en movimiento en torno

a un punto de equilibrio, coincide con la de la luz absorbida. Esta frecuencia, llamada de resonancia, sirve para establecer las comparaciones entre muestras, por lo que su cálculo precisa de una amplia información previa sobre los espectros infrarrojos de diferentes

sustancias similares a la analizada.

Las espectroscopias visibles y ultravioletas se basan en la excitación electrónica de los

enlaces, comparticiones de electrones por parte de dos átomos en un orbital común llamado enlazante.

De más difícil interpretación resulta la espectroscopia de microondas, ya que la baja cantidad de energía transmitida por este tipo de radiaciones sólo afecta a la molécula en sus

diferentes niveles de rotación. Se aplica, por tanto, a moléculas de estructura sencilla, sustancias gasificadas en general, y no como un método analítico de rutina.

La espectroscopia Raman, que tomó su nombre del físico indio Chandrasekhara Venkata Raman, quien la estudió, parte del hecho de que una sustancia iluminada por medio de luz monocromática, es decir, de frecuencia uniforme, difunde en todas las direcciones haces luminosos de otras frecuencias que, reunidas, constituyen su espectro Raman característico. Este fenómeno es una consecuencia del efecto de la difusión molecular, y su observación precisa de una fuente luminosa de gran intensidad que emita haces monocromáticos, para evitar así la prolongada exposición de placas fotográficas hasta conseguir captar el efecto,

excesivamente débil.

Espectroscopia de resonancia magnética nuclear

Los electrones, en sus traslaciones alrededor del núcleo atómico, están dotados de un

movimiento de rotación sobre sí mismos, llamado spin (en inglés, giro), que puede tomar dos

sentidos opuestos. Asimismo, al tratarse de cargas eléctricas móviles, producen en su entorno perturbaciones de naturaleza magnética, determinadas por la magnitud del momento

magnético, producto de su distancia media al núcleo, su cantidad de carga electrostática y

su velocidad de traslación medida en ángulo por unidad de tiempo.

El método de espectroscopia de resonancia magnética nuclear se basa en el análisis del spin de las partículas cargadas eléctricamente de la molécula y de su momento magnético. Para

ello, se hace incidir sobre el núcleo una radiación electromagnética de frecuencia conocida, a raíz de lo cual, en función de los diferentes equilibrios estables posibles dentro de la molécula, ésta devolverá una radiación, de cuyo análisis estadístico se deduce la llamada frecuencia de absorción característica del núcleo.

Dentro de la espectroscopia de resonancia magnética nuclear, resulta de particular interés la del protón, partícula de carga positiva contenida en el núcleo de los átomos y que constituye, en definitiva, el propio núcleo del átomo de hidrógeno, elemento de número atómico 1. Por ello, esta espectroscopia se aplica al estudio de multitud de procesos intermedios del refinado o refinación del petróleo, con el fin de mejorar el rendimiento y reducir los costos de los productos deseados, como el butano, la gasolina, etc.

Espectroscopia de masas

El tipo de espectroscopia que analiza las muestras mediante la ionización de sus átomos y

moléculas, esto es, a través de la pérdida o adquisición de electrones y su posterior separación según su relación masa/carga, recibe el nombre de espectroscopia de masas. Esta técnica analítica, potente y precisa, aporta una excelente información para muestras

extremadamente pequeñas y permite obtener no sólo la composición química de la muestra, sino también su composición isotópica, donde un isótopo de un elemento químico es otro elemento cuyos átomos poseen el mismo número de protones y electrones, aunque diferente cantidad de neutrones, con lo cual varía la masa de su núcleo. Al poseer idéntica configuración electrónica, el comportamiento químico de los isótopos de un elemento es el

mismo, pero mediante la espectroscopia de masas pueden ser separados. Este método se

aplica en biología para aislar isótopos trazadores, y en geología y arqueología para diferenciar los isótopos medidores de la antigüedad de los materiales y rocas minerales.

