

Unidad 4: **CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA** **INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA MODERNA**

INTRODUCCIÓN .-

En esta unidad estudiaremos algunos fenómenos no explicables en el marco de la teoría clásica, como son:

- la radiación de un cuerpo negro (catástrofe ultravioleta)
- el efecto fotoeléctrico
- el carácter discontinuo de los espectros atómicos
- el efecto Compton

Así como los nuevos conceptos para explicar dichos fenómenos:

- Hipótesis de Planck: cuantización de la energía
- Teoría de Eistein del efecto fotoeléctrico: concepto de fotón (aspecto corpuscular de la radiación)
- Espectros discontinuos: niveles de energía de los átomos

También desarrollaremos algunos aspectos sobre el comportamiento cuántico de las partículas y el carácter estadístico de la física cuántica:

- Hipótesis de De Broglie (aspecto ondulatorio de la materia)
- Dualidad onda-copúsculo (superación de la dicotomía partícula-onda característica de la física clásica.
- Principio de incertidumbre de Heinsenberg
- Determinismo y probabilidad
- Dominio de validez de la física clásica

Por último, estudiaremos la Física nuclear como aplicación de la Física moderna:

- Radiactividad
- Interacciones nucleares
- Partículas elementales.
- Aplicaciones y riesgos de la fisión y fusión nuclear

TEMA 1. **ELEMENTOS DE FÍSICA CUÁNTICA**

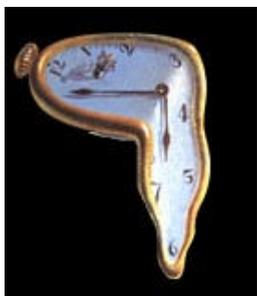
1.1. INSUFICIENCIA DE LA FÍSICA CLÁSICA

Durante mas de 200 años desde los días de Newton, hasta el final de del siglo XIX, los físicos habían construido una visión del mundo increíblemente elaborada y básicamente mecánica. El universo entero se suponía que trabajaba como un gigantesco reloj, en cuyo interior se podía conocer y predecir hasta el mas mínimo detalle de funcionamiento. Por medio de las leyes de la gravedad, del calor, de la luz y el magnetismo, de los gases, los fluidos y los sólidos; cada aspecto del mundo material podía ser en principio parte de un vasto mecanismo lógico. Cada causa física, generaba algún efecto predecible, cada efecto observado podía ser rastreado a una única y precisa causa. La tarea de los físicos era justamente rastrear esas articulaciones entre causa y efecto, de manera de poder hacer que el pasado fuera entendible y el futuro predecible, la acumulación del conocimiento teórico-experimental se tomaba sin discusión para brindar una visión coherente



del universo aun con un enfoque mas agudo y preciso. Cada nueva pieza de conocimiento agregaba otro engranaje al reloj del universo. Esta era la

situación a final del siglo XIX, los físicos clásicos aspiraban a explicar con una claridad cada vez más precisa hasta el ultimo confín de este universo mecánico. ***Surge la corriente determinista.***



A finales del s XIX y primeros del XX se producen una serie de descubrimientos que ponen de manifiesto la insuficiencia de la física clásica cuando se aplican al mundo de lo muy pequeño o de lo muy grande, al átomo y al Universo. En el primer caso la física “determinista” clásica se sustituye por la teoría cuántica (de estudio estadístico y probabilístico); en el segundo, la mecánica newtoniana es sustituida por la teoría especial de la relatividad.

Durante siglos nuestro conocimiento adquirido se fundamentaba en la premisa básica que nos habla de la existencia de una realidad externa objetiva y definida, independientemente de cuan poco o mucho conozcamos de ella. Es difícil encontrar el lenguaje o los conceptos para manejar una idea de realidad que solo llega a materializarse en algo real (valga la redundancia) cuando es medida, es decir cuando es observada. La luz es una partícula cuando colocamos detectores para medir la llegada de partículas, de lo contrario, la luz sufre interferencias, refracción y difracción como su comportamiento ondulatorio así lo determina.

Notemos otra diferencia crucial entre ambas físicas, el *principio de incertidumbre*, que solo existe en la cuántica. Este principio que dice que *no podemos conocer simultáneamente dos variables complementarias como la velocidad y la posición de una partícula*. Para los clásicos si medimos una propiedad intrínseca de una partícula, una vez realizada dicha medición, sabremos con exactitud el estado de dicha partícula y podríamos predecir el resultado de cualquier medición futura. Para los cuánticos, el acto de medición es un evento donde interactúan el que mide/observador y lo que es medido/observado para conjuntamente producir un resultado. El proceso de medición no significa determinar el valor de una propiedad física pre-existente. El principio de incertidumbre esta íntimamente ligado a la naturaleza probabilística de las mediciones cuánticas, esto significa que la mecánica cuántica predice acerca de la probabilidad de obtener tal o cual resultado, pero nunca puede con certeza decir en un caso individual que es lo que va a ocurrir.

Avancemos un poco mas en este tema de los comportamientos probabilísticos. Si arrojamos una moneda al aire diremos que las posibilidades de obtener cara o cruz serán de un 50 %. Si tuviéramos un mecanismo perfecto de observación, podríamos predecir cada vez que arrojamos las moneda cual será el resultado (si cara o cruz). Podemos decir entonces que el concepto de probabilidad aquí esta cubriendo nuestra ignorancia en la medición por no contar con un mecanismo perfecto.

En física cuántica el concepto probabilístico es diferente. La probabilidad no cubre falta de información sino que es una característica intrínseca de la naturaleza. Ej: un fotón dentro de un haz de luz, tiene cierta probabilidad de pasar el vidrio o de reflejarse en el, sin ninguna explicación racional de porque algunos pasan y otros se reflejan, cuando todos provienen de la misma fuente y forman parte del mismo haz en las mismas condiciones. Bien esto que Einstein nunca acepto, parecería ser como la naturaleza se comporta a nivel micro sin importar si podemos entenderlo o no.

1.2 FENÓMENOS QUE EXPLICAN DICHA INSUFICIENCIA

a) La radiación de un cuerpo negro (catástrofe ultravioleta). Hipótesis de Planck: cuantización de la energía

- * La Luz y la Radiación Térmica son en realidad la misma cosa.
- * Una chimenea emite además de Luz, rayos infrarrojos que crean la sensación de calor.
- * Las leyes fundamentales de la radiación térmica son:
 - Cuanto más intensamente se calienta un objeto la intensidad del brillo es mayor.
 - A medida que se calienta el objeto, el color de la Luz emitida varía del rojo al blanco. Por ejemplo cuando se calienta un trozo de metal al rojo vivo o aún más.

color	Temperatura
rojo carmesi	$\approx 500^{\circ} \text{C}$
amarillo	$\approx 800^{\circ} \text{C}$
blanco claro	$> 1000^{\circ} \text{C}$

Un enigma que los clásicos no podían explicar fue el punto de partida para esta nueva física denominada cuántica, y el científico que intentó dar explicaciones fue Max Planck al inicio del siglo XX. Los físicos en esa época ya sabían que la energía calorífica de las sustancias materiales era una manifestación del movimiento atómico interno, o sea que cuanto más rápido los átomos que componen el cuerpo material se estaban moviendo, el cuerpo en cuestión está más caliente. La temperatura es la medida de la energía calorífica del cuerpo, indica la velocidad promedio de los átomos: más rápido significa más caliente.

