

• TEMA 5 •

Aproximación a la Física Moderna

"Una mente crédula... encuentra el mayor deleite en creer cosas extrañas y, cuanto más extrañas son, más fácil le resulta creerlas; pero nunca toma en cuenta las que son más sencillas y posibles, porque todo el mundo puede creerlas".

Samuel Butler

La evolución histórica de la física es una parte fascinante del desarrollo del conocimiento científico y muestra, principalmente, la provisionalidad de las teorías en cada época: no procede hablar nunca de "ciencia cerrada" o definitivamente completa.

A finales del siglo XIX, la Mecánica Teórica y el Electromagnetismo eran los pilares maestros de lo que podríamos denominar ahora **física clásica**, construcción mental que asombraba por la perfección de sus razonamientos, contrastados siempre experimentalmente.

Sin embargo, nuevos hechos, tales como el concepto del electrón como unidad natural de carga componente de la materia, el conocimiento del efecto fotoeléctrico, el descubrimiento de los rayos X, las series espectrales observadas en los espectros de emisión de los átomos, la radiación de incandescencia y especialmente el estudio de la radiactividad, preparan la revolución científica que tendrá lugar a partir de 1900.

Igualmente se sucedieron toda una serie de nuevos descubrimientos que hacían impensable una explicación en base a los parámetros clásicos. Algunos de esos otros hechos fueron:

- La retrogradación del perihelio de Mercurio
- El experimento negativo de Michelson-Morley
- Constancia de la velocidad de la luz y la "interconversión" masa-energía

En este tema vamos a realizar una visión de algunos de estos hechos y lo que los mismos supusieron para el avance del conocimiento científico y el renacer de la llamada **MECÁNICA CUÁNTICA**, con sus profundas implicaciones en el terreno no sólo de la física, sino también en el de la técnica o en el de la filosofía.

Actualmente, **la Relatividad de Einstein y la Mecánica Cuántica están consideradas las avanzadillas de la física en lo que a la nueva interpretación del mundo se refiere**. Incluso, si apuramos, ambas teorías son consideradas ya como modelos "clásicos" dándonos así una idea del vertiginoso ritmo al que se suceden los hechos, modelos y teorías en el terreno de la ciencia, haciéndola un ente vivo.

Comenzaremos nuestro estudio con los fenómenos de la Física Nuclear y Radiactividad.

1. FÍSICA NUCLEAR y de PARTÍCULAS

El descubrimiento de la Radiactividad por el físico francés **H. Becquerel** (en la foto) en 1896 se produjo como consecuencia de una investigación sobre la posible emisión de rayos X por sustancias fosforescentes. Su procedimiento consistía en envolver una placa fotográfica con papel negro y grueso, de modo que solo pudiera ser atravesado por radiaciones muy energéticas y penetrantes, y colocar encima una sustancia fosforescente, exponiendo todo el conjunto a la luz solar. El resultado era que la sustancia fosforescente en cuestión emitía radiaciones que penetraban a través del papel opaco a la luz y marcaban su silueta sobre la placa fotográfica. Lo espectacular e inesperado era que esta situación se seguía produciendo incluso en ausencia de luz solar cuando se colocaba sobre ella una sal de uranio, aunque sólo aparecía marcada la zona que precisamente cubría el mineral de uranio.



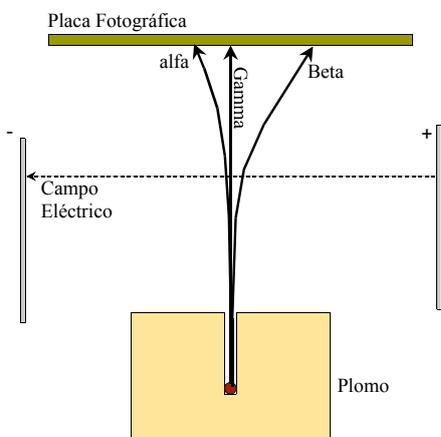
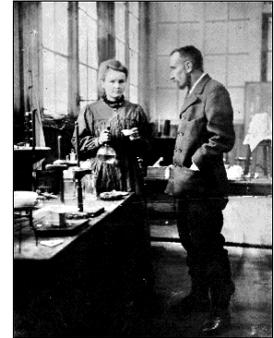
"En esa época estábamos completamente absorbidos por las perspectivas que se abrían ante nosotros, gracias a un descubrimiento inesperado. A pesar de las dificultades de nuestras condiciones de trabajo, nos sentíamos felices. Nuestros días transcurrían en el laboratorio. Vivíamos en una preocupación única, como en un sueño"

(Marie Curie (1867-1934). Cartas)

Experimentos posteriores con diferentes minerales de Uranio, con o sin exposición a la luz solar, pusieron de manifiesto la emisión continua de algo que era capaz de penetrar el papel y otras sustancias como el vidrio. La intensidad de la radiación se vio que era proporcional a la cantidad de masa de uranio contenida en el compuesto. De igual modo, Becquerel hizo sus experimentos con el uranio en polvo, disuelto en ácidos,

a baja temperatura... y siempre obtenía el mismo resultado de radiaciones. Estaba por tanto claro que la radiación era debida el Uranio y que las otras sustancias con las que éste se combinaba, no afectaban en absoluto al poder de radiación

Estas investigaciones fueron continuadas por **los esposos Curie**, que descubrieron que otros elementos poseían también la misma propiedad que el uranio, e incluso con mayor intensidad, y en todos ellos se seguía cumpliendo que la intensidad de la radiación era proporcional a la masa del elemento activo presente. El paso siguiente era averiguar la naturaleza de esas emisiones.



Desde que se descubrieron las radiaciones, se hicieron experimentos para averiguar su naturaleza, y ver si estaban formadas por distintas componentes. Para ello, la radiación se hizo pasar por campos eléctricos y se observaron tres comportamientos distintos, lo que permitió hacer una clasificación de la radiación en alfa (α) beta (β) y gamma (γ).

- **Radiación alfa (α)**

Consiste en **átomos de helio ionizados**, es decir, partículas formadas por dos protones y dos neutrones. Debido a su masa y a que son emitidas a gran velocidad (poseen entonces gran energía cinética) producen una **elevada ionización** pero, al cruzar la materia, son frenadas rápidamente, por tanto, **son poco penetrantes**; de hecho, no son capaces de atravesar la piel humana.

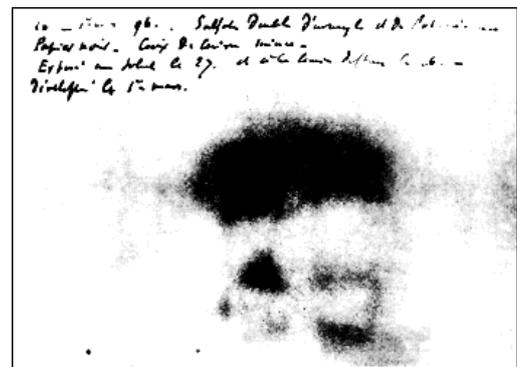
- **Radiación Beta β .**

Consiste en **electrones lanzados a gran velocidad**. Debido a tener menor masa que las anteriores, **son de POCO poder de ionización, pero muy penetrantes**. Pueden atravesar la piel humana, aunque no el tejido subcutáneo.

- **Radiación Gamma γ**

Es radiación **electromagnética muy energética, de corta longitud de onda**. Es mucho más penetrante que las radiaciones alfa y beta. Pueden atravesar el cuerpo humano, y para detenerlas se precisan espesores de varios centímetros de plomo y de decímetros de hormigón.

Los resultados anteriores sugerían que los átomos NO eran como esferas macizas sino que poseían una estructura compleja, y se diseñaron experimentos para analizarla. Quizás el experimento más famoso fue el realizado por E. Rutherford, que dirigió sobre una delgada lámina de oro un haz de radiación alfa observando un triple comportamiento. Por un lado, la mayor parte de las radiaciones cruzaban sin más la lámina de oro. Un porcentaje sensiblemente menor lo hacía pero desviándose en su camino posterior, y un tercer tipo minoritario rebotaba en la lámina. Al principio, se consideró que este triple comportamiento era un error del experimento, pero por mucho que se repitió, los resultados fueron siempre los mismos.



Mancha original de la placa impresionada por la primera emisión radiactiva registrada por H. Becquerel

El experimento de Rutherford permitió deducir que:

- La mayor parte del átomo habría de ser una estructura "hueca", ya que la mayor parte de las partículas lanzadas lo cruzaban sin dificultad.
- Habría de contener una minúscula zona con carga positiva (los protones ya descubiertos) que explicara la desviación que se producía en la radiación alfa.
- Esa minúscula zona habría de ser muy masiva, ya que así podría explicarse las partículas que rebotaban.

Esa pequeña zona masiva donde habrían de concentrarse los protones, se la denominó núcleo. Orbitando en torno a ese núcleo y en igual número que los protones que albergaba, habrían de estar los electrones. Al número de protones que contiene cada átomo en su núcleo se lo denomina **NÚMERO ATÓMICO (Z)**.

Tras este hallazgo y propuesta de estructura, se pudo comprobar que la masa medida de los átomos NO coincidía con la suma de las masas de los protones que albergaba en su núcleo. La solución se produjo tras el descubrimiento de un nuevo tipo de partículas, los neutrones, de carga nula y de masa aproximadamente igual a la de los protones. De este modo, la masa de un átomo es prácticamente la de su núcleo. A la suma del número de los protones y de los neutrones se lo denominó **NÚMERO MÁSCICO (A)**. Ambas partículas reciben el nombre genérico de nucleones, Los núcleos que poseen el mismo Z y el mismo A se los denomina **núclidos**.

Si es X el símbolo de un elemento químico, suele representarse esta información escribiendo



Se dice que dos núcleos son **ISÓTOPOS**, si coinciden en el número atómico ($Z_1 = Z_2$) y difieren, por lo tanto, en el número de neutrones ($N_1 \neq N_2$). Se denominan **ISÓBAROS** si poseen el mismo número másico ($A_1 = A_2$).

El tamaño del núcleo de un átomo es proporcional al número de nucleones que lo forma. El radio nuclear viene dado por la expresión:

$$R = r_0 \sqrt[3]{A}$$

donde $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m.

Para expresar la masa de los átomos se utiliza la unidad de masa atómica que, por definición, corresponde a la doceava parte de la masa de un átomo de Carbono-12. Si la simbolizamos simplemente por u (o por uma, es indiferente), tendremos que

$$1u = \frac{12g}{12 \cdot 6,023 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-24} g$$

La masa (en reposo) del protón es $m_p = 1,00782$ u; la del neutrón es $m_n = 1,00867$ u, y la del electrón es $m_e = 0,00055$ u.

Con todo, **la masa atómica que aparece en la tabla periódica es una media ponderada de las masas de los distintos isótopos que posee.**

2. INTERACCIÓN FUERTE

Una vez que quedó claro que el interior del átomo albergaba protones, se planteó la cuestión de cómo era posible que éstos permanecieran unidos, ya que según las leyes de Coulomb, las cargas del mismo signo se repelen. **¿Cómo explicar la estabilidad nuclear?** Estaba claro que en el interior del núcleo debería darse un tipo de interacción muy superior a la repulsión eléctrica. **Se empezó a hablar de fuerza nuclear.**

Las características fundamentales de esta interacción pueden resumirse así:

- Se manifiesta cuando la distancia entre nucleones es muy pequeña; es decir: son fuerzas "de corto alcance".
- Alta Intensidad (mayor que la electromagnética, mucho mayor que la débil y extraordinariamente superior que la interacción gravitatoria).

¹La interacción nuclear débil (que se verá más adelante) es también de corto alcance

- Es atractiva a las distancias normales en el núcleo, pero se hace repulsiva a distancias muy cortas.
- Es independiente de la carga, por lo tanto, la intensidad es la misma en la interacción entre neutrones, que entre dos protones o que entre un protón y un neutrón.
- Saturación: cada nucleón interacciona con un cierto número de nucleones (los más próximos). Esto explica que la energía necesaria para arrancar un nucleón de un núcleo sea la misma para núcleos de pocos nucleones (ocho o diez) que para núcleos de muchos nucleones (ochenta o cien).

3. ESTABILIDAD NUCLEAR

Existen alrededor de 400 núcleos estables; se han observado muchos más, pero éstos son inestables. Si se hace una representación gráfica de N (nº de neutrones) frente a Z (nº de protones) se observa que los núcleos ligeros (salvo el ^1H) son más estables si contienen un número igual de protones que de neutrones ($N = Z$). En los núcleos masivos notamos que éstos son más estables si el número de neutrones excede al nº de protones. Esto indica que a medida que el número de protones aumenta, también lo hace el valor de la intensidad de la fuerza repulsiva eléctrica de Coulomb, lo que hace desestabilizar el núcleo. Por eso se necesitan más neutrones para mantener estable el núcleo ya que los neutrones sólo experimentan fuerzas nucleares atractivas. A partir del elemento $Z = 83$ las fuerzas repulsivas entre los protones no pueden ser compensadas por la adición de más neutrones y los núcleos correspondientes NO son suficientemente estables.

LA estabilidad nuclear puede entenderse mediante las fuerzas nucleares, pero también desde el punto de vista energético. Así, es un hecho comprobado que la masa de la masa de los nucleones libres NO ES LA MISMA que la suma de las masas de protones y neutrones que ese núcleo contiene. A esa diferencia de masa se la denomina Defecto de Masa. Este defecto puede calcularse mediante la expresión

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A-Z) \cdot m_n - m_x$$

donde m_x es la masa del núcleo considerado.

Una de las consecuencias más sorprendentes de la teoría de la Relatividad de Albert Einstein está en el hecho de haber puesto de manifiesto la equivalencia entre masa y energía. Para Einstein, la masa es "otra forma en que se nos presenta la energía"². La relación que existe entre ambas es una de las ecuaciones más famosas de toda la Física:

$$E = mc^2$$

Por lo tanto, no tiene sentido hablar de conservación de la masa y/o de la conservación de la energía. Lo más prudente es hablar de la ley de conservación masa-energía. Precisamente, por tanto, es esa diferencia de masa entre "la que deberían tener los núcleos y la que realmente tienen" la que da origen a la que podemos llamar energía de enlace (o de ligadura) y que se calculará mediante la ecuación de Einstein anterior.

Inversamente, podremos interpretar la energía de ligadura como la energía que habría que suministrar a un núcleo para separarlo completamente en sus componentes.

A parte esto, se hace posible hablar de la masa de una partícula expresándola en unidades de energía, y poder escribir, como relación de interés que

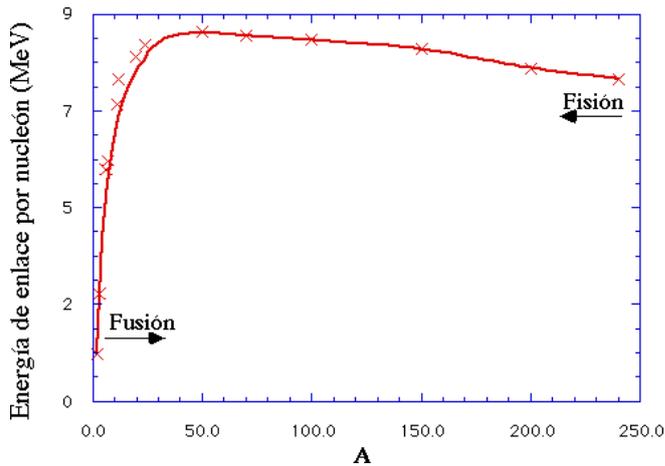
$$1 \text{ uma} = 931,48 \text{ MeV}/c^2$$

(demostrar la relación anterior usando los datos necesarios)

Según esto, el defecto de masa (expresado en unidades de energía), es la energía necesaria para descomponer un núcleo en sus protones y neutrones por separado.³

²Dicho esto con las mayores precauciones posibles.