La ionización de la muestra, requisito previo al análisis por espectroscopia de masas, se

realiza mediante bombardeo con electrones energéticos, en caso de gases, o por termoionización o pérdida de electrones bajo la exposición a altas temperaturas, para líquidos y sólidos. En el análisis de moléculas, esta ionización rompe los enlaces químicos que unen sus átomos, por lo que se hace necesario complementar la técnica con un método de análisis químico con el fin de deducir la estructura molecular de las muestras.

En una etapa posterior se aceleran los iones o átomos con un defecto o un exceso de

electrones en su estructura en un campo eléctrico y uno magnético posterior en el que, al penetrar con gran velocidad, experimentan una dispersión, según su diferente relación masa/carga, que produce una señal eléctrica indicadora de las cantidades relativas de cada uno de los elementos presentes en la muestra.

Los primeros modelos de analizadores espectroscópicos necesitaban operarios altamente

cualificados y con gran experiencia, además de una abundante documentación con la

que comparar e interpretar los resultados obtenidos. Con el curso del tiempo, la evolución

técnica de los espectrómetros comerciales incorporó microprocesadores que realizan automáticamente la interpretación, con acceso a bancos de datos almacenados en sus memorias, lo que permite incluso realizar tratamientos estadísticos que aportan en pocos

instantes valiosas informaciones para el investigador.

c) Gráficar la serie de Balmer y explicar las líneas en el hidrógeno

H H H" H

(A°) 6562 4861 4340 4101

De esto se deduce que la línea H (de menor energía involucrada) debe corresponder al salto entre las órbitas L y M; la línea H (de mayor energía) al salto entre L y N, etc.

Así pudo Bohr justificar la estructura del átomo del hidrógeno (claro que de un modo elemental), explicando con exactitud la causa que originaba las líneas del espectro

- **En que consiste el efecto fotoeléctrico. Descríbelo.**

El efecto fotoeléctrico consiste en la liberación de electrones de un metal, provocada por la incidencia de luz sobre él; por eso se los llama fotoelectrones (photo: luz)

Einstein comprobó que la cantidad de fotoelectrones emitidos por el metal dependía directamente de la intensidad de la luz incidente; a mayor iluminación, mayor cantidad de electrones desprendidos de los átomos del metal.

Sin embargo, al medir la velocidad de estos fotoelectrones se constató que no dependía de la intensidad de luz incidente. Podía irradiarse con luz más intensa (aumentando así la cantidad de fotoelectrones), pero la velocidad seguía siendo la misma.

Esto indicaba claramente que cada electrón era capaz de absorber una cantidad de energía fija, porque si no fuera así, se producirían fotoelectrones de velocidades muy diferentes con la misma luz incidente, según la cantidad de energía absorbida por cada electrón.

Ya probado el hecho de que la intensidad de luz no influía en la velocidad de los fotoelectrones, se empleo luz de diferentes colores (es decir, utilizando distintas frecuencias de radiación luminosa).

Y entonces si se comprobó la variación de velocidad; frente a una frecuencia determinada (por ejemplo con la luz verde) todos los fotoelectrones tenían la misma velocidad, pero esta era diferente a la que tenían cuando se usaba, por ejemplo, luz violeta.

En base a la ecuación de Planck, Einstein explico que la energía entregada por la luz a un electrón para provocar su desprendimiento por efecto fotoeléctrico, no era una cantidad cualquiera y al azar, sino exactamente un paquete de energía o cuanto de radiación, siendo $h \cdot \nu$ la energía absorbida por el electrón.

Por tanto la luz se comportaba como si estuviera formada por partículas.

- **Teoría Corpuscular de Newton y Teoría Ondulatoria de Huyguens**

Teoría Corpuscular: La luz consiste en pequeñísimos corpúsculos que salen del cuerpo luminoso y cruzan el espacio a una velocidad fantástica. Los corpúsculos chocan contra un espejo y se reflejan en el según las leyes del choque, que se distingue en la mesa de billar.

Teoría Ondulatoria: Cada punto alcanzado por un movimiento ondulatorio se convierte a su vez, en un centro productor de ondas. Cuando una onda llega a un obstáculo interpuesto en su camino, lo rodea parcialmente. La construcción de Huyguens nos muestra que, al pasar, hay un frente de onda que se propaga en la región donde el obstáculo hace sombra. Este fenómeno se llama difracción de las ondas.