Los físicos también sabían que la radiación u ondas electromagnéticas- las ondas infrarrojas que irradian calor son una clase de estas- transportan energía.

Imaginemos ahora una caja vacía de cierto material a la que se calienta hasta una determinada temperatura, el material tendrá la misma temperatura que el interior de la caja dado que se está manteniendo un estado de equilibrio. Es decir la energía del material que compone la caja está en equilibrio con la energía en el interior de la caja, recordemos aquí que la energía en el material se encuentra en el movimiento de los átomos, mientras que la energía dentro de la caja vacía se encuentra en las ondas electromagnéticas internas. Si existiera mayor cantidad de energía en las paredes, esta se transmitiría al interior incrementando la intensidad de radiación electromagnética dentro de la caja, lo inverso también sería cierto. El equilibrio energético significa que la caja material y las ondas en el interior deben tener una cantidad de energía comparable, la cual estará caracterizada por la misma temperatura.

El problema era este: a pesar de que los físicos sabían cómo calcular la energía portada por una onda electromagnética, no podían deducir cómo calcular una temperatura que tuviera significado para la mezcla de ondas electromagnéticas que llenaban la caja. ¿Por qué?. Esto es lo que les pasaba; en primer lugar deducían que las ondas electromagnéticas en el interior de la caja no podrían tener cualquier longitud de onda. Veamos esto con una analogía musical.

Tal como ocurre cuando vibra la cuerda de un violín o una guitarra, la onda tiene que entrar en el espacio en el cual está vibrando, la onda abarca toda la cuerda. La frecuencia espacial más baja en la cuerda del violín se da con la longitud de onda más larga. Imaginemos que estiramos la cuerda hacia arriba, entonces se producirá un movimiento en toda su longitud hacia ambos lados, mientras que los extremos están fijos, tendremos media

longitud de onda en la longitud de la cuerda. La frecuencia espacial siguiente

ocurre cuando la cuerda forma dos medias longitudes de onda (es lo mismo que una entera) que abarcan la totalidad de la cuerda, esto es una mitad se mueve hacia un lado y la otra mitad hacia el otro, permaneciendo los extremos fijos y un punto o nodo en el medio también sin desplazarse de su posición de equilibrio. Así siguiendo, podemos tener frecuencias mas alta con dos longitudes de onda, tres, cuatro, cinco, etc.

En forma similar, las ondas electromagnéticas en la caja, comenzaran vibrando con frecuencias espaciales bajas para luego ir en aumento, siempre con la misma restricción de que deben entrar en el espacio de la caja longitudes de onda tales que los extremos de la caja sean nodos de dichas ondas. Así tendremos longitudes enteras o fracciones de las mitades, $1/2$, $3/2$, $5/2$, etc. enteras, con los puntos límites de la caja como fijos, y los nodos intermedios también fijos. Cada nodo es aquel punto donde no hay desplazamiento de la onda respecto de su posición de equilibrio.

Sabemos por la teoría de las ondas electromagnéticas, que cualquier onda es portadora de energía, la cual es proporcional a la frecuencia y a la amplitud de la onda.

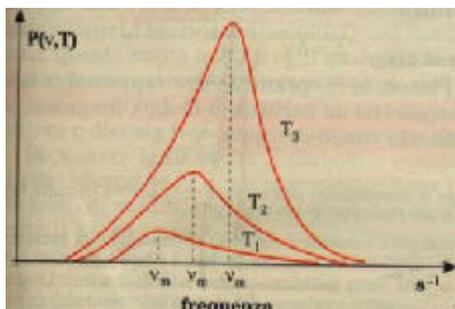
Concentrémonos ahora en el núcleo del problema ¿Cuántas ondas pueden entrar en la caja? Si bien las mismas tienen la restricción que se mencionó antes, nada impide que haya millones de ondas, a partir de lo que los músicos denominan el tono fundamental que es la de mas baja frecuencia; desde esta hacia arriba tenemos un infinito número de ondas o armónicas, Esto significa que dentro de la caja tendríamos infinitas ondas todas ellas portando una porción de la energía total; y aquí estaba el problema. En la parte material de la caja o cuerpo negro, la energía calórica es equivalente al movimiento de los átomos que componen el cuerpo, los cuales son muchos pero un número finito. De esta manera una cantidad fija de energía está repartida entre todos estos átomos; algunos se moverán mas rápidamente otros mas lentamente, pero existirá o se podrá calcular un promedio por átomo, y este promedio es el que define la temperatura de la caja o cuerpo. Si le entregamos mas energía, habrá mas para compartir entre los átomos, por lo que en promedio estos se moverán mas rápidamente y por lo tanto la temperatura del cuerpo aumentará.

Pero este razonamiento simple no puede trasladarse al interior de la caja, a la zona de las ondas electromagnéticas dado que aquí hay un número infinito de ellas. ¿Cómo puede dividirse una cantidad finita de energía entre una cantidad infinita de portadores de dicha energía? Al no saber como resolver esto tampoco se podía entonces calcular un valor para la temperatura que tuviera sentido, considerando que esta es una medida de la energía promedio por onda. Básicamente al haber infinitas ondas, la sumatoria de la energía que estas lleven también debería ser infinita, el cuerpo debería irradiar estas ondas de altísima frecuencia mas allá de la radiación ultravioleta, dado que son estas ondas del espectro las portadoras de mayor cantidad de energía, cosa que los físicos experimentales comprobaban que no ocurría. Por esta razón a este problema se lo conocía también como la **catástrofe ultravioleta**. Experimentos realizados calentando objetos con espacios internos vacíos, a los que se les practicaba un pequeño orificio, permitían observar el tipo de radiaciones- ondas electromagnéticas que había en el interior del cuerpo -. A medida que se aumentaba la temperatura, la luz irradiada pasaba desde un anaranjado, hacia el rojo, amarillo, azul. Este ascenso a través del espectro luminoso demostraba simplemente un ascenso de la frecuencia de las ondas electromagnéticas. La naturaleza dividía la energía de manera tal que a una temperatura determinada, el grueso de la energía se concentra en ondas de frecuencias proporcionales a la temperatura. Por eso decimos que una llama azul es mas caliente que una llama anaranjada.

En física, se conoce como **cuerpo negro** aquel que es capaz de absorber todas las radiaciones que llegan a él y, por tanto, de emitir todas las longitudes de onda. Aunque no se conoce ningún cuerpo que se comporte rigurosamente como “negro”, se puede considerar como tal cualquier material resistente al calor que contenga una cavidad, con paredes rugosas y muy absorbentes, comunicada con el exterior con un pequeño

orificio. La radiación que penetre quedará absorbida bien directamente o después de experimentar varias reflexiones en las paredes.