³Recordemos que $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



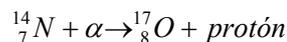
La energía de ligadura (o de enlace) por nucleón, es decir, E/A , representa la energía que hay que suministrar al núcleo para separar UNO de los nucleones, o lo que es igual, la energía que se libera cuando el núcleo captura un nucleón. Esta energía de ligadura E/A es función del número de nucleones en la forma indicada en la figura, y da idea de la estabilidad nuclear: los núcleos más estables son los que poseen los valores mayores de E/A . En la gráfica se observa que los valores alcanzan un máximo para los núcleos cuyos números másicos están comprendidos entre 50 y 100. Para valores pequeños de A , por lo tanto, el valor de E/A crece fuertemente conforme aumenta el valor de A , por lo tanto, la unión de dos de estos núcleos

ligeros formando un núcleo más pesado (y por lo tanto más estable) liberará energía. En eso consiste la **fusión nuclear**. Para valores altos de A , a un aumento de dos mismos corresponde una disminución de los valores de E/A , por lo que se conseguirá una mayor estabilidad y la consiguiente liberación de energía mediante la fragmentación de estos núcleos pesados en otros más ligeros. Este fenómeno es el de **fisión nuclear**. Ambos fenómenos se estudiarán con algo de más detalle más adelante.

- Q1.** Calcular la energía de enlace por nucleón que corresponde al núcleo $^{56}_{26}\text{Fe}$ (Masa atómica del hierro 56 = 55,9349)
- Q2.** El magnesio común es una mezcla de los isótopos ^{24}Mg , ^{25}Mg , ^{26}Mg . La masa atómica del magnesio natural es 24,314 uma. ¿Qué porcentaje de cada isótopo está presente en el magnesio natural? (masas respectivas de cada isótopo: 23,9850; 24,9858; 25,9826 uma) El isótopo 26 tiene un 10.2% de abundancia.
- Q3.** Calcula la energía total de ligadura y la energía de ligadura por nucleón para los siguientes isótopos: ^4He ; ^{16}O ; ^{32}S ; ^{107}Ag ; ^{202}Hg
 (DATOS: Masa He-4 = 4,0026; O-16 = 15,9949; S-32 = 31,9721; Ag-107 = 106,9051; Hg-202 = 201,9706 umas)

4. REACCIONES NUCLEARES

Un fenómeno producido al estudiar la difusión de partículas alfa en la materia, fue interpretado por E. Rutherford suponiendo que el choque de una partícula alfa contra un núcleo de nitrógeno daba lugar a la formación de un nuevo núcleo, de oxígeno, al tiempo que se produce la emisión de un protón. La transformación que se ha llevado a cabo se puede escribir así:

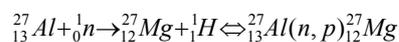
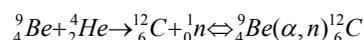
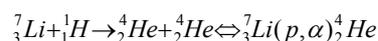


Estas transformaciones se denominan **REACCIONES NUCLEARES**.

Otra forma usual de representar estas reacciones es



en donde X sería el $^{14}_7\text{N}$; Y sería el $^{17}_8\text{O}$; a corresponde a la partícula alfa, y b al protón. Por ejemplo:



En todas las reacciones nucleares se conserva la carga: $\Sigma Z = \text{cte.}$

También se conserva el número másico: $\Sigma A = \text{cte}$

Pero NO se conserva la masa

Por ejemplo, en la reacción primera del ejemplo, ${}^7\text{Li}_3(p,\alpha){}^4\text{He}_2$ se tiene que:

masa del protón:	1,007825	
masa del núcleo de litio:	7,016004	TOTAL: 8,023829

masa de la partícula alfa:	4,002603	
masa del núcleo de helio:	4,002603	TOTAL: 8,005206

Pero como se conserva la masa-energía, a la diferencia de masa $\Delta m = 0,018623 \text{ u}$, le corresponde una energía de 17,34 MeV.

A parte de que en las reacciones químicas ordinarias no se ven afectados los núcleos atómicos, hay otro aspecto que las hace muy distintas; es el que se refiere a la liberación de energía. Por ejemplo, en la reacción de combustión del carbón ($\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) se libera una energía de 94 kcal/mol. En cambio, en la fisión del Uranio-235 se produce una pérdida de masa de 0,215 unidades que corresponden a unos 200 MeV por núcleo de Uranio escindido. Esto significa que la liberación de energía en las reacciones nucleares es muy superior a la que se produce en las reacciones químicas ordinarias. Si tenemos en cuenta que, por ejemplo, el poder calorífico de la gasolina es de unas 9800 cal/g, el equivalente a 1 kg de U-235 sería unas **DOS MIL TONELADAS de gasolina**.

Por tanto, **las reacciones nucleares son esencialmente procesos de choque en los que se conserva la energía, los momentos lineal y angular, el número de nucleones y la carga.**

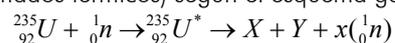
Si el balance energético del tipo que se ha hecho en el ejemplo anterior arroja un resultado positivo, el sistema CEDE energía. Si por el contrario resulta negativo, el sistema ha de recibir un aporte externo de energía, y así la partícula proyectil ha de tener como mínimo una cierta energía cinética para producir la reacción, llamada "energía umbral" que ha de ser, precisamente igual al valor absoluto de esa energía negativa del balance de la reacción.

5. FISIÓN y FUSIÓN NUCLEAR

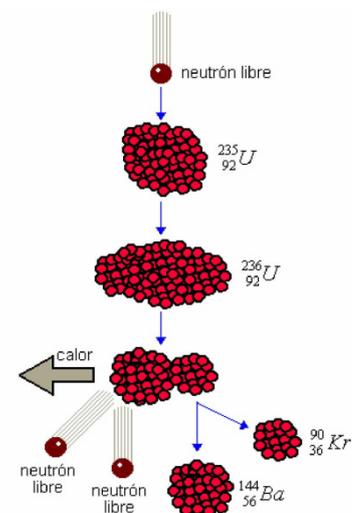
La **FISIÓN nuclear** consiste en la fragmentación de núcleos pesados en otros más ligeros con liberación de energía.

En 1938 los físicos **Otto Hahan** y **Fritz Stassmann** iniciaron una serie de experimentos consistentes en bombardear una muestra de uranio con neutrones, tratando de crear nuevos elementos. Entre los productos de la reacción nuclear se descubrieron dos elementos de masa media: el bario y el lantano. Este proceso fue interpretado como la rotura del núcleo de Uranio por el neutrón, originando así las denominadas desde entonces **REACCIONES DE FISIÓN**.

La Fisión del Uranio-235 puede producirse por bombardeo con neutrones lentos (también llamados térmicos) según el esquema general:



Donde U^* corresponde a un estado excitado que rápidamente se divide en los fragmentos de fisión X e Y, existiendo hasta 90 posibles "núcleos hijos" diferentes. El número x de neutrones generados puede ser de 2 ó 3 según la naturaleza de los fragmentos X e Y. Teóricamente **cada uno de estos neutrones puede causar una NUEVA FISIÓN** liberando más energía y dando lugar, nuevamente, a entre dos y tres neutrones. Y así sucesivamente, pudiendo ocurrir **una reacción en cadena**, con una rapidez cada vez mayor, liberándose en un corto intervalo de tiempo una enorme cantidad de

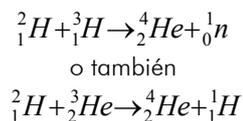


energía. La clave del asunto está en poder controlar ese proceso y crear de este modo un uso pacífico de la energía nuclear, o por el contrario, dejarla sin control y crear así una bomba nuclear.

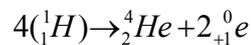
Una **reacción nuclear autosostenida** requiere, en el caso del ^{235}U que al menos UNO de los neutrones emitidos en la fisión de uno de sus átomos provoque una nueva fisión, y así sucesivamente. Sin embargo, una parte de los neutrones producidos en cada fisión puede escapar de la muestra de material fisible sin producir fisión alguna. Dicho efecto puede tener más o menos importancia dependiendo del TAMAÑO DE LA MUESTRA COMBUSTIBLE nuclear. Como los neutrones escapan por la superficie del material, la fracción de neutrones que pueden llegar a perderse dependerá en última instancia, de la relación existente entre el área y el volumen del material fisionable. Puede concluirse, por lo tanto que ha de existir un **TAMAÑO CRÍTICO** de muestra nuclear fisionable al que corresponderá obviamente una **MASA CRÍTICA** del mismo, por debajo de la cual la reacción en cadena terminará por extinguirse, mientras que por encima de la misma podría producirse una brutal liberación de energía, una explosión nuclear. Esta última posibilidad es, en esencia, el fundamento de la bomba atómica: dos porciones de material fisionable, el ^{235}U por ejemplo, cada una de las cuales es subcrítica, se unen dando lugar a una masa combinada que supera la masa crítica, originándose una violenta explosión, cuyos efectos devastadores son conocidos desde 1945 en Hiroshima.

La **FUSIÓN nuclear** es la **unión de dos núcleos ligeros en otro más pesado con liberación de energía**. La gráfica comentada en hojas anteriores indica que esto es posible si se trata de núcleos muy ligeros (para valores pequeños del número de nucleones, la energía de ligadura por nucleón aumenta cuando aumenta el número de nucleones).

Son reacciones de fusión:



La **fusión nuclear juega un papel fundamental en el Universo**. Por ejemplo, la energía solar se debe a un proceso de fusión en el que se unen núcleos de hidrógeno para formar núcleos de helio (y creación de positrones). El proceso se lleva a cabo a través del llamado **ciclo del carbono**, en el que éste viene a jugar un papel como catalizador nuclear. El resultado del ciclo es, en definitiva:



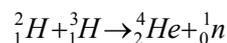
Al hacer el balance energético de esta reacción, se obtiene:

* Defecto de masa $\Delta m = 4 \cdot 1,0078 - 4,0026 = 0,0296 \text{ u}$

* Energía correspondiente $\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 26,6 \text{ MeV}$

* Los dos positrones se aniquilan con dos electrones, con lo que se pierde una masa de $4,00055 \text{ u} = 0,0022 \text{ u}$, lo que proporciona una energía (en forma de radiación γ) de unos 2 MeV , con lo que la energía total liberada es de unos $28,6 \text{ MeV}$.

En la reacción



(la de la bomba de hidrógeno) la pérdida de masa vale $0,0199 \text{ u}$, y la energía liberada es de $18,5 \text{ MeV}$.

Para iniciar una reacción de Fusión, se necesitan temperaturas de millones de grados (recientemente se está contemplando la posibilidad de la llamada fusión fría). Las condiciones de presión y temperatura en la bomba de hidrógeno se consiguen mediante la explosión de una bomba nuclear de fisión. En el laboratorio, mediante aceleradores de partículas. En la actualidad, la principal dificultad para la realización de estas reacciones está en su control, por lo que hoy día no se ve cercana la construcción de reactores nucleares de fusión. El interés, sin embargo, es muy grande, puesto que se puede liberar más energía que en la fisión y además más limpia.

6. REACTORES NUCLEARES

Los reactores nucleares pueden ser de varios tipos:

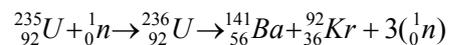
Según la velocidad de los neutrones que producen las reacciones nucleares de fisión, se clasifican en reactores rápidos y reactores térmicos.

- Según el combustible utilizado, en reactores de uranio natural o reactores de uranio enriquecido.
- Según el "moderador": de agua pesada, de agua ligera o de grafito.
- Según el refrigerante: de agua, gas, aire, etc.



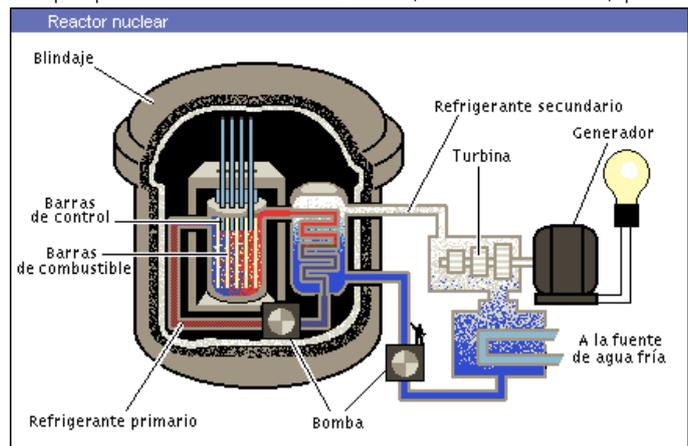
En los reactores térmicos, los núcleos de U-235 son bombardeados por neutrones lentos experimentando la fisión. En la reacción se liberan dos o tres neutrones que producen a su vez nuevas fisiones. Se provoca así, la denominada reacción en cadena de la que ya hemos hablado antes.

Por ejemplo



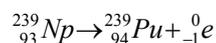
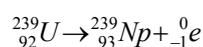
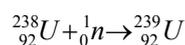
Esta reacción es una de entre las más de 30 que se pueden seguir en la fisión del Uranio. En los diferentes procesos, el defecto de masa es aproximadamente el mismo en todos ellos y la energía liberada, es de unos 200 MeV. En su mayor parte, esa energía aparece como energía cinética de los neutrones y de los fragmentos producidos en la fisión y también en forma de radiación γ . Esta energía produce el calentamiento de la masa de Uranio, de modo que mediante un refrigerante adecuado se puede obtener energía calorífica y de ella energía eléctrica. Con este tipo de reactores, los neutrones que producen la fisión del Uranio, deben ser lentos, por lo que es preciso frenar los que se producen.

Esto se consigue mediante los moderadores que son sustancias como el agua o el grafito que contienen núcleos ligeros. Los neutrones se van frenando al chocar elásticamente con los núcleos del moderador. Por otro lado, para que el proceso de fisión se mantenga, es preciso que de los dos o tres neutrones producidos en cada fisión, sólo uno de ellos produzca una nueva. Esto se consigue mediante barras de control, construidas con un material, como el cadmio, de gran eficacia en la captura de neutrones. Si por contra, los neutrones producidos inducen más de una fisión, el proceso se hace supercrítico y nos hallamos con una bomba nuclear de fisión. Si por el contrario, en cada fisión se produce un solo neutrón capaz de producir una nueva fisión, el reactor funciona críticamente y genera energía de forma estable. Funciona en modo subcrítico cuando en la reacción se genera por término medio menos de un neutrón por núcleo capaz de inducir nuevas fisiones.



Otro tipo de reactor nuclear es el llamado reproductor (o recuperador). Como el U235 aparece en una proporción pequeña en el uranio natural, se puede preferir como combustible, el plutonio, que es posible obtener a partir del U-238 (más abundante que el U-235, aunque no es fisionable).

Por captura de un neutrón, el U-238 se transforma en Pu-239 fisionable según el proceso:



Como el plutonio fisiona con neutrones rápidos, no se precisa moderador, pero por otra parte, presenta mayores problemas de seguridad debido a su mayor dificultad en el control mecánico. Además, como refrigerante ha de utilizarse sodio líquido en vez de agua.

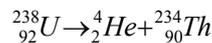
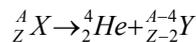
Los reactores de fusión están todavía en fase de investigación, por lo que pese a las grandes esperanzas puestas para resolver definitivamente el problema energético, aún está lejos de poderse utilizar comercialmente. Recordemos que para lograr la fusión se necesitan temperaturas de millones de grados y que a esas temperaturas, los elementos a fusionar se ionizan constituyendo lo que se llama plasma. Este plasma es preciso confinarlo, y tanto la técnica de confinamiento magnético, como la de confinamiento inercial, que son las empleadas, presentan serias dificultades.