- **A que llamas frecuencia umbral.**

Desde el punto de vista de la física, el concepto de frecuencia adquiere una especial importancia en el tratamiento de ondas, perturbaciones de tipo energético que se propagan en el espacio con una velocidad determinada. La rapidez de desplazamiento del frente de onda depende directamente de la frecuencia y de la longitud de onda, distancia comprendida entre dos puntos consecutivos con el mismo estado de perturbación.

El llamado espectro de frecuencias, generalmente correspondiente a ondas sonoras o

haces de luz emitidos por una fuente, representa la división de una onda compleja en

suma de otras más simples, ya que, según estudios teóricos, cualquier función periódica es susceptible de descomposición en la suma de ondas de frecuencia múltiple original. Ello constituye el fundamento de los dispositivos analizadores de frecuencia, empleados para identificar fuentes de transmisión.

El espectro electromagnético abarca desde las radiaciones nucleares y ultravioletas, de baja frecuencia, hasta los rayos infrarrojos y ondas de radio, pasando por toda la gama visible de colores.

Si se hacen mediciones con muchas frecuencias se observan que existe una frecuencia f_0 que es como un umbral, pues si se ilumina con luz de frecuencia menor que f_0 la luz es incapaz de arrastrar electrones.

• **Ecuación fotoeléctrica de Einstein**

La ecuación fotoeléctrica de Einstein es:

$$W = h \cdot f - h \cdot f_0$$

Donde W representa la energía cinética que lleva el electrón desprendido del metal por efecto fotoeléctrico, siendo $h \cdot f$ la energía del fotón incidente (cuanto de radiación) absorbido por el electrón.

Como f_0 es la frecuencia umbral del metal irradiado, entonces $h \cdot f_0$ es la energía que hay que gastar para arrancar al electrón del átomo, y esta energía depende de la fuerza de unión del electrón con el átomo.

Resulta inmediato entonces que a mayor frecuencia del fotón incidente, mayor será también la energía W que transportara el fotoelectrón (traducida en mayor velocidad de desplazamiento).

Al encontrar esta ecuación, la explicación de Einstein asumió enorme importancia, pues como ya hemos dicho, esto significaba que la energía no era absorbida de a poco por el electrón (no se transmitía en forma continua) sino bruscamente pues se absorbe un paquete de energía, transportado por el fotón incidente.

• **Estudio de la Radioactividad**

Cuando en 1896 Henri Becquerel investigaba en Francia la relación entre la fluorescencia y los rayos X, descubrió accidentalmente que al poner en contacto un compuesto de uranio con una placa fotográfica envuelta en papel negro, se producía el mismo efecto que si la placa estuviera en presencia de rayos X; es decir, el compuesto de uranio emitía una radiación, que se denominó "radiación uránica", la cual oscurecía la placa fotográfica. El descubrimiento de Becquerel revolucionó la comprensión de la estructura de la materia. Más adelante se encontró que los átomos del uranio se transforman espontáneamente en átomos de otros elementos, y que además esta transición ocurre acompañada de la emisión de una radiación muy energética capaz de

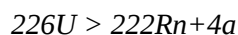
oscurecer una placa fotográfica.

Para comprender la naturaleza de este fenómeno, veremos a grandes rasgos la estructura del átomo de un elemento. El átomo está constituido por un núcleo y una nube de electrones que giran alrededor de éste a grandes velocidades. El tamaño del núcleo es muy pequeño comparado con el resto del átomo. Si el átomo fuera del tamaño de una gran plaza, su núcleo tendría el tamaño de una pelota de ping-pong y los electrones serían puntos. A pesar de que el núcleo es muy pequeño, no tiene una estructura simple y en él está localizada casi toda la masa del tomo; el peso del núcleo es aproximadamente cuatro mil veces superior que el de los electrones periféricos.