La radiación de un cuerpo negro sigue las siguientes leyes experimentales:



* **Ley de Wien** .- La longitud de onda, para la cual la intensidad emitida es máxima, disminuye al aumentar la temperatura.

$$\lambda_{m\acute{a}x} \cdot T = 2.9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$

* **Ley de Stefan-Boltzmann**.- La energía total emitida por un cuerpo negro, por unidad de superficie y unidad de tiempo, a una temperatura determinada, es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

$$E_{total} = s \cdot T^4$$

siendo s la constante de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es $s = 5.56 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Hipótesis de Planck.- Fue Planck quien encontró la salida a este dilema de la física teórica. Él se preguntó lo siguiente: ¿Qué pasaría si cada onda electromagnética, no pudiera portar cualquier cantidad arbitraria de energía sino que sólo pudiera transportar energía por encima de un mínimo? Ese mínimo también dijo, debería ser proporcional a la frecuencia de la onda. Esto significará que para ondas electromagnéticas de alta frecuencia, este mínimo sería muy grande; por lo que si por este hecho de ser tan grande, superara la cantidad de energía disponible en el experimento del cuerpo negro, las ondas de alta frecuencia directamente no aparecerán. En 1900 Planck afirmó que *la energía emitida por un cuerpo negro no es continua sino discontinua. Cada onda electromagnética puede portar energía solo en múltiplos de un valor mínimo o básico, o sea que la energía en una onda electromagnética es un número entero multiplicado por este básico, que es el denominado cuanto de energía, de allí la denominación de esta física como cuántica. El valor del cuanto resulta de multiplicar a la frecuencia de la onda por una constante muy pequeña denominada constante de Planck:*

$$E = h \cdot f. \quad h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

¿Cómo es que se resolvía el problema de la radiación del cuerpo negro o la catástrofe ultravioleta? Simplemente porque como dijimos antes, para las ondas de alta frecuencia el mínimo básico de energía o cuanto es tan grande que excede la cantidad total de energía en la caja, por eso nunca aparecen. Mientras que las de frecuencia baja, al ser poca cantidad, en conjunto no portan mucha energía, por lo que el grueso de la energía se concentrará en un conjunto de ondas de frecuencias intermedias, de allí que el color de la radiación será uno que predomina, y a medida que hay más energía para compartir, harán entrada ondas de mayores frecuencias, por eso el color se va corriendo hacia el azul (ondas de mayor frecuencia) cuando aumenta la temperatura de calentamiento (la entrega de energía). Lo que Planck logra con este concepto de cuantizar la cantidad de energía y no permitir menos de ese mínimo, es que el número de ondas dentro de la caja ahora se transforme en una cantidad finita, pudiéndose así dividir la energía total entre un número finito de ondas, siendo la temperatura de la radiación, una medida con sentido de esta energía promedio por onda. La idea de Planck de crear una unidad de energía mínima, un cuanto o paquete de energía era un concepto totalmente novedoso en la física que hasta ese momento solo hablaba de valores continuos. Así nace el fotón, como una partícula de luz.

b) El efecto fotoeléctrico. Teoría de Einstein del efecto fotoeléctrico: concepto de fotón (aspecto corpuscular de la radiación)

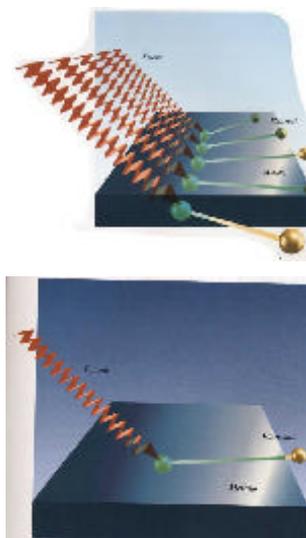
El significado de la solución muy ingeniosa que aportó Planck, era controvertido. Planck mismo no quería creer que la radiación electromagnética estuviera restringida de esta manera que el proponía, y esperaba poder encontrar algo dentro de la física clásica que no hubiera sido analizado a fondo, que le permitiera explicar porqué las ondas debían transportar energía solo en cantidades discretas, múltiplos de un mínimo. A Planck no le gustaban las implicaciones de lo que él mismo había lanzado, poniéndolo en perspectiva de hoy, Planck no consideraba que hubiera abierto la puerta a una nueva física, totalmente revolucionaria. El nunca le atribuyó a estos pequeños paquetes de energía una significación que fuera mas allá de un artificio matemático, es decir para él los cuantos no tenían una significación física genuina.

Desde un punto de vista filosófico los físicos podían discutir eternamente acerca de los fotones, ¿eran reales? o ¿eran construcciones matemáticas que escondían algún principio físico desconocido?. A medida que el tiempo transcurría, comenzó a ser aparente que los resultados de ciertos experimentos, eran mas fácilmente entendidos si se partía de la premisa que los fotones eran una entidad física genuina, es decir reales.

El primero de estos fenómenos es el denominado **efecto fotoeléctrico**. Ciertos materiales emiten electrones cuando son iluminados por una luz. La razón por la que los metales conducen electricidad, es que algunos de los electrones más superficiales del elemento químico componente están libres de moverse a través de todo el material conductor, saltando desde un átomo hacia otro del metal conductor. Es un hecho ya establecido que los electrones en los llamados metales – que son conductores- no están firmemente ligados como lo están en otras sustancias. Por lo tanto si arrojamos energía de una forma u otra, a un metal podríamos golpear electrones y sacarlos, pero existen un par de detalles del efecto fotoeléctrico que elude explicaciones sencillas. Los físicos experimentales habían descubierto que para poder liberar electrones de la superficie de un metal específico, la luz que le “llueve” sobre la misma debía tener una frecuencia mínima, la cual dependía del metal en cuestión. Esto significa que para liberar electrones del sodio se necesita luz verde, mientras que para liberar electrones del cobre o el aluminio se necesita una luz con mayor energía como la ultravioleta, que es de mayor frecuencia. No solo esto, se detectó también que una vez que comenzaba la liberación de electrones, al aumentar la intensidad de la luz, se incrementa la cantidad de electrones liberados pero no la energía de los mismos; mientras que si se aumenta la frecuencia de la luz, pero no su intensidad, con que se irradia el metal, se continúan liberando la misma cantidad de electrones en el tiempo pero con una energía en cada uno de ellos superior a la de la situación anterior.

El estudio cuantitativo del efecto fotoeléctrico conduce a las siguientes conclusiones experimentales:

1. Para cada metal existe un frecuencia mínima (**frecuencia umbral**) por debajo de la cual no se produce el efecto fotoeléctrico, independientemente de la radiación luminosa.
2. Si la frecuencia de la luz incidente es mayor que la frecuencia umbral, la intensidad de la corriente

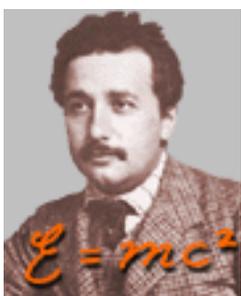


fotoeléctrica es proporcional a la intensidad de radiación.

3. La emisión de electrones es prácticamente instantánea. Se produce en un intervalo de tiempo del orden de 10^{-9} segundos a partir de la incidencia de la luz.

4. La energía cinética de los electrones aumenta al hacerlo la frecuencia de la luz.

Estos hechos eran difíciles de entender usando la teoría ondulatoria de la luz, en la cual la energía que porta una onda es un producto de su frecuencia y su intensidad: así radiaciones de baja frecuencia y alta intensidad serían similares en términos de energía entregada a la superficie del metal en el efecto fotoeléctrico que si lo irradiáramos con radiación de alta frecuencia y baja intensidad. Es decir no habría una explicación razonable desde el punto de vista de la teoría ondulatoria, porque la frecuencia y la intensidad de la luz irradiada muestra efectos tan diferentes a los esperados.