7. Leyes de la desintegración radiactiva. LEYES DE SODDY-FAJANS.

No todos los núcleos que existen en la Naturaleza son estables, de modo que evolucionan espontáneamente hacia estados de menor energía. En ese proceso emiten partículas o radiación de las del tipo que ya hemos adelantado: alfa, beta y gamma. Esos núcleos se los denomina radiactivos y al proceso mediante el que consiguen la estabilización se conoce como **RADIATIVIDAD**, decaimiento radiactivo o desintegración radiactiva.

- **Emisión alfa.**

En los núcleos de los elementos muy masivos ($Z \geq 82$), el número de neutrones es muy superior al de protones, y la posición del núclido se aleja de la curva de estabilidad que hemos estudiado. Estos núcleos alcanzan espontáneamente mayor estabilidad emitiendo partículas alfa o núcleos de helio según

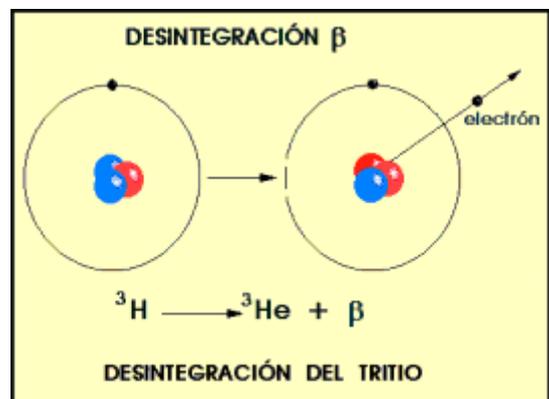
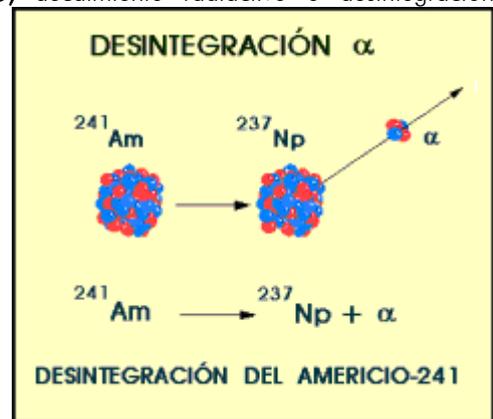
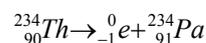
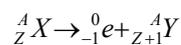


"Cuando un núcleo emite una partícula alfa, se transforma en otro cuyo número atómico disminuye en DOS unidades y cuyo número másico disminuye en cuatro"

Teniendo presente la asociación que hemos visto entre estabilidad y masa nuclear, la masa del núcleo inicial deberá ser mayor que la suma de las masas de las partículas formadas (incluida la alfa), ya que el proceso es espontáneo. Esta diferencia de masa la medimos como energía cinética, sobre todo de la partícula alfa.

- **Emisiones β^- y β^+**

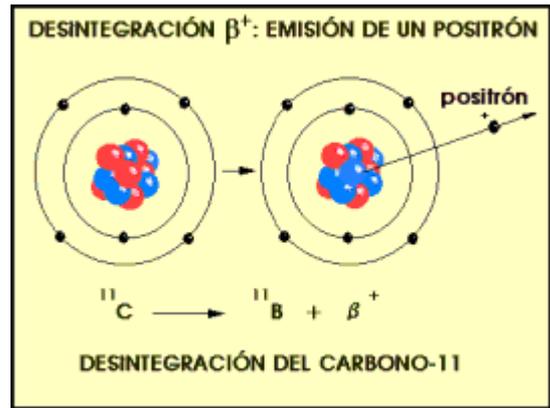
En los núcleos **muy ricos en neutrones** la desintegración espontánea se produce con emisión de **partículas β^-** (electrones). Cuando un núcleo emite un electrón, el número másico del nuevo núcleo NO experimenta cambio alguno, mientras que el número atómico aumenta en una unidad



La emisión de una partícula beta (electrón) desde el núcleo de un átomo donde NO los hay, requiere suponer que lo que sucede en el núcleo es la formación de un electrón y un protón a partir de un neutrón. El protón

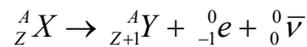
permanece en el núcleo (de ahí que aumente el Z) y el electrón es emitido como radiación beta. Sin embargo, el análisis cuidadoso del proceso de emisión beta llevó a resultados que NO verificaban el principio de conservación de la energía ni el principio de conservación del momento cinético y angular.

Para hacer compatibles estos principios de conservación con la emisión beta, W. Pauli supuso que el resultado de la desintegración NO son dos partículas, sino tres. Esto es, que además del electrón se emitía una partícula muy difícil de detectar, sin carga ni masa en reposo, a la que se la denominó neutrino. Más tarde, y a consecuencia de otros experimentos, a esa partícula se la identificó con el antineutrino.



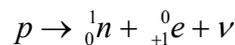
Para explicar la emisión β^- (o la inestabilidad del neutrón) E. Fermi postuló la existencia de una cuarta interacción fundamental, llamada débil, por ser de intensidad menor que las interacciones electromagnética y fuerte.

Así, la emisión β^- puede escribirse como



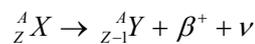
Veamos la desintegración β^+ .

Este proceso, al contrario que el anterior, sucede en núcleos con deficiencia de neutrones. La ganancia en el número de neutrones se consigue mediante la transformación



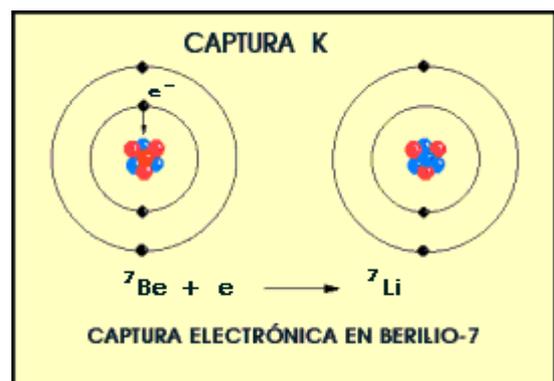
en la cual se emite un positrón y un neutrino electrónico.

Globalmente puede escribirse



Como se ve, el número atómico disminuye en una unidad conservándose A.

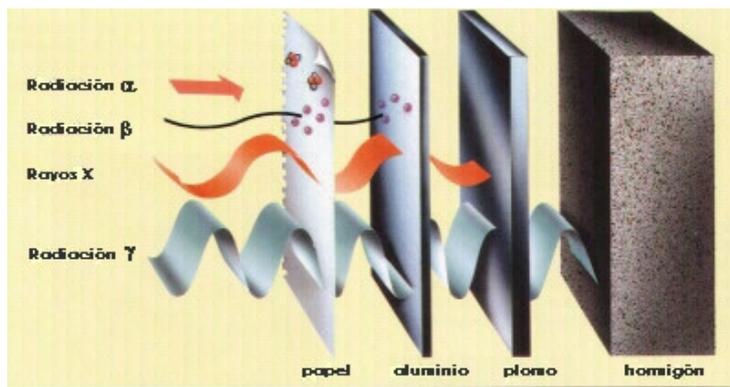
Los núcleos con deficiencia de neutrones pueden adquirir mayor estabilidad mediante otro tipo de transformación denominado **captura electrónica orbital** que consiste en que el núcleo captura un electrón orbital, normalmente uno de la capa K que es la más cercana al núcleo. El núcleo resultante es idéntico al que se produce tras la emisión β^+ . La diferencia entre ambos procesos reside en que en la captura electrónica no existe emisión de positrones, pero sí una emisión de rayos X, debida a la ocupación de otros electrones exteriores de la vacante dejada en la capa K. En general estos dos procesos son competitivos.



- **Emisión Gamma.**

Cuando un núclido se desintegra por emisión alfa o beta, normalmente queda excitado. La emisión de fotones muy energéticos, llamados rayos gamma, permite pasar al núclido del estado excitado a otro estado de energía más baja o al estado fundamental.

La emisión de rayos gamma es el mecanismo por el que los productos de una desintegración radiactiva ceden el exceso de energía. Los fotones NO tienen carga ni masa, por lo que esta emisión gamma no supone modificaciones en Z y/o A.



7.1 Leyes de la emisión Radiactiva.

Ante una muestra de núcleos radiactivos **NO es posible predecir cuándo se llevará a cabo la emisión radiactiva de uno de ellos en concreto**. Todo lo más, se puede determinar **la probabilidad** de que alguno de los núcleos emita radiación en un cierto tiempo. Esto es así debido a que el proceso radiactivo es totalmente aleatorio, por lo que se rige por las leyes de la estadística.

Se ha comprobado que si el número de núcleos de una muestra radiactiva es, en un determinado momento, N , transcurrido cierto tiempo Δt , el número de núcleos desintegrados es ΔN , cumpliéndose que

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \cdot N$$

donde λ es una constante característica del elemento radiactivo considerado, llamada **constante de desintegración**.

El signo negativo que aparece en la expresión indica que a causa de la desintegración, el número de núcleos de la muestra decrece.

La expresión anterior puede escribirse e integrarse del modo siguiente:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\int \lambda dt \Rightarrow \ln N = -\lambda t + cte$$

Si consideramos que en el instante inicial, $t = 0$, el número de núcleos es N_0 , tendremos que $\ln N_0 = cte$, y con ello, $\ln N = -\lambda \cdot t + \ln N_0$ lo que significa que

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

que expresado en forma exponencial, suele ponerse como

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

expresión que nos permite conocer **EL NÚMERO DE NÚCLEOS QUE QUEDAN** en la muestra **SIN desintegrar** en cada instante t .

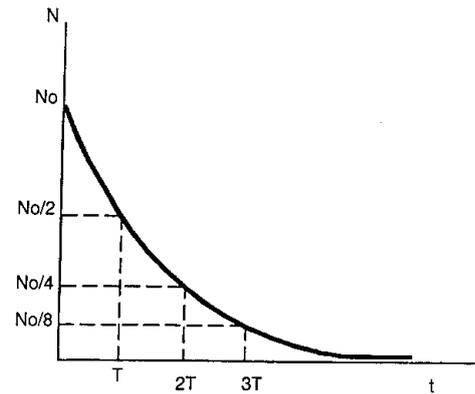
Otra constante de interés en la radiactividad es la **SEMIVIDA**, o **periodo de Semidesintegración, T**, que *es el tiempo al cabo del cual se han desintegrado la mitad de los núcleos iniciales*. Como en ese instante T el número de núcleos que quedan sin desintegrar será $N_0/2$, sustituyendo en la última ecuación, tendremos:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln 2 = \lambda T \Rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Como puede observarse, T es otra constante característica del núcleo considerado, cuyo valor varía desde muchos miles de años a millonésimas de segundo. Por ejemplo, U-238 ($T = 4,5 \cdot 10^9$ años); Th-230 ($T = 8 \cdot 10^4$ años); Bi-210 ($T = 5$ días); At-218 ($T = 2$ segundos), Po-212 ($T = 3 \cdot 10^{-7}$ segundos); etc.

A la inversa de la constante de desintegración se la denomina **vida media** y se simboliza por $\Gamma = 1/\lambda$, y representa el tiempo medio que tarda, probabilísticamente, en desintegrarse un núcleo.

Es interesante observar que la vida media de un isótopo sólo depende de sus características propias y NO de la cantidad de isótopo de la que se disponga.



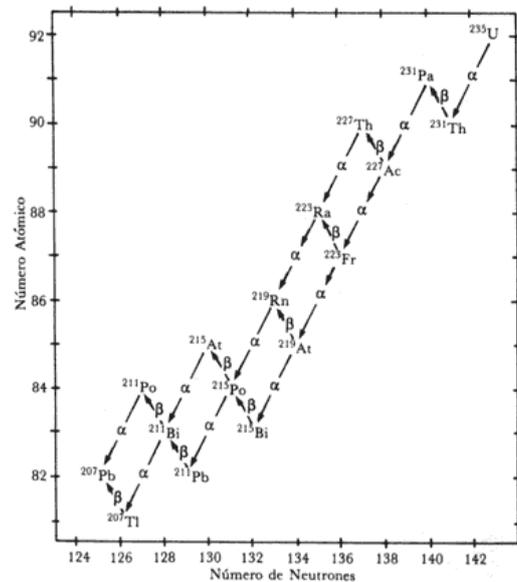
Q4. Entre los materiales gaseosos que pueden escapar de un reactor nuclear, se encuentra el ^{131}I , gas muy peligroso, ya que con mucha facilidad se fija en la glándula tiroidea. A) Escribe la reacción de desintegración, sabiendo que se trata de un emisor beta; B) La emisión beta de este isótopo va acompañada de una emisión gamma. ¿Cuál de las dos emisiones es más perjudicial para el ser humano?; C) Determina la energía total liberada por el núcleo al desintegrarse. DATOS de masas atómicas en uma: $^{131}\text{I} = 130,8772$; $^{131}\text{Xe} = 130,8756$

7.2. Las series radiactivas

Una serie radiactiva es un conjunto de núclidos radiactivos que derivan del mismo núclido inicial y que por desintegración en cascada, conducen a un mismo núclido estable.

Existen tres series naturales, que según el elemento que la inicia, se denominan serie del **uranio**, del **torio** y del **actinio**.

Aquí se muestra la serie del Uranio, la cual finaliza en el núclido estable de Pb-206. Las representaciones de las otras series radiactivas son muy similares a esta. (Eje OY: N; eje OX: Z)



7.3. Actividad de una fuente radiactiva.

Se denomina así al número de desintegraciones que se producen en esa fuente en un segundo. En el S.I. la unidad es el **Becquerel (Bq)** que, por definición, corresponde a una desintegración por segundo: $1 \text{ Bq} = 1 \text{ desint/s}$.

Un múltiplo del Bq es *el Rutherford*, que equivale a un millón de becquerel: $1 \text{ Rutherford} = 10^6 \text{ Bq} = 10^6 \text{ desint/s}$.

Otro múltiplo es **el curio (Ci)** que por definición corresponde a la actividad de un gramo de radio puro. Equivale a 37000 Rutherford y por lo tanto, a $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

En general, la actividad de N átomos será

$$A = \lambda \cdot N$$

“El carbono ^{12}C es un isótopo que se desintegra emitiendo una partícula β . Su vida media es de 5736 años. Se forma en las capas altas de la atmósfera, cuando chocan neutrones con átomos de ^{14}N . Las plantas, al asimilar el dióxido de carbono, asimilan el isótopo radiactivo ^{14}C a la vez que el isótopo estable ^{12}C . La proporción entre ambos es, por lo tanto, la misma en la atmósfera que en los vegetales. Al morir la planta, el proceso de absorción de dióxido de carbono se detiene y va disminuyendo lentamente el contenido de ^{14}C que posee. Ello permite utilizar la cantidad de este isótopo que queda actualmente para establecer la fecha en que la planta fue cortada”

8. EFECTOS DE LA RADIACIÓN

Los efectos directos de la radiación (ionización y calentamiento) pueden producir, a su vez, otros efectos (perjudiciales o beneficiosos, según los casos) alterando la naturaleza de las sustancias, aumentando la velocidad de algunas reacciones, produciendo cambios en la composición química de los tejidos de los seres vivos, o mutaciones genéticas, etc.

Los efectos suelen clasificarse en:

- Físico-Químicos
- Biológicos:
 - > somáticos
 - a corto plazo
 - a largo plazo
 - > genéticos



Los efectos biológicos a corto plazo tienen lugar como consecuencia de exposiciones agudas, y se manifiestan en quemaduras, vómitos, hemorragias y en último caso, con la muerte del afectado. Hay una proporcionalidad entre el daño causado y la dosis individual recibida.