El núcleo se encuentra formado por neutrones (n), partículas sin carga, y protones (p), partículas de carga eléctrica positiva +1. A los protones y neutrones se les llama nucleones, por ser precisamente la parte fundamental del núcleo, y tienen una masa aproximada de una unidad atómica de masa ($1,65 \times 10^{-24}$ gramos). El núcleo está rodeado de una nube de electrones negativos, o negatrones, cuya carga eléctrica tiene la misma magnitud que la del núcleo. Cada negatrón tiene una carga eléctrica negativa -1 y una masa muy pequeña, 1.840 veces menor que la masa del nucleón ($9,1 \times 10^{-28}$ gramos).

Varios años después de que Becquerel había realizado su experimento, se descubrió que la entonces llamada "radiación uránica" estaba formada principalmente por tres tipos de radiación de origen nuclear; los rayos alfa (a) que fueron identificados posteriormente como núcleos de helio con carga + 2, constituidos por cuatro nucleones (2 protones y 2 neutrones), los rayos beta (b), que son electrones cargados negativamente, y finalmente, los penetrantes rayos gamma (g), o fotones, que son en realidad radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz y los rayos X, pero de longitud de onda mucho menor. Existen también núcleos de otros elementos que emiten electrones de carga eléctrica positiva +1, o positrones (b+).

La radiación observada por Becquerel no podía explicarse por medio de una reacción química. Ahora sabemos que el fenómeno que origina la "radiación uránica" es una transformación de los núcleos del uranio 226 (^{226}U) en núcleos de radón 222 (^{222}Rn). Los números 226 y 222 indican la cantidad de nucleones que tienen estos núcleos. Este cambio se realiza con emisión de partículas alfa de acuerdo con la siguiente reacción:



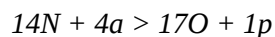
Durante los años que siguieron a estos experimentos, la curiosidad respecto a la naturaleza de la radiación emitida por el uranio estimuló muchos estudios e investigaciones que a su vez dieron lugar a nuevos descubrimientos.

Los estudios que en 1898 realizaron Pierre y Marie Curie sobre los minerales de uranio y torio condujeron al descubrimiento de dos elementos: el polonio y el radio. Estos despertaron un gran interés, porque una de sus principales características es que, como el uranio, emiten radiación muy penetrante que ioniza el aire y otros gases.

Gracias a todos estos datos podemos contestar la pregunta: ¿qué es la radiactividad?

Marie Curie llamó "radiactividad" a la propiedad que poseen el radio y otros elementos inestables de emitir radiación espontáneamente al desintegrarse. Ahora sabemos que la radiactividad es la manifestación inmediata de la energía del núcleo del átomo y se vuelve evidente por la emisión espontánea de radiación alfa, beta y gamma. Las técnicas que tuvieron que desarrollar los esposos Curie para manejar el polonio y el radio permitieron el uso práctico de la radiactividad en beneficio de la humanidad.

En Inglaterra también se realizaban experimentos muy importantes. En 1919, Rutherford bombardeó los núcleos de nitrógeno con partículas provenientes de la desintegración radiactiva del polonio. Encontró que las partículas alfa, al chocar con núcleos de nitrógeno, se unen a ellos convirtiéndolos en núcleos de oxígeno. La reacción que ocurre en este experimento se describe de la manera siguiente:



Rutherford demostró que un elemento químico puede transformarse en otro con propiedades físicas y químicas diferentes a las del original. Esta idea era inconcebible en los medios científicos a principios de este siglo, ya que se creía en la existencia de un átomo indivisible e indestructible. ¿Cómo podría aceptarse la idea de que la materia se transforma? No obstante, allí estaba la prueba contundente: Rutherford había logrado la transmutación de un elemento en otro y el sueño de los alquimistas se había convertido en realidad. La

radiactividad del uranio, torio, radio y polonio se podría explicar ahora como la desintegración del átomo; esto es, la expulsión de una partícula cargada dejando un nuevo elemento más ligero. Con los experimentos de Rutherford nació la idea del núcleo atómico, y con él, el concepto moderno del átomo.