Pero fue Einstein - en 1905-, aun siendo joven, quien explicó el efecto fotoeléctrico de forma muy sencilla (**Teoría de Einstein**), considerando a la luz en su comportamiento corpuscular. Imaginemos ahora que un fotón – la luz como una partícula- golpea en el metal y tiene que sacar a un electrón. Si este está unido a la estructura del metal con cierta fuerza atractiva – como un imán- se necesitará una mínima cantidad de energía para despegarlo. Dado que los fotones llevan energía en forma proporcional a su frecuencia- $E=h\cdot f$ -, la frecuencia de este fotón deberá tener un valor mínimo para que así la energía que porta sea superior a la que está uniendo al electrón a la superficie del metal. Dos fotones de menor frecuencia que la requerida

podrían liberar a un electrón de su prisión siempre y cuando los dos chocaran a este uno atrás del otro, cosa que es bastante poco probable. Esto explica entonces porqué la luz tiene que tener una frecuencia determinada para lograr sacar electrones de los metales. Dado que los átomos que componen los diferentes metales tienen diferentes propiedades, significa que la energía de unión de los electrones externos será una característica propia de dicho elemento, por eso vimos que los resultados experimentales muestran que se necesita diferente tipo de luz (diferente frecuencia) para expulsar electrones de diferentes metales.

Elevando la intensidad del rayo de luz con el que estamos bombardeando el metal, significa que estamos enviando mayor cantidad de fotones. Cada uno de los fotones, si son de la frecuencia adecuada, estarán haciendo saltar electrones a una velocidad determinada dada por la energía que le transmiten; al ser mas los fotones, lo que mediremos será mayor cantidad de electrones expulsados pero no una variación de la energía de cada uno de ellos. Mientras que si elevamos la frecuencia pero mantenemos la intensidad, dado que la cantidad de fotones con que bombardeamos no cambia, los electrones expulsados tampoco cambiarán, lo que sí notaremos es que los electrones que salen tendrán mayor velocidad dado que se les ha transmitido mayor energía.

La teoría corpuscular de la luz, la de los fotones como partículas reales de energía proporcional a la frecuencia, explica muy simplemente hechos experimentales donde la teoría ondulatoria de la luz falla. Einstein recibió en 1921 el premio Nobel por este trabajo.

*Una placa de zinc recién pulida, cargada negativamente, pierde su carga si se la expone a la luz ultravioleta. Este fenómeno se llama **efecto fotoeléctrico**.*

Investigaciones cuidadosas, hacia finales del siglo diecinueve, prueban que el efecto fotoeléctrico

sucede también con otros materiales, pero sólo si la longitud de onda es suficientemente pequeña. El efecto fotoeléctrico se observa por debajo de algún umbral de longitud de onda que es específica del material. El hecho de que la luz de longitud de onda elevada no tuviera ningún efecto, incluso si es extremadamente intensa, aparecía como algo especialmente misterioso para los científicos.

Finalmente Albert Einstein dió la explicación en 1905: La luz está constituida por partículas (fotones), y la energía de tales partículas es proporcional a la frecuencia de la luz. Existe una cierta cantidad mínima de energía (dependiendo del material) que es necesaria para extraer un electrón de la superficie de una placa de zinc u otro cuerpo sólido (función trabajo). Si la energía del fotón es mayor que este valor el electrón puede ser emitido. De esta explicación obtenemos la siguiente expresión:

$$E_{cin} = hf - W$$

E_{cin} ... energía cinética máxima de un electrón emitido

h constante de Planck (6.626×10^{-34} Js)

f frecuencia

W función trabajo

Simulación

c) El carácter discontinuo de los espectros atómicos

d) Efecto Compton

Una demostración más directa de los fotones actuando como partículas, vino del físico Compton en el año 1922.

El fenómeno en pocas palabras era el siguiente: los rayos X cuando rebotaban en superficies de cristales,

salían irradiados con una longitud de onda mayor, lo cual es lo mismo que

una frecuencia menor. Lo que se había observado es que cuando con los

rayos X (que son una radiación electromagnética de alta frecuencia), se

bombardean ciertos cristales, estos rayos cambiaban su longitud de onda,

dependiendo del ángulo de reflexión, medido entre la dirección cuando

chocan contra el cristal y la dirección cuando salen rebotados del mismo.

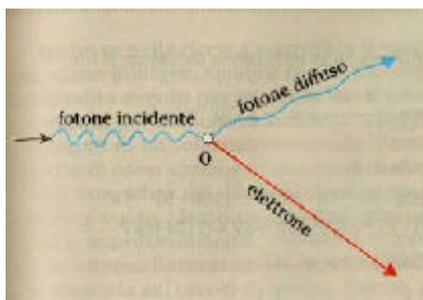
Compton concluyó que este fenómeno se podía entender si se piensa a los

rayos X como fotones individuales, es decir como pequeñas bolas de billar

que golpean contra otras como ser los núcleos y los electrones del elemento

que compone al cristal. La energía del fotón que cambia en la colisión, significa de acuerdo a lo postulado por Planck, un cambio en la frecuencia (un aumento de la longitud de onda). Este cambio es fácilmente medido y corrobora la idea de que la energía es proporcional a la frecuencia. Con la teoría ondulatoria de la luz, no existían razones que pudieran explicar porqué hay un cambio de frecuencia en la interacción entre ciertas radiaciones electromagnéticas y la materia (los electrones que la componen). Por este trabajo Compton también recibió el premio Nobel en 1927.

Vemos así a partir de estos fenómenos que la luz puede entenderse como pequeños paquetes de energía a los que denominamos fotones. Pero también sabemos que la luz tiene propiedades de onda. En definitiva: ¿es una partícula o es una onda?... es una onda y una partícula!!.



1.3 MECÁNICA CUÁNTICA. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

La Mecánica Cuántica No Relativista tiene como principales hipótesis definidoras la *cuantización de la partícula material mínima* y el *valor infinito* para la velocidad máxima de propagación de las interacciones.

La primera hipótesis, la cuantización, elimina el determinismo propio de la mecánica clásica. La mecánica cuántica es indeterminista, y la indeterminación se manifiesta esencialmente en la ausencia de trayectoria definida para una partícula sometida a interacciones externas.

La hipótesis cuántica es, pues, la hipótesis que afirma que la cantidad mínima de materia está cuantificada; que existe una partícula material mínima, no siendo posible una porción menor. Toda partícula material, por muy pequeña que fuere, ocupa siempre más de un punto-instante del espacio-tiempo.

Esta hipótesis granular implica que existan valores prohibidos para las medidas cuantitativas de las distribuciones de materia, pues al no existir realmente una fracción de partícula material (ya que está cuantizada) la medida total de la distribución ha de ser múltiplo del cuanto mínimo. Existen, pues, valores prohibidos para la medida de las distribuciones materiales, y, en consecuencia, para la medida de sus magnitudes teóricas (energía, impulso, etc.). Habrá de existir el cuanto mínimo de energía, de impulso, etc., y sus valores para un sistema habrán de ser múltiplos de ese cuanto mínimo.

La cuantización de la materia hace impensable, además, el concepto de trayectoria, que es, por definición, una continuación infinita de punto-instantes del espacio-tiempo. Su existencia está de acuerdo con la hipótesis clásica, pero no con la cuántica. Para una partícula no existirá, pues, trayectoria, en la mecánica cuántica. Por tanto, no se podrá hablar aquí de ecuaciones del movimiento.