Los efectos a largo plazo se deben a la absorción de pequeñas dosis durante largos periodos y son de tipo cancerígeno. La probabilidad de aparición de cáncer es proporcional a la dosis colectiva recibida por la población.

Los efectos genéticos se deben a alteraciones en los cromosomas. Como los anteriores, se habla de ellos en términos de probabilidad.

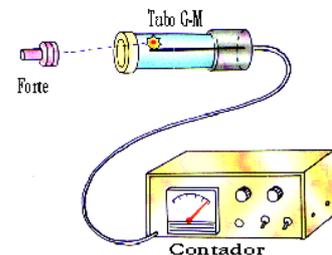
Para medir los efectos producidos por la radiación (dosimetría) se consideran la "dosis absorbida" y la "dosis equivalente".

La unidad de dosis absorbida (en el CGS) es el rad, que por definición es aquella dosis de radiación tal que si un gramo de materia la recibe, se disipan 100 ergios de energía, o sea, **una rad libera 100 ergios por cada gramo de material absorbente**. Es válido para cualquier tipo de radiación y cualquier material. **En el S.I. la unidad es el gray**. **El gray corresponde a la dosis tal que recibida por un kg de materia, se disipa un Julio de energía**.

$$1 \text{ gray (Gy)} = 1 \text{ J/Kg} = 10^7 \text{ erg}/10^3 \text{ g} = 10^4 \text{ erg/g} = 10^2 \text{ rad}$$

Se habla de dosis equivalente puesto que las diferentes radiaciones causan diferentes daños biológicos en las distintas clases de tejidos. **La unidad de dosis equivalente es el rem**, que se define como el producto de un rad por un factor de calidad (QF) de cada radiación en cada tejido: $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{QF}$

Uno de los aparatos más utilizados en la detección de la radiación es el *contador Geiger-Müller*, que básicamente es un cilindro metálico (ver esquema de la figura) que contiene un gas a baja presión y en cuyo eje lleva un hilo metálico tenso que actúa de electrodo positivo (el cilindro actúa de electrodo negativo). Entre esos electrodos se establece la máxima ddp posible sin que llegue a saltar la chispa. Cuando una partícula cargada atraviesa el contador, se produce una descarga que, amplificada, es debidamente contada por un sistema de registro.



9. APLICACIONES DE LOS RADIOISÓTOPOS

Agricultura y Alimentación

a) Control de Plagas.

Se sabe que algunos insectos pueden ser muy perjudiciales tanto para la calidad y productividad de cierto tipo de cosechas, como para la salud humana. En muchas regiones del planeta aún se les combate con la ayuda de gran variedad de productos químicos, muchos de ellos cuestionados o prohibidos por los efectos nocivos que producen en el organismo humano. Sin embargo, con la tecnología nuclear es posible aplicar la llamada "Técnica de los Insectos Estériles (TIE)", que consiste en suministrar altas emisiones de radiación ionizante a un cierto grupo de insectos machos mantenidos en laboratorio. Luego los machos estériles se dejan en libertad para facilitar su apareamiento con los insectos hembra. No se produce, por ende, la necesaria descendencia. De este modo, luego de sucesivas y rigurosas repeticiones del proceso, es posible controlar y disminuir su población en una determinada región geográfica. En Chile, se ha aplicado con éxito la técnica TIE para el control de la mosca de la fruta, lo que ha permitido la expansión de sus exportaciones agrícolas.

b) Mutaciones.

La irradiación aplicada a semillas, después de importantes y rigurosos estudios, permite cambiar la información genética de ciertas variedades de plantas y vegetales de consumo humano. El objetivo de la técnica, es la obtención de nuevas variedades de especies con características particulares que permitan el aumento de su resistencia y productividad.

c) Conservación de Alimentos.

Las radiaciones son utilizadas en muchos países para aumentar el período de conservación de muchos alimentos. Esta técnica despierta algunas polémicas ante los posibles efectos secundarios que pudiera tener, sin que existan pruebas contundentes al respecto. Es una técnica que es capaz de reducir en forma considerable el número de organismos y microorganismos patógenos presentes en variados alimentos de consumo masivo.

Hidrología

Gracias al uso de las técnicas nucleares es posible desarrollar diversos estudios relacionados con recursos hídricos. En estudios de aguas superficiales es posible caracterizar y medir las corrientes de aguas lluvias y de nieve; caudales de ríos, fugas en embalses, lagos y canales y la dinámica de lagos y depósitos. En estudios de aguas subterráneas es posible medir los caudales de las napas, identificar el origen de las aguas subterráneas, su edad, velocidad, dirección, flujo, relación con aguas superficiales, conexiones entre acuíferos, porosidad y dispersión de acuíferos.

Medicina

Vacunas

Se han elaborado radiovacunas para combatir enfermedades parasitarias del ganado y que afectan la producción pecuaria en general. Los animales sometidos al tratamiento soportan durante un período más prolongado el peligro de reinfección siempre latente en su medio natural.

Medicina Nuclear

Se ha extendido con gran rapidez el uso de radiaciones y de radioisótopos en medicina como agentes terapéuticos y de diagnóstico.

En el diagnóstico se utilizan radiofármacos para diversos estudios de:

- Tiroides.
- Hígado.
- Riñón.
- Metabolismo.
- Circulación sanguínea.
- Corazón.
- Pulmón.
- Trato gastrointestinales.

En terapia médica con las técnicas nucleares se puede combatir ciertos tipos de cáncer. Con frecuencia se utilizan tratamientos en base a irradiaciones con rayos gamma provenientes de fuentes de Cobalto-60, así como también, esferas internas radiactivas, agujas e hilos de Cobalto radiactivo. Combinando el tratamiento con una adecuada y temprana detección del cáncer, se obtienen terapias con exitosos resultados.

Radioinmunoanálisis

Se trata de un método y procedimiento de gran sensibilidad utilizado para realizar mediciones de hormonas, enzimas, virus de la hepatitis, ciertas proteínas del suero, fármacos y variadas sustancias. El procedimiento consiste en tomar muestras de sangre del paciente, donde con posterioridad se añadirá algún radioisótopo específico, el cual permite obtener mediciones de gran precisión respecto de hormonas y otras sustancias de interés.

Radiofármacos

Se administra al paciente un cierto tipo de fármaco radiactivo que permite estudiar, mediante imágenes bidimensionales (centelleografía) o tridimensionales (tomografía), el estado de diversos órganos del cuerpo humano.

De este modo se puede examinar el funcionamiento de la tiroides, el pulmón, el hígado y el riñón, así como el volumen y circulación sanguíneos. También, se utilizan radiofármacos como el Cromo - 51 para la exploración del bazo, el Selenio - 75 para el estudio del páncreas y el Cobalto - 57 para el diagnóstico de la anemia.

Medio Ambiente

En esta área se utilizan técnicas nucleares para la detección y análisis de diversos contaminantes del medio ambiente. La técnica más conocida recibe el nombre de Análisis por Activación Neutrónica, basado en los trabajos desarrollados en 1936 por el científico húngaro J.G. Hevesy, Premio Nobel de Química en 1944. La técnica consiste en irradiar una muestra, de tal forma, de obtener a posteriori los espectros gamma que ella emite, para finalmente procesar la información con ayuda computacional. La información espectral identifica los elementos presentes en la muestra y las concentraciones de los mismos.

Una serie de estudios se han podido aplicar a diversos problemas de contaminación como las causadas por el bióxido de azufre, las descargas gaseosas a nivel del suelo, en derrames de petróleo, en desechos agrícolas, en contaminación de aguas y en el smog generado por las ciudades.

Industria e Investigación

Trazadores

Se elaboran sustancias radiactivas que son introducidas en un determinado proceso. Luego se detecta la trayectoria de la sustancia gracias a su emisión radiactiva, lo que permite investigar diversas variables propias del proceso. Entre otras variables, se puede determinar caudales de fluidos, filtraciones, velocidades en tuberías, dinámica del transporte de materiales, cambios de fase de líquido a gas, velocidad de desgaste de materiales, etc..

Instrumentación

Son instrumentos radioisotópicos que permiten realizar mediciones sin contacto físico directo. Se utilizan indicadores de nivel, de espesor o bien de densidad.

Imágenes

Es posible obtener imágenes de piezas con su estructura interna utilizando radiografías en base a rayos gamma o bien con un flujo de neutrones. Estas imágenes reciben el nombre de Gammagrafía y Neutrografía respectivamente, y son de gran utilidad en la industria como método no destructivo de control de calidad. Con estos métodos se puede comprobar la calidad en soldaduras estructurales, en piezas metálicas fundidas, en piezas cerámicas, para análisis de humedad en materiales de construcción, etc..

Datación

Se emplean técnicas isotópicas para determinar la edad en formaciones geológicas y arqueológicas. Una de las técnicas utiliza el Carbono-14, que consiste en determinar la cantidad de dicho isótopo contenida en un cuerpo

orgánico. La radiactividad existente, debida a la presencia de Carbono-14, disminuye a la mitad cada 5730 años, por lo tanto, al medir con precisión su actividad se puede inferir la edad de la muestra.

Investigación

Utilizando haces de neutrones generados por reactores, es posible llevar a cabo diversas investigaciones en el campo de las ciencias de los materiales. Por ejemplo, se puede obtener información respecto de estructuras cristalinas, defectos en sólidos, estudios de monocristales, distribuciones y concentraciones de elementos livianos en función de la profundidad en sólidos, etc..

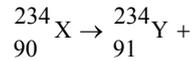
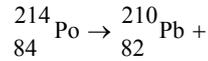
En el ámbito de la biología, la introducción de compuestos radiactivos marcados ha permitido observar las actividades biológicas hasta en sus más mínimos detalles, dando un gran impulso a los trabajos de carácter genético.

PROBLEMAS

1. ¿Qué energía se libera por núcleo en una reacción nuclear en la que se produce un defecto de masa de 0,1 u? (Sol.: $1,49 \cdot 10^{-11}$ J)
2. Razonar por qué el tritio, ${}^3\text{H}_1$ es más estable que el ${}^3\text{He}_2$. Ten presente los siguientes datos:
Masa He-3: 3.016029 u; tritio = 3.016049 u;
protón = $1.6726 \cdot 10^{-27}$ kg; neutrón: $1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg
 $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-24}$ kg
3. Una de las reacciones posibles de la fisión del U^{235} es la formación de Sr^{94} y Xe^{140} , liberándose dos neutrones. A) Formular la reacción nuclear y hacer un análisis cualitativo de la misma con respecto a la conservación de la masa; B) Calcular la energía liberada por 50 g de uranio (DATOS: U = 234,9943 u; Sr = 93,9754 u; Xe = 139,9196 u; n = 1,0086 u)
4. Una central nuclear de una potencia de 1000 MW utiliza como combustible uranio natural, que contiene un 0,7% del isótopo fisible ${}^{235}\text{U}$. ¿Cuántos kg de uranio natural se consumirán en un día de funcionamiento, si la energía total liberada con ocasión de la fisión de un átomo de U-235 es de 200 MeV y se supone que no hay pérdidas de energía en la central. (Sol.: unos 152,5 kg)
5. En la alta atmósfera, el ${}^{14}\text{N}$ se transforma en ${}^{14}\text{C}$ por efecto del bombardeo de neutrones. A) Escribe la reacción que tiene lugar; B) Si el ${}^{14}\text{C}$ es radiactivo y se desintegra mediante β^- , ¿qué proceso tiene lugar? C) Las plantas vivas asimilan el carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis y a su muerte, el proceso de asimilación se detiene. En una muestra de un bosque prehistórico se detecta que hay 197 desintegraciones/minuto, mientras que en una muestra de la misma masa de un bosque reciente existen 1350 desintegraciones/minuto. Calcula la edad del bosque prehistórico, sabiendo que el periodo de semidesintegración del ${}^{14}\text{C}$ es de 5590 años (Sol.: 15522 años)
6. Una muestra de ${}^{131}\text{I}$ radiactivo, cuyo periodo de semidesintegración es de 8 días, experimenta una desintegración β^- , y tiene una actividad media de 84 Bq. A) ¿Qué actividad registrará la muestra si se realiza la medida 32 días después? B) ¿Qué número de átomos de ${}^{131}\text{I}$ hay inicialmente? Escribe la ecuación del proceso que tiene lugar y, para ello, consulta una tabla periódica.
7. Los restos de un animal encontrados en un yacimiento arqueológico tienen una actividad radiactiva de 2,6 desintegraciones por minuto y gramo de carbono. Calcula el tiempo transcurrido, aproximadamente, desde la muerte del animal. (La actividad del C-14 en los seres vivos es de 15 desintegraciones por minuto y gramo de carbono, y el periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5730 años). Sol.: 14479 años.
8. Un isótopo radiactivo tiene un periodo de semidesintegración de 10 años. Para una muestra de 80 mg de ese isótopo, establecer: a) su constante de semidesintegración radiactiva; b) la masa que se tendrá al cabo de 30 años; c) la masa que se tenía hace 30 años.
9. Una muestra de madera de una caja de momia egipcia da 13536 desintegraciones en un día por cada gramo de carbono. Establecer la edad de la caja de la momia. (Dato: un gramo de una materia actual de carbono experimenta 920 desintegraciones por hora; periodo de semidesintegración del C-14 = 5730 años) (Sol.: 4045 años)

10. Cuando hace explosión una bomba de hidrógeno, se produce una reacción termonuclear en la que se forma He-4 a partir de deuterio y de tritio. A) Escribir la reacción nuclear correspondiente; B) Calcular la energía liberada en la formación de un átomo de helio al producirse esa reacción, expresando el resultado en MeV; C) Expresar la energía liberada en la formación de 1 g de helio en kWh. (Buscar los datos que necesites)

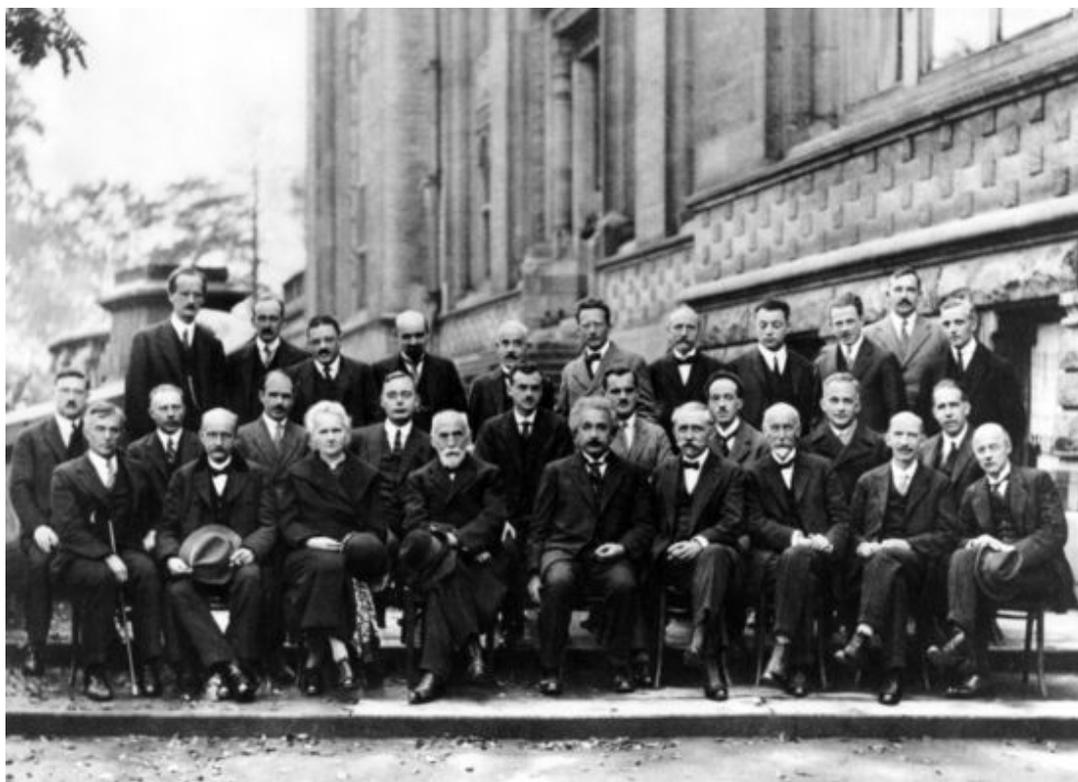
11. Completa las siguientes reacciones de desintegración nuclear:



12. Cuando choca un electrón con un positrón en determinadas condiciones, la masa total de ambos se transforma en energía en forma de dos fotones o cuantos de luz, de igual energía. Calcular la energía total producida, expresada en eV
13. La reacción nuclear ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17.59\text{MeV}$ podría utilizarse en un hipotético reactor nuclear de fusión. Si la eficacia global de la central fuera del 15%, ¿qué masa de tritio, por semana, es necesaria para producir una potencia eléctrica de 2000 MW? (Dato: masa atómica del tritio = 3,01700 u) (Sol.: 14,4 kg)
14. La energía de enlace del ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ es 289 MeV. Calcula su masa, en uma. (Busca los datos que necesites)
15. Se ha determinado que el contenido de C-14 de una planta fosilizada es el 22,5% del que existe en las plantas actuales. ¿Cuánto tiempo hace que esa planta estuvo viva? (Dato: T = 5370 años) (Sol.: $1,23 \cdot 10^4$ años)
16. El ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ emite una partícula alfa y da lugar al radon, el cual, a su vez, emite otra partícula alfa y da lugar a un isótopo del polonio. Escribe sus correspondientes desintegraciones. Sabiendo que el periodo de semidesintegración del radon es 3,82 días, ¿cuánto quedará después de 30 días en un recipiente en el que al adquirirlo había 30 g?
17. En el año 1898 Marie y Pierre Curie aislaron 200 mg de radio, cuyo periodo de semidesintegración es 1620 años. A) ¿A qué cantidad han quedado reducidos en la actualidad los 200 mg iniciales? B) ¿Qué % se habrá desintegrado dentro de 500 años?
18. La potencia radiada por el Sol es $4 \cdot 10^{25}$ W. Si esa potencia es consecuencia del proceso nuclear conocido por el ciclo *protón-protón*, ($4\text{p} \rightarrow \alpha + 2\text{e}^+_{-1}$) determinar el ritmo con que disminuye la masa del Sol y el tiempo necesario para que se produzca una disminución del 1%. Masa del Sol: $1,98 \cdot 10^{30}$ Kg. (Sol.: unos $4,45 \cdot 10^8$ kg/seg; $1,41 \cdot 10^{12}$ años)
19. El Sol emite, cada minuto, una cantidad de energía igual a $2,34 \cdot 10^{28}$ J. Hallar cuánto tiempo tardará la masa del Sol en reducirse a la mitad, suponiendo que la radiación permanece constante. Masa del Sol: $1,98 \cdot 10^{30}$ (Sol.: $7,23 \cdot 10^{12}$ años)
20. Determinar la energía mínima que ha de tener un rayo gamma para desintegrar un núcleo de He^4 en un núcleo de He^3 y un neutrón. (Busca los datos que necesites)
21. El potasio es un elemento muy abundante en el mundo marino y su contenido en el agua del mar es 0,38 g/l. El potasio natural tiene un 0,01112% de ${}^{40}_{19}\text{K}$. A partir de esos datos, calcular la actividad específica del agua del mar en milicurios/litro. (T = $1,28 \cdot 10^9$ años) (Sol.: $3 \cdot 10^{-10}$ Ci/l)

CUÁNTICA

Hacia finales del siglo XIX la mentalidad positivista de la época en el mundo occidental, había llevado a creer que la ciencia en general y la física en particular, darían respuesta a todas las necesidades materiales de la Humanidad, y que el pensamiento racional sería la herramienta para poder construir un mundo más justo e igualitario. La fe en la ciencia y en la física era tal que hubo físicos que se aventuraron a pensar que ya en el siglo XIX la ciencia había tocado su techo, que no quedaba más nada que descubrir y que sólo quedaba a la comunidad científica el afinar detalles en los modelos y teorías. La realidad se mostraría muy diferente a todas estas creencias, y a ello contribuyó el descubrimiento de nuevos fenómenos como el de la radiactividad y el estudio de la radiación electromagnética, frente a los que la mecánica clásica de Newton era del todo incapaz de ofrecer una explicación. El panorama se complicaría aún más con el descubrimiento e interpretación de los espectros atómicos y el renacer de toda una nueva manera de entender el mundo: **LA MECÁNICA CUÁNTICA**, aún hoy día no comprendida del todo en sus fundamentos conceptuales profundos.



El V Congreso de Solvay de 1927 puso los cimientos de la nueva física

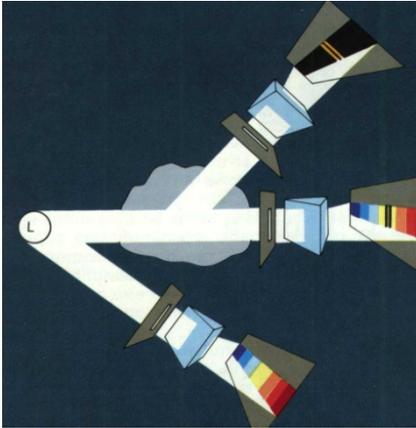
A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R.H. Fowler, L. Brillouin, P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P.A.M. Dirac, A.H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr, I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H.A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson

Nada queda hoy día de esa mentalidad positivista. A lo más un ridículo reducto de lo que fue. Hoy el mundo, el Universo, se nos muestra enigmático (tal vez algo menos, quizás, que a finales del siglo XIX), pero apasionante, estimulante y magnífico. Los avances en astrofísica o en biología están resituando a la especie Humana en el lugar de la Creación que le corresponde, apartada de todo el antropocentrismo de antaño. Hoy sabemos que los ecos del posible (y cuestionado) Big Bang que dio origen al Universo late en los átomos de que estamos hechos. El camino hasta llegar ahí no ha sido fácil, y aún queda mucho recorrido por hacer.

Vamos a abordar ahora otro de los frentes abiertos en la física de comienzos del siglo XX: la radiación electromagnética y la estructura atómica.

10. TEORÍA CUÁNTICA DE LA LUZ

El estudio de la luz lleva a la física moderna por dos caminos diferentes: por un lado el de detectar el movimiento absoluto de la Tierra respecto del éter que proponían las teorías clásicas y que influyó decisivamente en el resurgimiento de la teoría de la relatividad de Einstein. Otro camino nos lleva de forma más indirecta a la teoría cuántica.



Respecto al tema de la luz, a comienzos del siglo XX se disponía de gran cantidad de conocimientos experimentales. Newton había demostrado que la luz del Sol podía descomponerse mediante un prisma dando un espectro de varios colores; y justamente este espectro "de arco iris" había sido obtenido examinando la luz de todos los sólidos y líquidos incandescentes (metales fundidos).

Muy posteriormente, las técnicas espectroscópicas mejoraron sustancialmente, y en la actualidad, cabe hacer una clasificación de las diferentes clases de espectros en dos grupos: **espectros de emisión** y **espectros de absorción**.

Cuando una masa de gas recibe energía, los átomos que los constituyen quedan excitados energéticamente, de modo que al cesar la excitación, "devuelven" la energía absorbida. El registro espectroscópico de esa energía devuelta constituye el espectro de emisión. Por el contrario, cuando se dirige un haz energético sobre una masa de gas y se analiza ese mismo rayo tras cruzarla, se observan que "faltan" algunas líneas en el espectro de su "luz" (respecto de la radiación inicial). Ese análisis constituye el espectro de absorción.

Precisamente, el estudio detallado de los espectros de las sustancias, constituyó la base en la que se iniciaría parte de la revolución que viviría la física de comienzos de este siglo. De hecho, **fueron tres los acontecimientos fundamentales que obligaron a los físicos a remodelar las ideas de la física clásica con la que tan contentos estaban: la radiación térmica, el efecto fotoeléctrico y el carácter discontinuo de los espectros atómicos.**

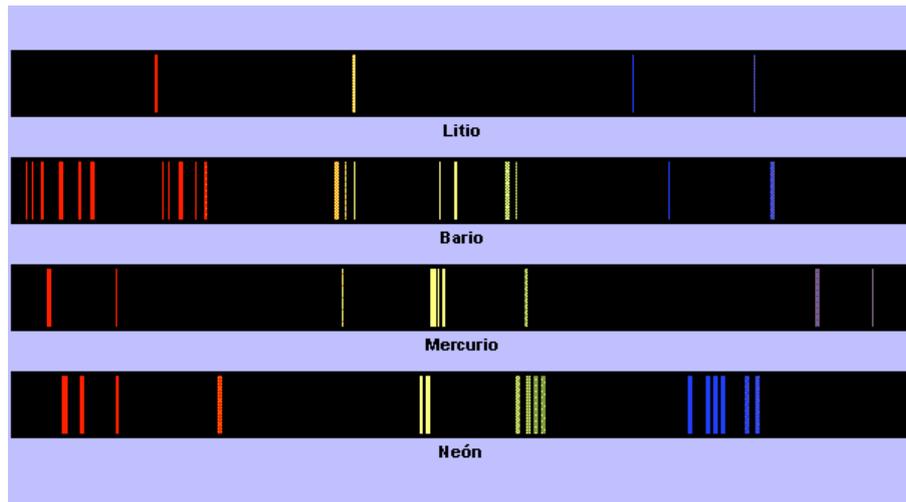
10.1 Radiación Térmica y Teoría de Planck.

Cuando la luz incide sobre un cuerpo cualquiera, una parte es absorbida por él y otra parte o bien se refleja en la superficie o bien atraviesa el cuerpo. Los detalles particulares de este proceso para cada cuerpo concreto se manifiestan por ejemplo en su color. Un objeto de color blanco refleja casi toda la radiación que recibe, mientras que uno de color negro absorbe casi toda ella.

Esta interacción entre los cuerpos y la luz NO se restringe a la luz visible, sino que se extiende a todo el espectro electromagnético.

Color	Intervalo de λ en angstroms
Rojo	6100 a 7500
Naranja	5900 a 6100
Amarillo	5700 a 5900
Verde	5900 a 5700
Azul	4500 a 5000
Violeta	aproximadate. 4000 a 4500
(Infrarrojo)	Mayor de 7500
(Ultravioleta)	Menor de 4000

Por otra parte, los cuerpos NO sólo responden a la radiación que les llega. **También ellos emiten.** Lo que sucede es que, a las temperaturas ordinarias, la mayor parte de la energía que radian se emite en longitudes de onda propias del infrarrojo o más largas, es decir, NO ES VISIBLE. Las gafas de visión nocturna no son otra cosa que detectores de infrarrojos.

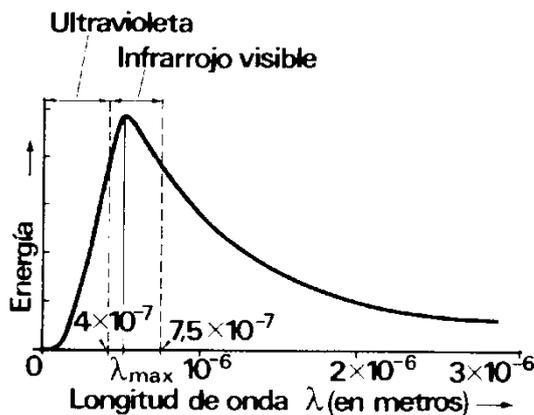


Espectros de algunos elementos químicos

Para conseguir que un cuerpo emita luz visible es necesario elevar su temperatura por encima de los 600-700°C; es decir, llevarlo a incandescencia. Por ejemplo, un bloque de hierro de color negro adquiere un color rojizo a medida que aumenta su temperatura, pasando posteriormente a un rojo vivo, y para temperatura más alta, al llamado "rojo blanco". Ese mismo cambio de color se puede apreciar en el filamento de una bombilla. También el color de la luz de las mayores fuentes de radiación conocidas, las estrellas, está relacionado con la temperatura.

La radiación que proviene de un cuerpo es la suma de la radiación propia y la que refleja. Si se desea estudiar únicamente la EMISIÓN propia es preciso aislar al cuerpo de algún modo. Esta dificultad desaparece si el cuerpo absorbe toda la radiación que recibe. Los objetos de color negro poseen en gran medida esa propiedad. Pero, ¿qué hay más negro que una habitación sin ventanas a oscuras?

Éste es el modelo de **cuerpo negro ideal**: una cavidad de paredes muy absorbentes con una pequeña abertura en una de sus paredes. Cualquier radiación que entre en la cavidad será, casi con toda certeza, absorbida por las paredes antes de que pueda salir de ella. De este modo, se puede asegurar que la radiación que salga por la abertura tiene su origen en las paredes de la cavidad, esto es, se trata de emisión propia.



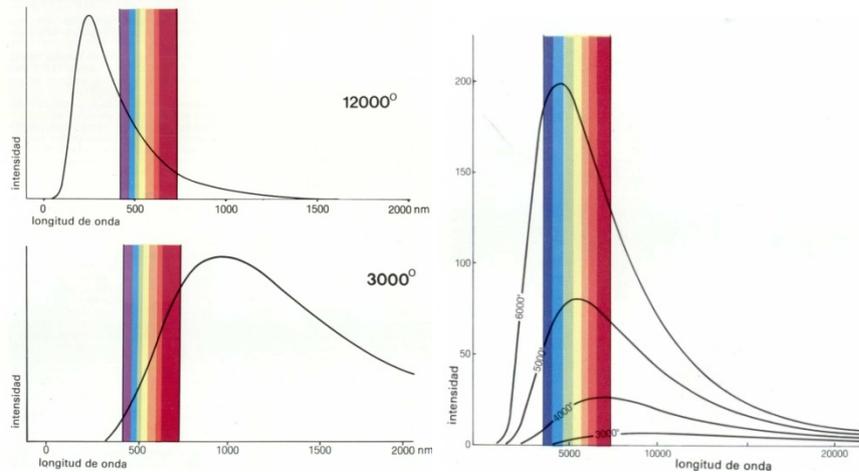
El espectro y la cantidad de radiación que emite un cuerpo depende en general del material del que está hecho. Sin embargo, en los cuerpos negros ideales esto no es así: no importa cuál sea el material del que estén hechas las paredes ni la forma de la cavidad.

La forma de describir la radiación emitida por un cuerpo es una función llamada **distribución espectral**. Esta función, para un valor fijo de la temperatura nos informa de cómo se reparte la intensidad de energía procedente del cuerpo entre las distintas longitudes de onda (ver figura adjunta).

El área encerrada por la curva y el eje de abscisas es igual a la intensidad total de energía emitida por el cuerpo a esa temperatura. Variando la temperatura del cuerpo cambia la forma de distribución espectral, desplazándose el máximo (longitud de onda en la que se emite **la mayor cantidad de energía**) **hacia longitudes de onda más cortas**.

Para intentar deducir, en base a un modelo teórico de comportamiento, la forma de estas curvas de distribución, se supuso que los "emisores" que constituyen la pared de la cavidad pueden oscilar con una energía cuyo valor puede ser cualquiera que esté comprendido entre 0 e ∞ .