Los elementos se clasifican de ordinario según sus propiedades químicas; si se ordenan de acuerdo con el número de protones en el núcleo, las propiedades químicas se repiten

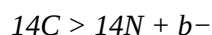
periódicamente y de esa manera se obtiene la llamada tabla periódica de Mendeleev. Ocurre que en el mismo sitio de la tabla periódica quedan clasificados átomos químicamente idénticos pero con núcleos diferentes, y por consiguiente propiedades físicas distintas. Estos átomos se llaman isótopos. Con esto llegamos a una segunda pregunta importante:

¿Qué son los radioisótopos?

Los isótopos de un elemento son los átomos que tienen núcleos con igual número de protones pero diferente número de neutrones. Aunque el peso atómico de los isótopos difiere de uno a otro, todos tienen el mismo comportamiento químico. Por ejemplo, hay varios isótopos de carbono, entre ellos el carbono 12 y el carbono 14 (el número indica la cantidad de nucleones de cada isótopo), cuyos núcleos están formados por 6 protones, pero el número de neutrones es de 6 para el primero y de 8 para el segundo.

Los isótopos inestables de un elemento tienen propiedades radiactivas, es decir, emiten

radiaciones espontáneas, y se les llama radioisótopos o isótopos radiactivos. El carbono 12 es un isótopo estable, y en cambio el 14 es radiactivo y se desintegra emitiendo radiación (β^-) transformándose en nitrógeno 14, de acuerdo con la siguiente reacción:



Veamos ahora las propiedades de las radiaciones emitidas por los radioisótopos. De los tres tipos de radiaciones, (α), (β) y (γ), las partículas (α) tienen un bajo poder de penetración, ya que por su masa y carga incluso una hoja de papel puede frenarlas. Las (β) son más penetrantes que las (α) de igual energía. Su poder de penetración es moderado y pueden frenarse con una hoja de aluminio de 1 mm de espesor. En cambio, la radiación (γ) con la misma energía atraviesa fácilmente tanto el papel como el milímetro de aluminio y sólo la frena un material que contenga elementos pesados como una placa de 5 cm de plomo.

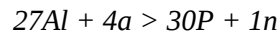
La rapidez con que se realiza la desintegración radiactiva depende principalmente de la estructura del núcleo inestable. La vida media de un radioisótopo es el tiempo que se requiere para que el número total de núcleos que no se han desintegrado se reduzca a la mitad; las vidas medias de los radioisótopos varían desde fracciones de segundo hasta millones de años. Después de que transcurre la vida media de un radioisótopo, éste sólo tiene la mitad de la radiactividad. El proceso de decaimiento continúa y, después de cuatro vidas medias, solamente queda 6,2% de la radiactividad original.

Por lo general, los átomos radiactivos de un elemento en la naturaleza son poco abundantes, porque se encuentran mezclados con diversos isótopos estables; el potasio 40, isótopo radiactivo, tiene una abundancia relativa en la naturaleza de 0,0118%; el resto del elemento está formado por los isótopos potasio 39 y potasio 41, que son estables y tienen una abundancia de 93,22% y 6,77%, respectivamente.

Hasta ahora sólo se han mencionado 105 radioisótopos naturales. Sin embargo, los radioisótopos también se pueden producir artificialmente.

¿Cómo se producen los radioisótopos artificiales?

En 1934, Frederic e Irene Joliot–Curie descubrieron que al bombardear aluminio con una fuente de partículas (α) se producía una radiación muy penetrante; pero lo curioso era que ésta continuaba aún después de suprimir la fuente emisora de partículas (α). Habían descubierto la radiactividad artificial al producir un radioisótopo del fósforo, ^{30}P , por medio de la siguiente reacción:



Este fósforo se desintegra provocando la emisión de positrones de acuerdo con la siguiente reacción:



El descubrimiento de la radiactividad artificial provocó una serie de nuevos logros. Uno de los más importantes fue el de Enrico Fermi, quien concibió la idea de emplear los neutrones como proyectiles para inducir radiactividad. Los neutrones penetran fácilmente en los núcleos de casi todos los elementos y producen así nuevos núcleos, algunos de ellos radiactivos.