Es inmediato que la existencia simultánea de las coordenadas y velocidades generalizadas de una partícula permitirían construir sus ecuaciones de movimiento. Por esto, la no existencia en la mecánica cuántica de trayectoria, ni de estas ecuaciones, hace preciso admitir que las coordenadas y velocidades de una partícula no pueden ser conocidas simultáneamente, a fin de no contradecir la hipótesis cuántica. Este hecho representa también, resumidamente expuesto, el indeterminismo que la cuantización supone en la construcción de la mecánica.

Al no existir trayectoria, la posición de una partícula en un determinado instante no podrá conocerse exactamente, como ocurría en el caso de la hipótesis clásica. En esta mecánica, sólo aproximadamente se determinará la tal posición, teniéndose que recurrir para ello al concepto de probabilidad.

Pero, aunque no existe la trayectoria, es inmediato que toda partícula tiene energía, momento, posición, etc. Esto es, en la mecánica cuántica toda partícula, o sistema de partículas, ha de poseer unas magnitudes teóricas propias (energía, momento, posición, etc.) cuya expresión matemática mecanocuántica coincidirá con la expresión mecanoclásica en cuanto la hipótesis cuántica sea sustituida por la hipótesis continuista o clásica.

La hipótesis cuántica, establecida en la primera mitad del siglo XX con el objeto de construir una mecánica teórica que fuera capaz de explicar con éxito los descubrimientos que la física de la estructura atómica de la materia había hecho recientemente (descubrimientos de Max Planck, del átomo estable de Rutherford, etc.) se desarrolló en una primera formulación (año 1925) por obra de Erwin Schrödinger y Louis de Broglie. La formulación de Schrödinger-De Broglie fue llamada *Formulación Ondulatoria de la Mecánica*. Asignando a cada partícula una función de onda $\Psi(q)$, sería posible describir fenomenológicamente la evolución de la materia.

La mecánica cuántica necesita, para su fundamentación, de la mecánica clásica. Se pretendería definir las magnitudes de la nueva mecánica de modo que al particularizar al continuismo se obtengan las expresiones mecanoclásicas de estas magnitudes. Las definiciones se hacen probabilísticamente, mediante la introducción de una función $\Psi(q)$ tal que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(q)|^2 \cdot dq = 1$$

Siendo $P[q]$ la probabilidad de localización de la partícula en una determinada región del espacio-tiempo

Las leyes de la física clásica son leyes aproximadas de la naturaleza. Son formas límite de las leyes de la física cuántica, que son más generales y más fundamentales.

La mecánica cuántica tiene tres principios fundamentales (que desempeñan un papel análogo a las leyes de Newton en la mecánica clásica) :

a) Hipótesis de De Broglie. Dualidad partícula onda.



Basándose en la extraña naturaleza dual de la luz evidenciada por la radiación del cuerpo negro, y del efecto fotoeléctrico, Louis de Broglie propuso en 1924 que la materia también debería poseer propiedades tanto ondulatorias como corpusculares

Según la hipótesis de De Broglie, cada partícula en movimiento lleva asociada una onda, cuya longitud de onda viene dada por la ecuación:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p}$$

El movimiento de la partícula puede considerarse como el movimiento de un *paquete de ondas*, algo así como la superposición de varias ondas de longitud de onda poco diferentes, cuyas oscilaciones se intensifican al máximo en el punto del espacio ocupado por la partícula.

Cuanto mayor es el momento lineal, menor es la longitud de onda. Para los cuerpos ordinarios la longitud de onda es tan pequeña que no se observa la naturaleza ondulatoria. En cambio, cuando se trata de cuerpo muy pequeños, como electrones, neutrones, etc, la longitud de onda es apreciable.

Para un electrón que adquiere una energía cinética bajo la acción de una diferencia de potencial V se cumple:

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = V \cdot e \qquad m \cdot v = \sqrt{2 \cdot m \cdot V \cdot e} \qquad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot V \cdot e}}$$

Las ondas de materia son tan reales como las ondas luminosas y las del sonido., aunque no sean observables en todos los casos. Como ocurre en las ondas electromagnéticas, los aspectos ondulatorios y de

partícula en movimiento no se pueden observar al mismo tiempo.

b) Principio de Incertidumbre de Heisenberg



El hecho de que cada partícula lleva asociada consigo una onda, impone restricciones en la capacidad para determinar al mismo tiempo su posición y su velocidad (momento de una partícula).

Este principio fue enunciado por W. Heisenberg en 1927.

c) Ecuación de Schrödinger. Función de onda



Uno de los primeros desarrollos de la mecánica cuántica fue llevado a cabo por Erwin Schrödinger en 1925 al deducir la ecuación que obedece la función de onda asociada con una partícula.

Así como las ondas electromagnéticas satisfacen la ecuación de ondas derivada de las ecuaciones de Maxwell del electromagnetismo, la función de onda de De Broglie satisface una ecuación conocida como *Ecuación de Schrödinger*.

<http://fis.linux-chile.org/doc/mcuant/cuant1.html> apuntes relacionados

TEMA 2 FÍSICA NUCLEAR

1.1. INTRODUCCIÓN

Cinco siglos antes de Cristo, los filósofos griegos se preguntaban si la materia podía ser dividida indefinidamente o si llegaría a un punto que tales partículas fueran indivisibles. Es así, como Demócrito formula la teoría de que la materia se compone de partículas indivisibles, a las que llamó átomos (del griego atomos, indivisible).

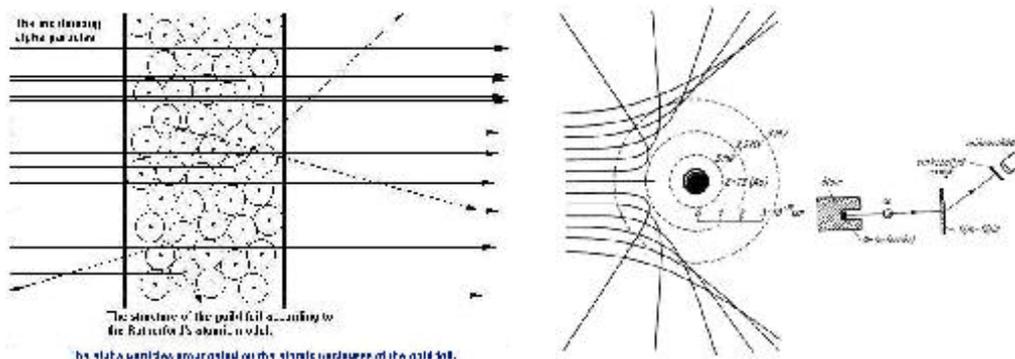
En 1803 el químico inglés John Dalton propone una nueva teoría sobre la constitución de la materia. Según Dalton toda la materia se podía dividir en dos grandes grupos: los elementos y los compuestos. Los elementos estarían constituidos por unidades fundamentales, que en honor a Demócrito, Dalton denominó átomos. Los compuestos se constituirían de moléculas, cuya estructura viene dada por la unión de átomos en proporciones definidas y constantes. La teoría de Dalton seguía considerando el hecho de que los átomos eran partículas indivisibles.

Hacia finales del siglo XIX, se descubrió que los átomos no son indivisibles, pues se componen de varios tipos de partículas elementales. La primera en ser descubierta fue el electrón en el año 1897 por el investigador Sir Joseph Thomson, quien recibió el Premio Nobel de Física en 1906. Posteriormente, Hantaro Nagaoka (1865-1950) durante sus trabajos realizados en Tokio, propone su teoría según la cual los electrones girarían en órbitas alrededor de un cuerpo central cargado positivamente, al igual que los planetas alrededor del Sol. Hoy día sabemos que la carga positiva del átomo se concentra en un denso núcleo muy pequeño, en cuyo alrededor giran los electrones.