Con esta hipótesis, se deduce una ley que se adapta bastante bien a la curva observada experimentalmente (ver figura), pero sólo en las zonas de **BAJAS FRECUENCIAS** (valores altos de λ) pero fracasa estrepitosamente en la zona de las altas frecuencias, donde prevé una emisión de energía infinita, lo que se llamó **la catástrofe ultravioleta**, ya que ningún cuerpo puede emitir infinita energía. En definitiva, las leyes y teorías físicas de finales del siglo XIX eran incapaces de explicar de modo completo y satisfactorio, la emisión de energía por radiación.



Los datos exactos de las curvas reales de distribución fueron resumidos, de forma experimental, por el físico alemán **Wilhem Wien** en 1893 en la denominada **ley del desplazamiento** que en parte establece que para un emisor perfecto de espectros continuos, el producto de la λ (en cm) correspondiente a un máximo por su temperatura absoluta (en K) es una constante con el valor empírico de $0,2897 \text{ cm} \cdot \text{K}$:

$$\lambda_{\text{máx}}(\text{cm}) \times T(\text{K}) = 0,0029 \text{ m.k}$$

Por ejemplo, $\lambda_{\text{máx}}$ para el Sol es, aproximadamente, $5,5 \cdot 10^{-7}$. Así resulta que $T = 500 \text{ K}^4$

Dado que la ley de Wien es aproximadamente válida para los intervalos extremos de temperatura, podemos, en seguida, hacer algunos cálculos sorprendentes: se analiza la radiación de estrellas distantes para determinar el valor de $\lambda_{\text{máx}}$. Así se determina, aproximadamente, la temperatura superficial de las estrellas. Para las estrellas "calientes", cuyo valor de $\lambda_{\text{máx}}$ es pequeño y corresponde al extremo azul del espectro o incluso más allá, las temperaturas son más altas que la del Sol. Las estrellas "más frías" (rojizas) tienen valores mayores de $\lambda_{\text{máx}}$ y por tanto T es menor.

Igualmente, para la radiación del cuerpo negro rige otra ley experimental, denominada **ley de Stefan-Boltzman**, que regula la energía total emitida por un cuerpo negro, por unidad de tiempo y superficie:

$$E_{\text{total}} = \sigma \cdot T^4$$

siendo $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ la denominada "**constante de Boltzman**".

Q5. ¿Qué longitud de onda corresponde al pico del espectro de la radiación emitida por un cuerpo negro a 300 K (temperatura ambiente)? ¿Sería visible?

Q6. ¿Qué rango de temperatura tendrían estrellas como Vega o Antares? (Dato: λ_{rojo} : de 6100 a 7500 angstrom; λ_{azul} : de 4500 a 500 angstrom)

El problema de hallar qué mecanismo hace que los átomos radiantes produzcan la distribución de energía de la radiación del cuerpo negro lo resuelve en el año 1900 el físico alemán **Max Planck** en un trabajo que presenta a la Sociedad Alemana de Física de Berlín, y en donde anuncia haber hallado una ecuación empírica que se ajusta a las curvas experimentales. Sin embargo, Planck no estaba muy satisfecho con su trabajo, ya que para deducir su ecuación había tenido que hacer algunas hipótesis que chocaban frontalmente con la concepción física de la realidad en vigor en esos momentos: se inicia aquí la nueva física de nuestro siglo.

⁴Sin embargo, esta cifra es algo baja, en parte porque la radiación del Sol es parcialmente absorbida por nuestra atmósfera, sobre todo en las longitudes de onda cortas, por lo que el valor real de $\lambda_{\text{máx}}$ es algo menor; y también porque el Sol no es una superficie negra ideal, a la que pueda aplicarse con toda precisión la ecuación de Wien.



Planck admite que:

- Cada átomo se comporta como un pequeño oscilador y que cada uno oscila con una frecuencia dada ν .
- Cada átomo puede absorber o emitir energía de radiación en una cantidad proporcional a su frecuencia ν :

$$E = h \nu$$

La constante (h) de Planck es una constante universal, de valor $6,6256 \cdot 10^{-34}$ J.s

El trabajo de Planck supone que la energía se emite o se absorbe en "paquetes" (a los que denominó "cuantos"). Es decir, la energía "está cuantizada", no puede transferirse de modo aleatorio o continuo, sino como múltiplos enteros de esos "cuantos", de valor individual $h \cdot \nu$.

Q7. Determina la frecuencia y el valor del cuanto de energía que corresponde a un oscilador que emite radiación en una longitud de onda en el vacío que corresponde a 4000 Å

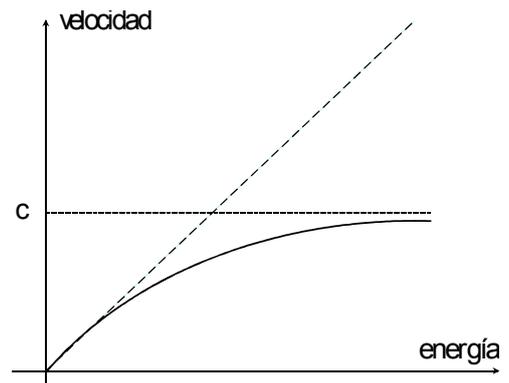
Una de las consecuencias que se derivan de las ideas de Planck es que la "luz está cuantizada", siendo emitida o absorbida por los osciladores en "paquetes" que son múltiplos enteros del cuanto de energía. Sin embargo, el reconocimiento de que la teoría clásica de la luz necesitaba una profunda revisión vino de la mano de una nueva experiencia: el efecto fotoeléctrico, que junto con el efecto Compton, contribuyeron a establecer la concepción actual de la luz, a la que se atribuye un comportamiento dual como onda y como corpúsculo. Cada uno de estos fenómenos nombrados, se estudiarán un poco más adelante en este tema.

11. "CUANDO LA MECÁNICA CLÁSICA YA NO SIRVE": Fenómenos mecánicos que NO se explican con la física de Newton

La mecánica clásica permite interpretar la mayor parte de los movimientos que realiza un cuerpo cuando sobre él actúa (o no) alguna fuerza, pudiendo prever, incluso, los efectos de esas fuerzas, posiciones, etc. Sin embargo, la mecánica de Newton no fue capaz de explicar ciertas experiencias que se desarrollaron a finales del siglo pasado y comienzos de este. Esas experiencias estaban relacionadas con el movimiento de las llamadas "partículas elementales".

11.1. ¿Hay límites de velocidad?

Según la mecánica clásica, no existe (en principio) ningún límite para la velocidad que puede adquirir un cuerpo. Si se ejerce una fuerza constante sobre un objeto, conforme pasa el tiempo, su velocidad va en aumento, y nada en las ecuaciones que se conocen en la mecánica newtoniana, nos indica que esta velocidad no pueda seguir creciendo.



Cuando se realizan experiencias con electrones, sometidos a diferencias de potencial y se les provocan aumentos de velocidad, cabe esperar un resultado como el aparecido en la gráfica (línea de trazos). Sin embargo, los resultados experimentales demuestran que la curva resultante es en realidad la que se indica en trazo continuo, donde se puede apreciar que la velocidad NO crece linealmente, sino que se estabiliza a medida que aumenta la energía, hasta alcanzar un valor cercano al de la velocidad de la luz.

En principio, puede parecer que las ecuaciones de Newton son erróneas. No es eso: el principio de conservación de la energía mecánica sigue siendo perfectamente válido; lo que sucede es que toda la energía que se ha comunicado para acelerar a los electrones NO HA SIDO UTILIZADA para incrementar la velocidad

de éstos. Se precisa establecer una nueva expresión para ese principio de conservación, encontrando asimismo la relación que existe entre energía y velocidad cuando esa velocidad sea muy alta.

11.2 Dos protones chocan entre sí.

Lo anterior, no es lo único que pone de manifiesto la insuficiencia de la mecánica clásica para situaciones "límite" que rozan la velocidad de la luz. También el estudio de los choques evidencia ciertas contradicciones que la mecánica clásica no puede resolver.

Estudiemos el choque entre dos protones⁵. Supondremos que, inicialmente, uno de ellos está en reposo. Podremos suponer que el choque que se produce es perfectamente elástico, pudiendo aplicar los principios de conservación que ya conocemos.

Veamos cuáles son las previsiones de la mecánica clásica para un choque de estas características. Por un lado, ha de conservarse la energía cinética, esto es que $E_c(i) = E_c(1) + E_c(2)$. Por otro lado, ha de conservarse la cantidad de movimiento:

$$\vec{p}_i = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

Como $E_c = \frac{1}{2} m v^2$ y $\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}$ se puede poner que $E_c = p^2/2m$ de donde

$$\frac{p_i^2}{2m} = \frac{p_1^2}{2m} + \frac{p_2^2}{2m} \Rightarrow p_i^2 = p_1^2 + p_2^2$$

y como recordaremos que

$$\vec{p}_i = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$$

resulta que

$$p_i^2 = (\vec{p}_i \cdot \vec{p}_i) = (\vec{p}_1 + \vec{p}_2) \cdot (\vec{p}_1 + \vec{p}_2) = p_1^2 + 2 \cdot \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 + p_2^2$$

Teniendo presente todo lo anterior, para que se verifique esta última ecuación, es necesario que el producto

$$\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 = 0$$

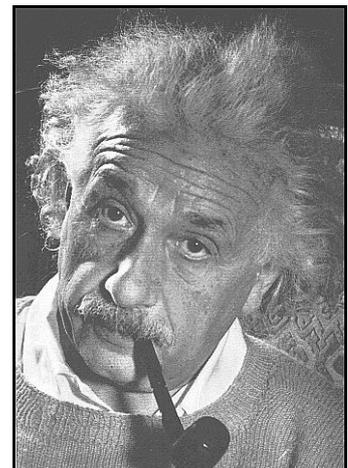
de donde concluimos que los vectores \vec{p}_1 y \vec{p}_2 son perpendiculares entre sí.

Sin embargo, estas previsiones teóricas sólo son ciertas cuando la velocidad con que incide el protón que penetra en la cámara de burbujas es relativamente baja. Cuando se trata de protones que se mueven a velocidades cercanas a la de la luz, el ángulo que forman los dos vectores es menor que 90°. Esto se debe, de nuevo, a que las expresiones de la mecánica clásica para los principios de conservación no son las adecuadas: hace falta una remodelación de la mecánica.

12. MECÁNICA RELATIVISTA: un nuevo punto de enfoque.

Ya en su época, Galileo estableció que las leyes de la dinámica deben ser las mismas en todos los sistemas de referencia, si se mueven con velocidad constante unos con respecto a otros. Esto es lo que constituye la esencia del conocido "principio de relatividad de Galileo". Sin embargo la luz es una excepción a este principio, ya que su velocidad de propagación es constante, independientemente del sistema de referencia elegido.

En sistemas de referencia inerciales, como sabemos, la mecánica clásica sigue siendo válida. Sin embargo, a raíz de lo último que hemos estudiado, cuando se contemplan velocidad es cercanas a la de la luz, parece "que algo falla" y es necesaria una revisión. Esto es lo que hizo **Albert Einstein**.



⁵Los choques entre protones ofrecen la facilidad de poderse visualizar muy fácilmente en cámaras de burbujas, lo que hace relativamente fácil su estudio". Además, disponer de protones en un laboratorio de física no es ningún inconveniente.

En el año 1905, el principio de relatividad especial de Einstein, enuncia como postulados, que

- Todas las leyes de la Naturaleza deben ser las mismas para observadores inercias, es decir, que se mueven con velocidad constante unos respecto de otros. Si lo anterior es así, resulta que NO es posible detectar el movimiento absoluto y uniforme.
- La velocidad de la luz es la misma, medida en cualquier sistema de referencia inercial.

Estos postulados van en contra de algunas conclusiones de la mecánica clásica y choca frontalmente con la relatividad de Galileo. Así, por ejemplo, una persona que midiera la velocidad de la luz de un foco de un tren que se moviera a, por ejemplo, 10 000 km/h, seguiría obteniendo el resultado de $c = 3 \cdot 10^8$ km/s (la velocidad de la luz, c) y NO $c + v$.

12.1. Revisión de conceptos: Masa, energía y cantidad de movimiento.

Las modificaciones que introduce la teoría de Einstein son importantes y relevantes cuando las velocidades de los objetos con los que se trabaja son cercanas a la de la luz. En "la vida práctica" la mecánica clásica siendo una excelente aproximación.

Sin embargo, existe en física un extenso campo, el de las partículas elementales, en donde se consiguen con relativa facilidad las velocidades cercanas a las de la luz, ya que las partículas con las que se trabaja son de muy pequeña masa. Ahí las teorías de Einstein juegan un papel crucial. De hecho, ya en 1902 se observó que la masa del electrón cambia con su velocidad.

Einstein observó que la ecuación fundamental de la mecánica

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

sólo era válida si se expresaba la cantidad de movimiento en la forma

$$\vec{p} = \frac{m_0 \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

donde m_0 representa la masa de la partícula en reposo.

Para simplificar la escritura, lo anterior suele ponerse como

$$\vec{p} = \frac{\vec{p}_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

o bien como

$$\vec{p} = \Gamma \cdot m_0 \cdot \vec{v}$$

donde $\beta = v/c$ y

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Así, la expresión que nos proporciona la cantidad de movimiento puede escribirse como

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

donde

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

es la masa relativista.

Con esta nueva reformulación de la cantidad de movimiento, la **energía cinética ha de calcularse de otro modo**. Ese modo, incluye cálculo integral, que da como resultado final que

$$E_c = (m - m_0) c^2$$

El primer término de la ecuación anterior, mc^2 , depende de la velocidad de la partícula. El segundo, no. Ese segundo término, m_0c^2 , recibe el nombre de energía en reposo (E_0).

Si no tenemos presente la energía potencial que la partícula pudiera tener, la energía total que la partícula tendría sería la suma de la energía cinética $((m-m_0)c^2)$ y la energía en reposo (m_0c^2); esto es:

$$E = E_c + m_0c^2 = mc^2 = \Gamma m_0c^2$$

Q11. ¿Con qué velocidad debe moverse una partícula para que su momento lineal sea m_0c ? Determina la energía total de la partícula en ese supuesto.

Sol.: $v = (2^{1/2}/2)c$; $E_t = \sqrt{2} m_0c^2$

Q8. Estudia la expresión de la masa relativista y observar para qué valores $m \approx m_0$

Q9. ¿Por qué para un electrón en un acelerador de partículas su masa varía. ¿Cuándo será mayor la masa del electrón, en reposo o en movimiento cercano a la de la luz?

Q10. Para una partícula elemental, ¿en cuánto varía su masa al moverse a una velocidad $v = 0.5 c$? ¿Aumenta o disminuye?

Si la partícula se mueve a velocidad cercana a la de la luz, β tiende al valor 1 y Γ tiende a crecer indefinidamente. Por tanto, la energía cinética de la crece indefinidamente, y ya que la E_c de un cuerpo es igual al trabajo realizado por las fuerzas exteriores

sobre el mismo (teorema de las fuerzas vivas), será necesario comunicar una energía infinita para alcanzar la velocidad de la luz. Esto nos indica que cualquier partícula con masa, no podrá alcanzar jamás la velocidad de la luz.

A partir de las ecuaciones anteriores, pueden deducirse algunas relaciones importantes.

Veamos.