Actualmente se pueden producir radioisótopos bombardeando los blancos apropiados con neutrones poco energéticos, de aproximadamente 0,025 eV (un electrón–volt –eV– es la energía adquirida por un electrón cuando se le somete a una diferencia de potencial de un voltio en el vacío). Estos neutrones se obtienen fácilmente en un reactor nuclear, como es el TRIGA Mark III instalado en el Centro Nuclear de México. Sin embargo, existen otros radioisótopos ricos en protones, que no pueden producirse por bombardeo con neutrones sino por la acción de partículas cargadas, como protones y de neutrones muy energéticos, que pueden generarse en un ciclotrón o en otro acelerador.

¿Cómo se mide la radiactividad?

Los radioisótopos se pueden detectar gracias a la radiación que emiten; su observación requiere del desarrollo de técnicas que en ocasiones son complicadas. Un ejemplo muy simple de detectores de radiactividad es la placa fotográfica que se ennegrece en mayor o menor grado dependiendo de la intensidad y calidad de la radiación que incide en ella.

También existen detectores de radiactividad más complicados, como el de Geiger, el de

centelleo, etcétera, en los que se aprovecha la propiedad que tiene la radiación de ionizar y excitar el medio material por el que atraviesa.

¿Para qué se utiliza la radiactividad?

La utilidad que brindan los radioisótopos depende del tipo de radiación que emiten y de la energía de ésta; hasta ahora, los radioisótopos se han aplicado principalmente como fuentes intensas de energía y trazadores. Ejemplos de sus aplicaciones como fuentes de energía los encontramos en la esterilización de material de polietileno, que no puede ser esterilizado con calor en las radiografías industriales, y en el campo de la medicina nuclear, donde una de las más conocidas es la utilización de la radiación que emite el cobalto 60 para destruir tumores cancerosos. Como ya se mencionó, los radioisótopos de un elemento son idénticos a los isótopos estables del mismo, por lo que, en general, químicamente es imposible diferenciar un átomo radiactivo de otro que no lo es. Debido a esto, se les ha encontrado múltiples aplicaciones como trazadores en la industria, en la medicina, en la agricultura y en varios campos de la investigación científica. Estas aplicaciones se basan en la posibilidad de detectar fácilmente la radiación emitida por una cantidad muy pequeña de un isótopo radiactivo, arrastrado por el isótopo inerte del mismo elemento, permitiendo así fijar la trayectoria de este último en determinado proceso químico, físico o biológico. Una molécula de hemoglobina marcada con un

átomo de hierro radiactivo sigue siendo hemoglobina y los procesos orgánicos la afectan de la misma forma que a otra no radiactiva y se puede seguir su comportamiento en el organismo, cualquiera que sea su recorrido por medio de un detector de radiactividad. Un segundo ejemplo es el estudio de la acción de los fertilizantes en las plantas con la ayuda del fósforo 32 radiactivo, que permite identificar la parte de la planta que aprovecha este elemento.

¿Quién maneja la radiactividad?

Las principales diferencias prácticas entre isótopos radiactivos y estables aparecen en los métodos operacionales, esto es, en la forma de manejar y utilizar los radioisótopos y en las propiedades físicas de los mismos. Dichos métodos adquieren mayor importancia mientras mayor sea la radiactividad que se maneja. Debido a la complejidad de estos métodos, el manejo y la utilización de la radiactividad deben llevarlos a cabo químicos, físicos y otros profesionistas adecuadamente capacitados.

Hemos descrito algunas de las aplicaciones de los radioisótopos y hay muchísimas otras muy importantes, desde el punto de vista científico y económico, que por razones de espacio no hemos mencionado. En el futuro, aumentarán en gran medida las sustancias radiactivas que deban manejarse; esto sugiere que un país como México, donde el personal preparado en este campo es muy escaso, debe dedicar una parte importante de sus recursos económicos y humanos para el estudio y desarrollo de las ciencias y las técnicas relacionadas con la radiactividad en sus diferentes usos y aplicaciones.