2.2. TEORÍA ATÓMICA DE RUTHEFORD. COMPOSICIÓN DEL NUCLEO. ISÓTOPOS



El núcleo del átomo se descubre gracias a los trabajos realizados en la Universidad de Manchester, bajo la dirección de Ernest Rutherford entre los años 1909 a 1911. El experimento utilizado consistía en dirigir un haz de partículas de cierta energía contra una plancha metálica delgada, de las probabilidades que tal barrera desviara la trayectoria de las partículas, se dedujo la distribución de la carga eléctrica al interior de los átomos.



Basado en los resultados de su trabajo que demostró la existencia del núcleo atómico, Rutherford sostiene que casi la totalidad de la masa del átomo se concentra en un núcleo central muy diminuto de carga eléctrica positiva. Los electrones giran alrededor del núcleo describiendo órbitas circulares. Estos poseen una masa muy ínfima y tienen carga eléctrica negativa. La carga eléctrica del núcleo y de los electrones se neutralizan

entre sí, provocando que el átomo sea eléctricamente neutro.

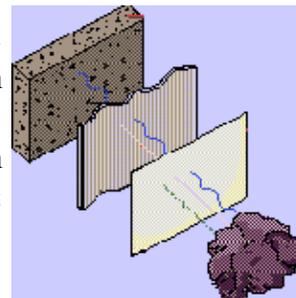
El modelo de Rutherford tuvo que ser abandonado, pues el movimiento de los electrones suponía una

pérdida continua de energía, por lo tanto, el electrón terminaría describiendo órbitas en espiral, precipitándose finalmente hacia el núcleo. Sin embargo, este modelo sirvió de base para el modelo propuesto por su discípulo Neils Bohr, marcando el inicio del estudio del núcleo atómico, por lo que a Rutherford se le conoce como el padre de la era nuclear.

1.2. RADIATIVIDAD

La radiactividad consiste en la emisión de partículas y radiaciones de parte de los átomos de algunos elementos. Son radiactivos aquellos elementos que tienen un número muy elevado de protones y neutrones.

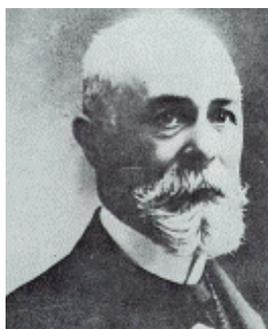
Es la propiedad en virtud de la cual algunos elementos que se encuentran en la naturaleza, como el Uranio, se transforman, por emisión de *partículas alfa* (núcleos de Helio), *beta* (electrones), *gamma* (fotones), en otros elementos nuevos, que pueden ser o no, a su vez, radiactivos.



En el centro de todo átomo hay un núcleo formado por protones y neutrones apretados los unos contra los otros. Cuando su número es muy elevado el núcleo es inestable, y busca la estabilidad mediante la expulsión de algunas partículas. Los procesos que se desarrollan en el interior de un núcleo en busca de su estabilidad determinan la expulsión de partículas alfa, consistente cada una en dos protones y dos neutrones; de partículas beta, que son electrones resultantes de la transformación de un neutrón en un protón, y de rayos gamma, que son radiaciones invisibles y muy penetrantes.

La radiactividad es por tanto, un fenómeno natural al que el hombre ha estado siempre expuesto, aunque también están las radiaciones artificiales. Así pues, diferenciamos dos casos; radiación natural y radiación artificial:

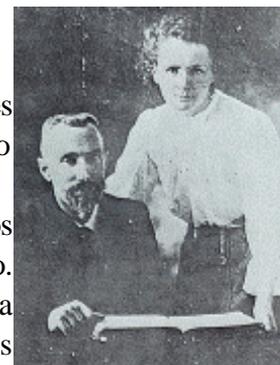
a) Radiactividad Natural.



En Febrero de 1896, el físico francés Henri Becquerel investigando con cuerpos fluorescentes (entre ellos el Sulfato de Uranio y el Potasio), halló una nueva propiedad de la materia a la que posteriormente Marie Curie llamó "Radiactividad". Se descubre que ciertos elementos tenían la propiedad de emitir radiaciones semejantes a los rayos X en forma espontánea. Tal radiación era penetrante y provenía del cristal de Uranio sobre el cual se investigaba.

Marie y Pierre Curie al proseguir los estudios encontraron fuentes de radiación natural bastante más poderosas que el Uranio original, entre estos el Polonio y el Radio.

La radiactividad del elemento no dependía de la naturaleza física o química de los átomos que lo componen, sino que era una propiedad radicada en el interior mismo del átomo. Hoy en día se conocen más de 40 elementos radiactivos naturales, que corresponden a los elementos más pesados. Por arriba del número atómico 83, todos los núcleos



naturales son radiactivos.

Siempre ha existido, ya que procede de las materias existentes en todo el universo, y puede ser radiación visible (como por ejemplo la luz), o invisible (por ejemplo los rayos ultravioleta). Esta radiación, procede de las radiaciones cósmicas del espacio exterior (Sol y estrellas), pues ellos son gigantescos reactores nucleares, aunque lejanos; también proceden estas radiaciones de los elementos naturales radiactivos (uranio, torio, radio) que existen de forma natural en el aire, agua, alimentos, o el propio cuerpo humano (potasio, carbono-14). Esta radiación natural, es del orden del 88% de la radiación total recibida por el ser humano, clasificándose de la siguiente manera:

- Radiación cósmica: 15%
- Radiación de alimentos, bebidas, etc.: 17%
- Radiación de elementos naturales: 56%

b) Radiactividad Artificial.

Al bombardear diversos núcleos atómicos con partículas alfa de gran energía, se pueden transformar en un núcleo diferente, por lo tanto, se transforma en un elemento que no existe en la naturaleza. Los esposos Irene Curie y Frédéric Joliot, experimentando con tales procesos descubren la radiactividad artificial, pues se percatan que al bombardear ciertos núcleos con partículas procedentes de fuentes radiactivas estos se vuelven radiactivos. Si la energía de las partículas es adecuada, entonces puede penetrar en el núcleo generando su inestabilidad y por ende, induciendo su desintegración radiactiva.

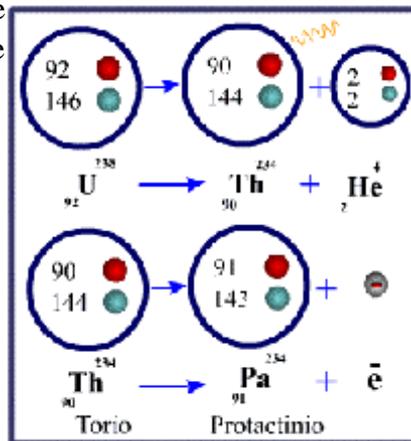
Desde el descubrimiento de los primeros elementos radiactivos artificiales, el hombre ha logrado en el tiempo obtener una gran cantidad de ellos. Es clave en este proceso la aparición de los llamados aceleradores de partículas y de los [reactores nucleares](#). Estos últimos son fuente importante de neutrones que son utilizados para producir gran variedad de radioisótopos.