Ya que

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \Rightarrow \Gamma^2 \cdot (1-\beta^2) = 1$$

como

$$E = \Gamma \cdot m_0 \cdot c^2$$

$$p = \Gamma \cdot m_0 \cdot v = \beta \cdot \Gamma \cdot m_0 \cdot c$$

$$\Gamma = \frac{E}{m_0 \cdot c^2}$$

resulta

$$\beta = \frac{p}{m_0c \cdot \frac{E}{m_0c^2}} = \frac{p \cdot c}{E}$$

sustituyendo estos valores

$$\Gamma^2 \cdot (1-\beta^2) = 1$$

$$\frac{E^2}{(m_0c^2)^2} \cdot \left(1 - \frac{p^2c^2}{E^2}\right) = 1.$$

de donde resulta que

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2}$$

Esta última ecuación es fundamental en mecánica relativista, ya que en los experimentos con partículas elementales es más fácil medir la cantidad de movimiento de éstas que su velocidad, por lo menos en partículas cargadas, ya que ellas pueden ser desviadas por campos magnéticos. De este modo, el radio de curvatura nos proporciona una medida indirecta del valor de la cantidad de movimiento de la partícula.

La última ecuación, también puede ponerse del modo

$$E^2 - (pc)^2 = (m_0c^2)^2 = E_0^2$$

Según esto, la energía en reposo de una partícula E_0 es constante, independientemente del sistema de referencia elegido. Por ello, la expresión

$$E^2 - (pc)^2$$

es igualmente constante.

Hay que observar que según lo anterior, si la partícula en estudio tiene masa nula (las veremos más adelante) resulta que $E = pc$ y con ello

$$\beta = \frac{p \cdot c}{E} = 1$$

Esto supone que una partícula de masa en reposo nula **DEBE ESTAR SIEMPRE EN MOVIMIENTO, CON UNA VELOCIDAD IGUAL A LA DE LA LUZ.**

Q12. El bevatrón es un acelerador de protones que puede comunicar a éstos una energía cinética de 10^{-9} J. Determina la variación de masa que experimentan estas partículas.

Q13. Si se comunica a una partícula en reposo una energía cinética igual a n veces su energía en reposo, determina cuál será su velocidad y su cantidad de movimiento.

(Sol.: $v = c \sqrt{1 - 1/(n+1)^2}$; $p = (n+1) \sqrt{1 - 1/(n+1)^2} m_0 c$)

12.2. Otras unidades.

Dadas las relaciones anteriores, para "el mundo de las partículas elementales" resulta más conveniente expresar la energía que la partícula lleva asociada. Una unidad habitual en estos terrenos del mundo cuántico es el electronvoltio⁶ (eV) y el MeV (megaelectronvoltio). De este modo, ya que la energía en reposo de una partícula viene dada por $E_0 = m_0c^2$, para un protón, (de masa $m_0 = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg) por ejemplo, tendremos que $E_0 = 1,504 \cdot 10^{-10}$ J, o sea, 939 MeV.

Según lo anterior, podemos expresar la masa en MeV/c^2 , en lugar de expresar la energía en MeV. Así, resulta que para el cálculo anterior que $m_p = 939 \text{ MeV}/c^2$. Así, expresar la energía en reposo de una partícula en MeV o su masa en MeV/c^2 es prácticamente equivalente. Esto nos evita el engorro de trabajar con kg y manejar exponenciales, donde es fácil errar.

Q14. Comprobar que el MeV/c^2 es una unidad de masa, mientras que el MeV/c es de cantidad de movimiento.

Q15. La masa en reposo de un electrón es $9,109 \cdot 10^{-31}$ kg, y la del neutrón es $1,6784 \cdot 10^{-27}$ kg. Determina su energía en reposo en julios y en MeV.

13. FOTONES: partículas sin masa. EFECTO FOTOELÉCTRICO

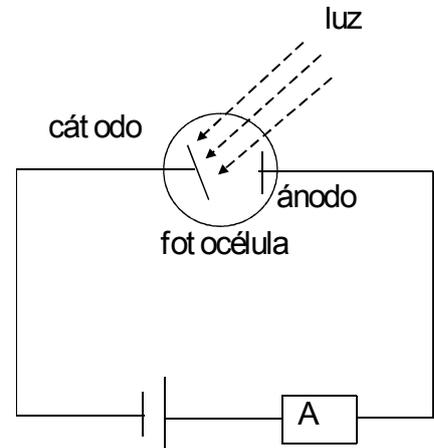
Por una ironía, el primer paso que condujo al descubrimiento del denominado efecto fotoeléctrico y al reconocimiento de que la teoría clásica de la luz necesitaba una revisión fundamental, fue una observación incidental recogida por Hertz durante la investigación experimental que proporcionó la prueba más contundente en favor de la teoría electromagnética clásica de Maxwell. En 1887, investigando la descarga eléctrica entre dos electrodos usada como fuentes de ondas electromagnéticas, Hertz observó que la intensidad de la descarga aumentaba cuando se iluminaba los electrodos con luz ultravioleta. Se vio también que la radiación ultravioleta tenía el efecto de arrancar cargas negativas de la superficie limpia de un metal y que eran esas cargas las que ayudaban a mantener una corriente transitoria adecuada entre los electrodos. De hecho, se vio un año después que ciertas sustancias (en particular los metales alcalinos) mostraban el mismo efecto con luz visible. Se pudo comprobar que el aire NO intervenía en el proceso.

⁶Como recordarás, el electronvoltio es la energía que adquiere un electrón al someterlo a una ddp de un voltio. $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

La figura muestra el esquema de una **fotocélula**. Consta esencialmente de un cátodo fotosensible (sensible a determinados "tipos de luz", fabricado de metales alcalinos o sus óxidos) y de un ánodo o placa metálica dentro de una ampolla de vidrio con un elevado vacío. Al incidir luz sobre el cátodo, arranca electrones, que son atraídos por el ánodo positivo, originándose una corriente eléctrica que se detecta fácilmente.

De experiencias de este estilo, se dedujeron una serie de leyes experimentales:

- El efecto fotoeléctrico es prácticamente instantáneo, es decir, al iluminar el cátodo, se detecta instantáneamente la corriente, la cual cesa al suprimir la iluminación.
- La intensidad de corriente (carga de electrones emitidos por unidad de tiempo) es proporcional a la intensidad de la luz incidente.
- La energía (y velocidad) de los fotoelectrones sólo depende de la frecuencia de la luz, pero no de su intensidad. Los fotoelectrones de masa m extraídos del cátodo por efecto de la luz incidente poseen una energía cinética inicial. Para determinar la energía máxima, se aplica a los electrodos una ddp de signo opuesto que se va incrementando hasta que anule por completo la corriente fotoeléctrica. En tales condiciones, se verifica que $V_0 \cdot e = \frac{1}{2} m v_{máx}^2$ donde V_0 es el "**potencial de detención**" (o potencial de frenado)
- Para cada metal del cátodo, hay una frecuencia mínima (denominada frecuencia umbral) por debajo de la cual NO se produce emisión fotoeléctrica, cualquiera que sea la intensidad de la radiación.



Estas leyes experimentales (sobre todo la última) NO podían explicarse según la concepción ondulatoria de la luz. Fue A. Einstein quien, en 1905, estableció de modo contundente la hipótesis que permitió explicar el efecto fotoeléctrico. Por ello recibiría el Premio Nobel (y no por sus teorías de la relatividad)⁷.

Los trabajos de A. Einstein sobre el efecto fotoeléctrico, establecen que en las interacciones con la materia, una onda electromagnética de frecuencia f puede ser considerada como un conjunto de partículas (a las que Einstein denominó **fonones**), cada uno de ellos "portadores" de una energía igual a $E = h \cdot f$ (siendo f la frecuencia de la radiación y h la cte. de Planck).

El fotón así descrito, es una partícula sin masa y sin carga, que por lo tanto ha de moverse continuamente a la velocidad de la luz.

Según las ideas de Einstein, una luz muy intensa es aquella que posee muchos fonones. Sin embargo, cada fotón posee una energía determinada que sólo depende de la frecuencia de la radiación luminosa.

Para explicar el efecto fotoeléctrico, admitía que cada fotón del haz choca con un electrón. Si la energía del fotón es suficiente, entonces arranca el electrón del átomo; en caso contrario, no podrá hacerlo. Por más que se aumente la intensidad del haz (y por tanto el número de fonones) **si cada uno de ellos** no posee por sí mismo la energía suficiente, NO se arrancarán electrones y no tendrá lugar el efecto fotoeléctrico.

Este hecho (y su interpretación correspondiente) dieron por sentado definitivamente **el carácter dual de la luz**.

La energía del fotón que incide, ha de emplearse de dos formas: extraer el electrón (venciendo la atracción del metal, **trabajo de extracción, W**) y dotarlo luego de velocidad (de energía cinética). Por ello, puede escribirse que

$$h \cdot f = E_c + W$$

W es característico de cada metal.

⁷A. Einstein era de origen judío. En su época, en los "preparatorios" de la 2ª guerra mundial, no era una "decisión acertada" otorgar el premio nobel a un científico judío que había dado a conocer unas teorías que buena parte de los "físicos ortodoxos" alemanes, fundamentalmente, no entendían. También en esto de los Premios Nobel, las presiones políticas y sociales están fuertemente presentes: "no es tan bonito como nos lo pintan"

Teniendo presente que el efecto fotoeléctrico sólo tiene lugar para energías superiores a la frecuencia umbral, podemos escribir que $W = h \cdot f_0$ con lo que lo anterior nos queda del modo:

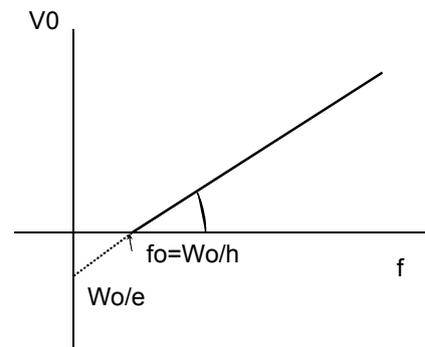
$$E_c = h(f - f_0)$$

expresión que se conoce con el nombre de **ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico**.

Teniendo presente la idea de "potencial de detención" anteriormente señalada, podremos escribir que:

$$V_0 \cdot e = hf - W_0$$

por lo que variando la frecuencia, podemos obtener una serie de valores del potencial V_0 . Si la última expresión es correcta, el gráfico de los valores de V_0 frente a f debe ser una recta. Esto es exactamente lo que se obtiene.

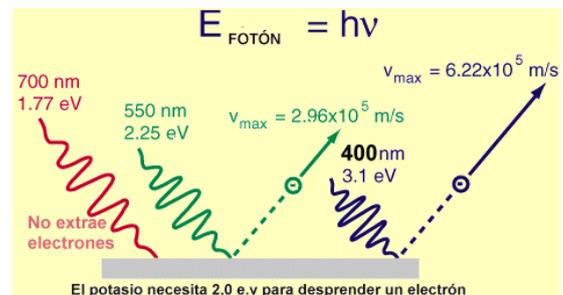


Si prolongamos la recta, corta al eje de ordenadas en un punto que corresponde con el valor W_0/e (el cual se obtiene sin más que hacer cero la frecuencia en la ecuación anterior).

Por tanto:

$$\tan \alpha = \frac{W_0}{e} \cdot \frac{h}{W_0} = \frac{h}{e}$$

Midiendo α y utilizando el valor conocido de la carga e podemos volver a determinar la constante de Planck. El resultado es el mismo que el hallado para la radiación del cuerpo negro, lo cual constituye una justificación más de la hipótesis de Planck.

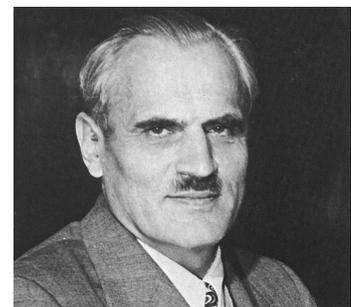


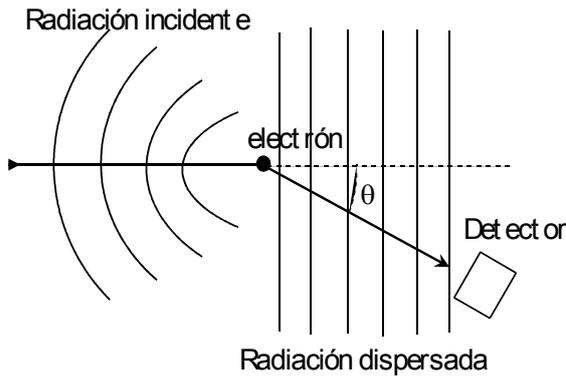
- Q16.** Un electrón arrancado al hierro, cuya energía de extracción es de 4,8 eV, posee una energía cinética de 4 eV. Calcula la frecuencia mínima capaz de extraer ese electrón y la de la radiación usada.
- Q17.** Si se duplicara la frecuencia de la radiación que incide sobre una placa metálica, ¿se duplicaría la energía cinética de los electrones emitidos? Explicación.
- Q18.** La energía que se necesita para extraer un electrón del sodio es de 2,4 eV. ¿Podemos producir el efecto fotoeléctrico para el sodio con luz anaranjada, cuya longitud de onda es 6700 Å?
- Q19.** Al incidir sobre el potasio un haz de luz de 3000 Å, los electrones emitidos poseen una energía cinética máxima de 2,05 eV. Determina la energía del fotón incidente y la energía de extracción del potasio.

14. EFECTO "COMPTON"

En el año 1923, el físico norteamericano **A. H. Compton** (1892-1962; foto) descubrió que un haz de rayos X de 0,71 Å de longitud de onda era dispersado al cruzar una región en donde existían electrones. Este descubrimiento desencadenó nuevos conocimientos sobre los fotones.

Los rayos X, como sabemos, son radiación electromagnética cuya frecuencia es más elevada que la de la radiación visible. La experiencia de Compton sólo se explica **suponiendo que los FOTONES pueden "chocar" con los electrones**, siendo dispersados por éstos. La particularidad de este fenómeno está en que la frecuencia de la radiación dispersada es MENOR que la de la radiación incidente.





Si llamamos λ a la longitud de onda incidente y λ' la de la dispersada, Compton encontró experimentalmente que la diferencia $\lambda' - \lambda$ sólo depende del ángulo de dispersión θ formado por la dirección de la radiación incidente y la dirección en la que se observan las ondas dispersadas (ver figura) según la expresión

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$$

donde λ_c es una constante cuyo valor, determinado experimentalmente, tiene un valor de $\lambda_c = 2,42 \cdot 10^{-12} \text{ m}$, y conocida con el nombre de longitud de onda de Compton para electrones.

Por las características de las partículas que intervienen, está claro que el estudio de esta colisión ha de hacerse utilizando la mecánica relativista. A partir de esto, la dispersión de una onda electromagnética por un electrón se puede interpretar como el "choque" entre la onda y el electrón en donde se conservaran tanto la energía como el momento lineal. Además, de las ecuaciones relativistas que venimos utilizando se desprende que una de las partículas que colisionan tiene en reposo masa nula y se mueve con velocidad igual a c (recordar que en estos casos, vimos que $E = pc$).

Analizando el choque, y teniendo presente los principios de conservación de la energía y cantidad de movimiento, escribiremos que (conservación de la energía):

$$E_0 + hf = \sqrt{E_0^2 + p^2 c^2} + hf'$$

donde E_0 es la energía en reposo del electrón, hf es la energía correspondiente al fotón incidente, hf' la que corresponde al fotón dispersado, y $(E_0^2 + p^2 c^2)^{1/2}$ es la energía del electrón tras salir arrancado del blanco, debido a la interacción.

Del mismo modo (conservación del momento lineal):

$$\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}'$$

donde \vec{p} es la cantidad de movimiento del fotón inicial, \vec{p}' la del fotón dispersado y \vec{p}_e la correspondiente al electrón.