• Tres formas de emisión radioactiva

Existen tres formas de emisión radioactiva: las partículas α , que son núcleos de helio y están formadas por dos protones y dos neutrones, agrupación muy estable que es emitida desde el núcleo a muy alta velocidad; las partículas β , formadas por electrones de velocidades próximas a la de la luz, y los rayos γ , que son ondas electromagnéticas de elevada energía.

Las partículas α son las menos penetrantes de los tres tipos de radiación, y normalmente no llegan a atravesar una hoja de papel. Pero son altamente ionizantes, debido a su doble carga positiva.

Las partículas β (electrones) sufren una enorme cantidad de desviaciones al atravesar la materia, por su masa casi despreciable y la elevada densidad de cargas negativas con las que se enfrentan. También tienen baja penetración.

Los rayos γ , en cambio, son muy penetrantes ya que se trata de radiación electromagnética de alta energía, y atraviesan totalmente el cuerpo humano. En ciertos casos llegan a ser mortales, tienen la propiedad de destruir células cancerosas.

• Estudio de la cámara de niebla

Este instrumento, de enorme valía para los estudios de los físicos llevaban a cabo en las investigaciones atómicas, fue creado por Wilson en 1911, por lo que también se lo conoce como cámara de Wilson; su importancia estriba en que con él pueden detectarse en forma visual las partículas cargadas eléctricamente (así como el contador Geiger permite detectar radiaciones mediante sonido).

La cámara de niebla es un recipiente con agua, y parte de ella se hace evaporar bajo control de temperatura, hasta que el aire dentro de la cámara queda saturado con vapor de agua.

Luego se provoca un brusco enfriamiento, con lo cual el vapor condensa en gotitas microscópicas que constituyen una densa niebla en toda la cámara.

Si en el interior de la cámara existen partículas de polvo, o incluso partículas mucho más pequeñas como las atómicas (pero con carga eléctrica), la niebla empieza a formarse primero en esos puntos, pues actúan como centros de nucleación (algo semejante sucede cuando se inicia la ebullición de un líquido).

Por lo tanto, el procedimiento consiste en producir el enfriamiento brusco, y antes que se forme la niebla general (que no dejaría ver lo que ocurre en el interior) se hace penetrar en la cámara el haz que se quiere estudiar.

Este haz ioniza a los átomos sobre los que incide, y entonces los iones formados actúan como centros de nucleación debido a su carga eléctrica. Como resultado, aparece una estela de niebla que coincide exactamente con la trayectoria seguida por el haz; fotografiando esta franja de niebla, queda registrado el trazo seguido por el haz dentro de la cámara.

De esta forma indirecta, puede visualizarse el camino seguido por un haz de partículas α , o por una radiación de alta energía como los rayos γ .

• Ecuaciones Nucleares. Explicar

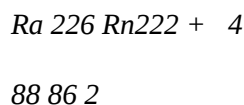
La física moderna emplea cierto tipo de ecuaciones para describir los procesos de transformación que ocurren en el interior de los núcleos atómicos.

Junto al símbolo del elemento químico que se transforma por radiactividad (se dice que se desintegra), se escriben dos números que son fundamentales: abajo y a la izquierda, el número atómico Z (cantidad de protones), arriba a la derecha, el número másico A (suma de protones y neutrones nucleares).

Por otra parte, y como sucede en una ecuación química común, los dos miembros de la ecuación nuclear deben estar igualados; sin embargo, en las reacciones químicas comunes la igualación involucra solamente las masas, que deben mantenerse constantes según el Principio de Conservación de la Masa.

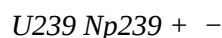
En cambio, en las reacciones nucleares pueden modificarse las masas, las cargas y la energía, de tal forma que deben tenerse en cuenta los tres principios de conservación: el de la masa, el de la carga y el de la energía.

Así por ejemplo, el elemento radio se transforma espontáneamente en el gas inerte radón, emitiendo una partícula α ; esta reacción nuclear de desintegración espontánea queda representada por la ecuación:



lo que significa que un átomo de radio, con 88 protones e inestable, expulsa de su núcleo una partícula (con lo cual se van del átomo dos protones y dos neutrones) y el radio se ha transmutado en radón, que es el elemento 86, ya que sus átomos tienen 86 protones (*).