Transmutación Natural

Cuando un núcleo emite una partícula α o una partícula β , se forma un nuevo elemento. El proceso se denomina Transmutación.

Cuando el átomo expulsa una partícula α , el número de masa resultante es menor en 4 unidades y el número atómico es menor en 2 unidades. El átomo resultante se encuentra dos espacios atrás en la tabla periódica.

Cuando el átomo expulsa una partícula β , no se altera el número de masa y el número atómico aumenta 1 unidad. El átomo resultante se encuentra un sitio adelante en la tabla periódica.



La radiactividad artificial proviene de fuentes creadas por el hombre. Los televisores o los aparatos utilizados para hacer radiografías médicas son las fuentes más comunes de las que recibimos radiación artificial. La generada en las centrales nucleares, pertenece a este grupo. El incremento de radiación que recibe una persona en un año como consecuencia del funcionamiento normal de una central nuclear, es de 1 milirem al año (1 REM = radiación de rayos gamma existentes en el aire por centímetro cúbico de aire), cantidad que es 100 veces más

pequeño que la radiación natural que recibimos en España. La radiación artificial total recibida por el ser humano es del orden del 12% de todas las radiaciones recibidas. Se clasifica de la siguiente manera:

- Televisores y aparatos domésticos: 0.2%
- Centrales nucleares: 0.1%
- Radiografías médicas: 11.7 %

Como es bien sabido, la radiación de los elementos trae serias consecuencias en los seres vivos, si sobrepasan los límites anuales de radiación normal. La consecuencia más importante es la mutación en los seres vivos, ya que afecta a las generaciones tanto presentes, como futuras, y sus efectos irían desde la falta de miembros corporales y malformaciones en fetos, esterilidad, ..., hasta la muerte. Por tanto, es importante que los residuos de las centrales nucleares, que son radiactivos, cumplan unas medidas de seguridad, para que no surjan posibles accidentes de fugas de radiación.

Radiaciones

a) Radiaciones Ionizantes.

Son radiaciones con la [energía](#) necesaria para arrancar electrones de los átomos. Cuando un átomo queda con un exceso de carga eléctrica, ya sea positiva o negativa, se dice que se ha convertido en un ión (positivo o negativo).

Son radiaciones ionizantes los rayos X, las radiaciones alfa, beta, gamma y la emisión de neutrones.

La radiación cósmica (proveniente del Sol y del espacio interestelar) también es un tipo de radiación ionizante, pues está compuesta por radiaciones electromagnéticas y por partículas con gran cantidad de energía. Es así como, los llamados rayos cósmicos blandos, se componen principalmente de rayos gamma, electrones o positrones, y la radiación cósmica primaria (que llega a las capas más altas de la atmósfera) se compone fundamentalmente de protones. Cuando la radiación cósmica interactúa con la atmósfera de la Tierra, se forman en ella átomos radiactivos (como el Tritio y el Carbono-14) y se producen partículas alfa, neutrones o protones. Las radiaciones ionizantes pueden provocar reacciones y cambios químicos con el material con el cual interaccionan. Por ejemplo, son capaces de romper los enlaces químicos de las moléculas o generar cambios genéticos en células reproductoras.

b) Radiaciones No Ionizantes.

Son aquellas que no son capaces de producir iones al interactuar con los átomos de un material.

Las radiaciones no ionizantes se pueden clasificar en dos grandes grupos: los campos de origen electromagnético y las radiaciones ópticas.

Dentro de los campos electromagnéticos se pueden distinguir aquellos generados por las líneas de corriente eléctrica o por campos eléctricos estáticos. Otros ejemplos son las ondas de radiofrecuencia, utilizadas por las emisoras de radio en sus transmisiones, y las microondas utilizadas en electrodomésticos y en el área de las telecomunicaciones.

Entre las radiaciones ópticas se pueden mencionar los rayos infrarrojos, la luz visible y la radiación ultravioleta. Estas radiaciones pueden provocar calor y ciertos efectos fotoquímicos al actuar sobre el cuerpo humano.

1.3. REACCIONES NUCLEARES: FISIÓN Y FUSIÓN

a) Fisión

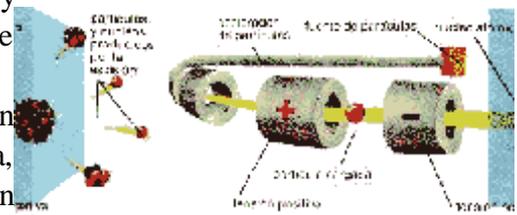
La *Fisión nuclear* es el proceso de ruptura de un núcleo pesado (como por ejemplo el Uranio o Plutonio) para formar dos más ligeros, con el desprendimiento de energía correspondiente a la diferencia entre la masa de los productos (átomos obtenidos y neutrones desprendidos) respecto al átomo pesado. luego se verifica la fórmula de Albert Einstein

$$E = M \cdot C^2,$$

Los núcleos de los átomos son en general muy estables, pero, si son golpeados por protones o electrones dotados de suficiente energía, se rompen.

Si un elemento no es radiactivo, sus átomos tienen un núcleo muy estable: el átomo puede perder o ganar electrones, puede unirse a otros átomos o separarse de ellos, pero su núcleo sigue intacto. Para romper el núcleo de un átomo es necesario golpearlo con una partícula. En los aceleradores se utilizan partículas llevadas a velocidad elevadísima. La partícula usada como proyectil puede ser un protón o un electrón; en el camino que le conduce a dar en el blanco, es decir, el núcleo del átomo, es acelerada por un campo eléctrico y guiada por un campo magnético. Cuando la partícula alcanza el núcleo tiene suficiente energía para romperlo en varias partes.

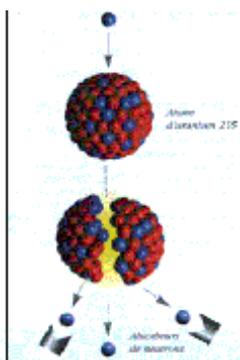
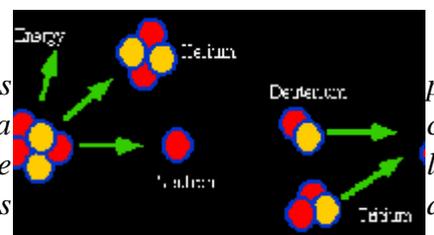
La fisión nuclear es el utilizado actualmente en las centrales nucleares. Para romper un átomo, se emplea un neutrón (ya que es neutro eléctricamente, y no es desviado de su trayectoria), que se lanza contra el átomo a romper, por ejemplo, Uranio. Al chocar el neutrón, el átomo de Uranio-235 se convierte en Uranio-236 durante un brevísimo espacio de tiempo, pues tiene un neutrón más que es el que ha chocado con él, siendo este último átomo sumamente inestable, dividiéndose en dos átomos diferentes y más ligeros que el Uranio-236 (por ejemplo Kriptón y Bario; o Xenón y Estroncio), desprendiendo 2 ó 3 neutrones (los neutrones desprendidos, dependen de los átomos obtenidos, nosotros tomamos como ejemplo 3 neutrones, pero puede que solo se desprendan 2. En caso de obtener Bario y Kriptón, se desprenden 3 neutrones; mientras que si se obtiene Xenon y estroncio, solo se liberan 2 neutrones), y liberando energía. Estos 3 neutrones, vuelven a chocar con otros 3 átomos de Uranio-235, liberando en total 9 neutrones, energía y otros dos átomos más ligeros, y así sucesivamente, generando de esta forma una reacción en cadena.