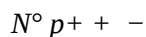
Un ejemplo de desintegración por emisión α es la de uno de los isótopos radioactivos del uranio, el U^{239} , que se transforma en el elemento neptunio:



• 93

En este caso la masa no altera, porque las 239 partículas nucleares siguen formando parte del nuevo átomo.

Solo se modifica la carga eléctrica, debido a que un neutrón se ha transformado en protón dentro del núcleo (esto es típico de la emisión β^-), lo que se puede escribir como:

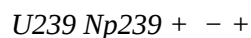


Y el electrón formado es expulsado instantáneamente del núcleo, ya que no puede permanecer allí por razones claramente explicables mediante la Mecánica Cuántica.

El cumplimiento de la conservación de la energía no se advierte en la ecuación misma, pero si en las comprobaciones experimentales.

Cuando esto no se verifica directamente, es preciso postular la existencia de una partícula muy difícil de detectar, porque no tiene masa ni carga eléctrica, pero cuya realidad no ha sido probada hace más de 20 años; el Neutrino, que debe su nombre al eminente físico Enrico Fermi (en italiano, neutrino significa Neutroncito).

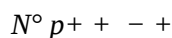
Este es el responsable de la energía faltante, en general cuando se emite una partícula β^- , de modo que la ecuación de desintegración para el U 239 debe escribirse, con mayor rigor, en la forma:



• 93

donde el símbolo $\bar{\nu}$ identifica al neutrino.

Por lo tanto la conversión de un neutrón en protón responde, en realidad, a la ecuación:



Y este neutrino es expulsado del núcleo del U239, al transmutarse en neptunio

• Semiconductores

La invención de los semiconductores en la primera mitad del siglo XX abrió en la

técnica industrial la fase de la miniaturización que permitió reproducir los aparatos eléctricos de grandes dimensiones en reducidos dispositivos electrónicos.

Los semiconductores son materiales con una capacidad de conducción intermedia entre los conductores y los aisladores de la electricidad.

La existencia del fenómeno de la semiconductividad se explica mediante consideraciones de la física cuántica. Los electrones, partículas elementales de signo eléctrico negativo responsables de la conductividad eléctrica, se encuentran en las sustancias semiconductoras en dos estados posibles de energía: a temperaturas bajas, se distribuyen en las llamadas bandas de valencia, en las que se hallan fuertemente ligados a los átomos

y observan un comportamiento aislador; al incrementar la temperatura, algunos electrones

alcanzan la denominada banda de conductividad, en la que conducen la electricidad. Entre ambas bandas existe un intervalo de energías prohibido para los estados electrónicos que actúa como filtro de valencias; de esta manera, los materiales semiconductores desempeñan funciones idénticas a las lámparas triodo utilizadas

en los

aparatos de radio, selectores de corriente en función de la temperatura.

Los elementos naturalmente semiconductores son el silicio y el germanio, además de otros que presentan propiedades similares de menor intensidad como el galio, el indio, el selenio, etc.

Los electrones de la banda de conductividad se denominan portadores n, y los de la banda de valencia, de tipo p. La unión de semiconductores p-n constituye un diodo, mientras que el modelo p-n-p forma un triodo base en la fabricación de transistores que,

debida a los estadounidenses John Bardeen y Walter Brattain en 1948, revolucionó la tecnología electrónica.

• Transistores

Son elementos de circuitos basados en semiconductores, que permiten amplificar la corriente, y su empleo es ya muy conocido en radios, televisores y muchos otros equipos (circuitos transistorizados).

La ventaja del Transistor sobre las antiguas válvulas es que no requiere tiempo de calentamiento para entrar en régimen de funcionamiento (por eso estos circuitos son de encendido instantáneo), y además ocupan un espacio mucho menor y tienen larga duración.

En el mundo moderno de la electrónica, El transistor es un elemento imprescindible como componente de un circuito.