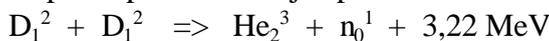
Como se puede comprobar, en cada reacción sucesiva, se rompen 3^{n-1} átomos, donde n es 1º, 2º, 3º, 4º, ..., reacción. De esta forma, donde más energía se libera es al final, ya que se rompen gran cantidad de átomos, según la relación 3^{n-1} , liberándose gran cantidad de energía.

b) Fusión

La *Fusión nuclear* es el proceso de combinación de dos núcleos ligeros para formar uno más pesado, con el desprendimiento de energía correspondiente a la diferencia entre la energía de liberación de los productos y la suma de las energías de liberación de los dos núcleos ligeros.



Se puede poner como ejemplo la reacción de fusión nuclear:



Estas reacciones sólo pueden tener lugar si los núcleos reaccionantes poseen la energía suficiente para superar la fuerza de repulsión de Coulomb

La fusión nuclear, está actualmente en líneas de investigación, debido a que todavía hoy no es un proceso viable, ya que se invierte más energía en el proceso para que se produzca la fusión, que la energía obtenida mediante este método.

La fusión, es un proceso natural en estrellas, produciéndose reacciones nucleares por fusión debido a la elevadísima temperatura de estas estrellas, que están compuestas principalmente por Hidrógeno y Helio. El hidrógeno, en condiciones normales de temperatura, se repele entre sí cuando intentas unirlo (fusionarlo) a otro átomo de hidrógeno, debido a su repulsión electrostática. Para vencer esta repulsión electrostática, el átomo de hidrógeno debe chocar violentamente contra otro átomo de hidrógeno, fusionándose, y dando lugar a Helio, que no es fusionable. La diferencia de masa entre el átomo obtenido y el original es mayor que en la fisión, liberándose así una gran cantidad de energía (muchísimo mayores que en la fisión). Estos choques violentos, se consiguen con una elevada temperatura, que excita los átomos de hidrógeno, y se mueven muy rápidamente, chocando unos contra otros.

La primera reacción de fusión realizada por el ser humano, tuvo origen militar, con una bomba termonuclear (o también llamada bomba-H o de Hidrógeno), que para obtener la temperatura adecuada (casi la del Sol, unos 20 millones de grados centígrados), se utilizó una bomba atómica. Esta bomba termonuclear libera grandes cantidades de energía. Las bombas termonucleares actuales, alcanzan los 60 megatones (equivalente a 60 millones de toneladas de explosivo TNT), lo cual puede arrasar todo lo que haya en un radio de 40 ó 50 Kilómetros a la redonda, eso si incluir la radiación electromagnética y la onda expansiva, así como la lluvia ácida.

CITAS DE EINSTEIN

"La mente intuitiva es un sagrado regalo y la mente racional es un fiel sirviente. Nosotros hemos creado una sociedad que honra al sirviente y se ha olvidado del regalo."

"...uno de los motivos más fuertes que llevan a los hombres al arte y a la ciencia es el escape de la vida cotidiana con su crudeza dolorosa y la tristeza desesperada, de las trabas de los propios deseos en la cambiante vida de uno. Una naturaleza finamente templada anhela escapar de la vida personal en el mundo de percepción objetiva y pensamiento."

"La conducta ética de un hombre debe ser basada eventualmente en la simpatía, educación y en los lazos sociales; ninguna base religiosa es necesaria. El hombre estaría de hecho en una manera pobre si él tuviera que ser refrenado por el miedo de castigos y la esperanza de un premio después de la muerte."

"Si los hechos no encajan en la teoría, cambie los hechos."

"Lo que realmente me interesa es si Dios tenía alguna elección en la creación del mundo."

"Si uno estudia con demasiado celo, puede perder los pantalones fácilmente."

"A través del descargo de energía atómica, nuestra generación ha traído al mundo la fuerza más revolucionaria subsecuentemente desde el descubrimiento del hombre prehistórico del fuego. Esta fuerza básica del universo no puede encajarse en el concepto pasado de moda de nacionalismos estrechos. Allí no hay ningún secreto y no hay ninguna defensa; no hay ninguna posibilidad de control excepto a través de la comprensión despertada e insistente de las personas del mundo. Nosotros, los científicos, reconocemos nuestra responsabilidad ineludible de llevar a nuestros ciudadanos compañero a una comprensión de la energía atómica y su implicación en la sociedad. En esto queda nuestra única seguridad y nuestra única esperanza - nosotros creemos que una ciudadanía informada actuará por la vida y no para la muerte."

"Ante Dios nosotros somos todos igualmente sabios -- e igualmente tontos."

"Sería posible describir todo científicamente, pero no tendría ningún sentido; carecería de significado el que usted describiera a la sinfonía de Beethoven como una variación de la presión de la onda auditiva."

"Quien nunca ha cometido un error nunca ha probado algo nuevo."

"Yo nunca pienso en el futuro. Viene bastante rápido."

"Intenta no volverte un hombre de éxito, sino volverte un hombre de valor."

"El nacionalismo es una enfermedad infantil. Es el sarampión de la raza humana."

"Si mi teoría de relatividad es probada exitosa, Alemania me exigirá como un alemán y Francia declarará que yo soy un ciudadano del mundo."

"La Paz no puede lograrse a través de la violencia, sólo puede lograrse a través del entendimiento."

Quando le preguntaron si sabía con qué se lucharía en la Tercera Guerra Mundial él respondió que no sabía, pero sí sabía con qué se lucharía en la Cuarta; dijo: "con palos y piedras".

"La ciencia sin la religión es renga, la religión sin la ciencia es ciega."

"La imaginación es más importante que el conocimiento."

"La gravitación no es responsable de que las personas se enamoren."

"Yo quiero conocer los pensamientos de Dios; el resto son detalles."

"La realidad es meramente una ilusión, aunque uno es muy persistente."

"La única cosa realmente valiosa es la intuición."

"La debilidad de actitud se vuelve debilidad de carácter."

"El eterno misterio del mundo es comprenderlo."

"La única cosa que interfiere con mi aprendizaje es mi educación."

"El progreso tecnológico es como un hacha en las manos de un asesino patológico."

"No se preocupe por sus dificultades en las Matemáticas. Yo puedo asegurarle que las mías son todavía mayores."

"Dos cosas son infinitas: el universo y la estupidez humana; y yo no estoy seguro sobre el universo."

"Mi religión consiste en una admiración humilde del espíritu superior ilimitable que revela él mismo en los detalles ligeros que nosotros podemos percibir con nuestra mente frágil y débil."

"Una teoría es tanto más convincente cuanto más simples son sus premisas, cuanto más variadas son las cosas que reúne, cuanto más extenso es el campo de su aplicación".

"Quienquiera que crea que su propia vida y la de sus semejantes está privada de significado no sólo es infeliz, sino apenas capaz de vivir."

"Creo en el Dios de Spinoza, que nos revela una armonía de todos los seres, y no en un Dios que se ocupe en el destino y de las acciones de los hombres."

AFORISMOS PREDILECTOS...

"Dios no juega a los dados."

Aquí expresa su fe en la posibilidad de descubrir un sistema de leyes que permitiera construir una imagen racional del mundo real.

"Dios es sutil, pero no es malo."