Ya que para el fotón

$$E = pc \Rightarrow hf = pc \Rightarrow h \frac{c}{\lambda} = pc \Rightarrow p = \frac{h}{\lambda}$$

si resolvemos el sistema formado por los principios de conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, se obtiene que

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{f'} = \frac{h}{m_e \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \theta)$$

Como recordamos que $\lambda = c/f \Rightarrow c = \lambda \cdot f$ se deduce de lo anterior que

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos \theta)$$

por lo que se deduce que necesariamente

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c}$$

Así, midiendo λ_c , m_e y c , se puede calcular el valor de h , obteniéndose el mismo valor encontrado para la constante de Planck.

Por tanto, después de todo esto, se puede explicar la dispersión de la radiación electromagnética por un electrón libre si se identifica el proceso con un choque entre un electrón libre y una partícula de masa en reposo nula, el

fotón, que posee una energía $E = h \cdot f$ y un momento lineal dado por $p = E/c = h/\lambda$ antes de la colisión y una energía $E' = h \cdot f'$ y un momento $p' = h/\lambda'$ después de la colisión.

Como se ha visto, las explicaciones del efecto Compton han requerido, las siguientes suposiciones:

- la radiación electromagnética hace las veces de una partícula de masa en reposo nula, que denominamos fotón.
- la dispersión de la radiación electromagnética por un electrón libre se puede considerar como un choque entre el electrón y un fotón.
- La energía y el momento lineal del fotón están relacionados con la frecuencia y la longitud de onda de la radiación electromagnética por $E = hf$ y $p = h/\lambda$; esto es, asociamos el fotón a una onda electromagnética.

Q20. Rayos X de 1 Å son dispersados mediante un bloque de carbón. La radiación dispersada se observa a 90° del haz incidente. A) Determinar el desplazamiento Compton $\Delta\lambda$; B) ¿Qué cantidad de energía cinética se comunica al electrón que rebota? (Suponer tratamiento clásico con $E_0 = 0$)

Q21. Un fotón cuya energía es de 15 keV choca con un electrón libre en reposo y sale dispersado. Si el ángulo de dispersión es de 60° , calcula cuánto varía la energía, frecuencia y longitud de onda del fotón.

Q22. Un fotón de 10^{-11} m de longitud de onda, experimenta la dispersión Compton en una muestra de silicio. La radiación dispersada tras el proceso lo es en una dirección perpendicular a la dirección de incidencia. Determina la longitud de onda que corresponde a la radiación dispersa del movimiento de los electrones de retroceso. (Sol.: $1,243 \cdot 10^{-11}$ m; $2,4 \cdot 10^4$ eV; 128° con la dirección del fotón dispersado)

15. ASOCIACIÓN "ONDA-PARTÍCULA"

Los fenómenos de difracción e interferencia (que ya se vieron en el tema de movimiento ondulatorio) pueden ser aplicados y explicados considerando la luz como una onda, con todas las propiedades de éstas. Sin embargo, para explicar la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o el efecto Compton, se necesita una nueva teoría: **la teoría corpuscular de la radiación**.

Cada una de estas interpretaciones justifica una serie de experiencias y permite armonizar, tras siglos de disputa, las concepciones corpuscular y ondulatorias de la luz, defendidas, respectivamente por Newton y Huygens en siglo XVII: para longitudes de onda entre 10^{-3} y 10^3 m, la imagen ondulatoria concuerda perfectamente con los hechos experimentales. En la región del visible, ambas descripciones son posibles dependiendo del tipo de fenómeno observado. Cuando la longitud de onda disminuye hasta órdenes del angstrom o inferiores, la descripción fotónica es la más adecuada. Sin embargo, conforme las técnicas experimentales se fueron haciendo más precisas, se comprobó que la naturaleza de la luz es más sutil. Simultáneamente presenta la conducta ondulatoria y corpuscular, aunque en unos fenómenos predomina más una sobre otra. El marco teórico de la conexión de ambas teorías lo constituye la mecánica cuántica.

Aceptando, por tanto, el carácter corpuscular de la radiación, ¿por qué no pensar en un posible comportamiento ondulatorio de la materia?

15.1. Naturaleza Ondulatoria de la Materia.

Luis de Broglie (foto) se licenció en historia en la Universidad de París. Sin embargo, mantenía con su hermano (que era físico) profundas discusiones sobre problemas científicos. Esto le hizo plantearse adentrarse en la física, y en su tesis doctoral plantea ya que al igual que los fotones presentan un comportamiento dual, como ondas y como partículas, la materia debía presentar también el mismo comportamiento.

De Broglie estableció la hipótesis de que las partículas materiales tienen asociadas una onda; y no sólo eso, sino que como pura especulación asignó una longitud de onda a estas ondas hipotéticas. Supuso que la longitud de onda de las ondas



materiales debería venir dada por la misma relación aplicable a la luz, es decir, $\lambda = h/p$ que relaciona la longitud de onda de una onda luminosa con el momento de los fotones asociados a ella.

Predijo que:

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

donde m es la masa de la partícula.

Las ideas de De Broglie fueron posteriormente confirmadas experimentalmente, y hoy en día se acepta sin reservas **el carácter dual de la materia y de las partículas elementales**.

La evidencia más directa de las ondas de materia lo dio la observación de la difracción de haces de partículas tales como los electrones y neutrones. Las figuras de la difracción coincidían con las que cabría esperar si se asocian a las partículas una onda con la longitud de onda de De Broglie.

La naturaleza ondulatoria de la materia se pone de manifiesto cuando la longitud de onda de las partículas es un poco mayor que las dimensiones de los obstáculos con los que tropieza, ya que entonces las ondas asociadas a esas partículas se difractan en ellos con facilidad.

Los electrones revelan su naturaleza ondulatoria si su longitud de onda es del orden de las dimensiones atómicas y los neutrones cuando es del orden del tamaño del núcleo.

Podemos comprender, por tanto, por qué tardó tanto tiempo en descubrirse la naturaleza ondulatoria de la materia. Se precisan las masas más pequeñas que existen, como las partículas atómicas, para que su longitud de onda asociada sea lo suficiente grande para que se puedan observar en la materia fenómenos derivados de su naturaleza ondulatoria.

Q23. ¿Qué longitud de onda debe tener un haz de electrones cuya energía cinética es de 100 eV?

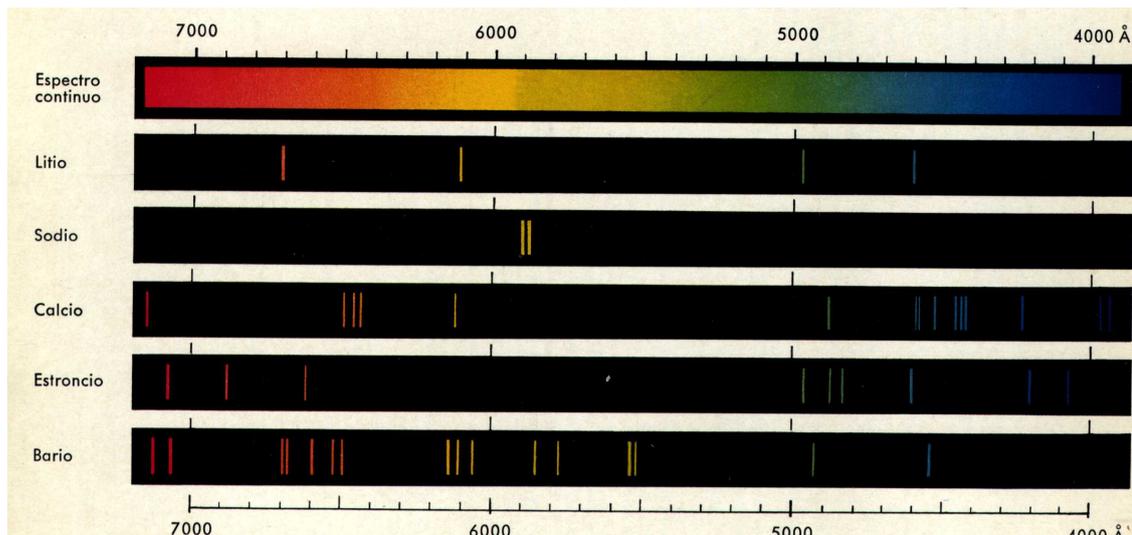
(Sol.: 1,2 Å)

Q24. Determina la longitud de onda de De Broglie correspondiente a una pelota de tenis que se mueve a 190 km/h (en un saque) si su masa es de 90 g. Calcula también la que corresponde a un tren de mercancías de 1000 toneladas que marcha a 150 km/h.

16. ESPECTROS DISCONTÍNUOS

Como vimos unas páginas anteriores, el estudio de los espectros continuos de emisión, llevó a Planck a formular su hipótesis cuántica en el año 1900. Nos referimos entonces sólo a los espectros producidos por sólidos o líquidos incandescentes. **Esos espectros dependían sólo de la temperatura de la fuente, pero no de su composición química.** Y naturalmente, fue precisamente este carácter universal de los espectros de emisión el que atrajo la atención de Planck y le hizo sospechar la existencia de una ley fundamental de la física. Una vez identificadas las características generales de esta ley (al menos provisionalmente) y comprobado su éxito en la interpretación del efecto fotoeléctrico, veamos ahora cómo podía aplicarse a los problemas más específicos de la estructura atómica. Con este objeto, volvamos a otro tipo de espectro.

Desde hacía tiempo, se sabía que los gases y vapores emiten luz cuando son "excitados" mediante una chispa o arco eléctrico. Además, resultaba que la luz así emitida, cuando se descomponía mediante un espectroscopio, daba un espectro notable y fundamentalmente diferente de los espectros continuos de emisión de los sólidos y líquidos incandescentes; los gases y vapores tienen espectros de emisión de rayas, discontinuos, es decir, en lugar de una banda de colores variables del tipo "arco iris", sólo presentaban luz en algunas longitudes de onda bien definidas con espacios oscuros entre ellas. Visto con un espectroscopio, el espectro aparece como un conjunto de líneas irregularmente repartidas, muy brillantes unas, y otras menos.



Otro punto de diferencia con respecto a los espectros continuos de emisión, es que los espectros de emisión de líneas **SON MARCADAMENTE DIFERENTES PARA ELEMENTOS DISTINTOS**. Cada sustancia tiene su propio sistema característico de longitudes de onda en toda la región observable. Algunos materiales revelan un espectro de emisión complejo, otros son mucho más simples: el vapor de hierro, por ejemplo, muestra unas seis mil líneas brillantes, mientras que el vapor de sodio tiene sólo dos rayas intensas amarillas próximas en la región visible. La gran variedad de sistemas de rayas y sus separaciones parecía completamente inexplicable: ¿por qué los gases emiten espectros de rayas y por qué elementos íntimamente relacionados presentan sistemas de líneas tan diferentes? Todo esto estaba destinado a permanecer como un auténtico enigma durante casi tres generaciones. De cualquier modo, cada material podía identificarse a partir de su espectro de emisión de rayas.

De todos estos hechos, surgió inmediatamente, la necesidad de encontrar alguna regularidad entre las líneas que conforman.

16.1. Trabajos de Balmer.

En 1884, el profesor suizo, **Johann Balmer**, estudiando la zona del espectro de emisión del hidrógeno correspondiente a la zona visible, halló una expresión que, sin ningún soporte teórico, permitía calcular las longitudes de onda de las líneas visibles del hidrógeno. Esa expresión es ya conocida de un curso anterior:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left[\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right]$$

donde R es una constante, de valor $1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$ y n un número natural cuyo valor ha de ser superior a 2.

Al perfeccionarse las técnicas espectroscópicas, se encontró que existían más **series de líneas en el espectro del hidrógeno**. Se hallaron nuevas series en el ultravioleta (serie de **Lyman**) y en el infrarrojo (serie de **Paschen** y **Brackett**). Todas las expresiones para determinar la posición (la longitud de onda) de esas líneas pueden ser sintetizadas en la ecuación final:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left[\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right]$$

donde $n_i < n_f$ siendo ambos números enteros.

Esta expresión (*empírica*) no justifica, en absoluto por qué los gases emiten espectros a rayas. De nuevo, las teorías clásicas sobre emisión de radiación son incapaces de explicar estos hechos, y mucho menos, demostrar la validez de las fórmulas anteriores.

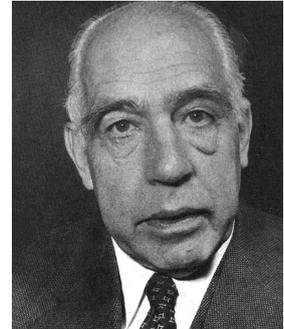
El hecho de que cada elemento químico presente una serie de líneas características, permitió sospechar más adelante, que tales espectros debían estar íntimamente relacionados con la estructura interna de la materia.

De acuerdo con lo que sabemos a estas alturas del curso, el modelo atómico de Rutherford no era estable, ya que los electrones, al girar alrededor del núcleo poseen aceleración centrípeta y de acuerdo con las leyes del electromagnetismo, han de irradiar energía electromagnética. Si perdiese energía, el electrón perdería velocidad y terminaría cayendo en el interior del núcleo, lo que no sucede. Esto no lo explicaba Rutherford ni por qué el átomo emite sólo en determinadas longitudes de onda.

16.2. Primeros intentos de explicación: modelo de Bohr.

El origen de los espectros era desconocido hasta que la teoría atómica asoció la emisión de radiación por parte de los átomos con el comportamiento de los electrones, y específicamente con la distancia a la que éstos se hallan del núcleo.

Uno de los primeros intentos de armonizar los conocimientos sobre los espectros del átomo de hidrógeno y un modelo de átomo que fuera consistente con ellos, fue obra del danés **N. Bohr**. En un intento de solucionar el asunto, en 1913, Bohr propuso un nuevo modelo atómico basado en tres postulados:



1º) Las órbitas (circulares) estables para el electrón tienen la propiedad de que cuando el electrón se encuentra en ellas, no emite ni absorbe energía. En ellas, "no se cumple la ley electromagnética" de que toda carga acelerada emite energía radiante.

$$k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r}$$

2º) De todas las órbitas posibles para el electrón, sólo son estables aquellas que cumplen la condición matemática

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

el número **n** es un **número natural** (1,2,3...) y puesto que "cuantizaba" las órbitas, lo denominó **número cuántico principal**. En función de los valores de n, las diferentes "órbitas" a ellos correspondientes, fueron denominándose con las letras K, L, M, N, P, Q, ...

3º) El electrón excitado No emite energía de forma continua al regresar a su órbita estable, sino que lo hace a pequeños saltos, denominados "saltos en cascada", en cada uno de estos saltos, se emite radiación que deja una huella en el espectro.

Combinando las versiones matemáticas de estos tres postulados se llega fácilmente al hecho de la cuantización del radio

$$r = n^2 \cdot \frac{h^2}{4\pi \cdot K \cdot m \cdot e^2}$$

Y por otro lado, dado que la energía del electrón en su órbita es la suma de la cinética y potencial (eléctrica) se llega a

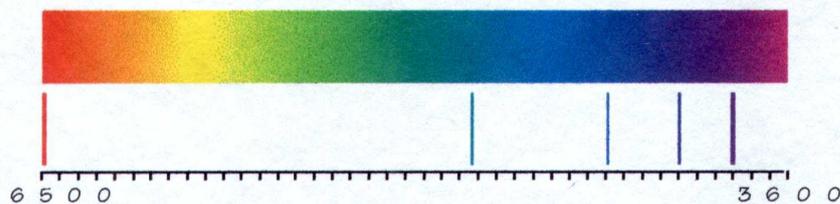
$$E = -\frac{1}{2} \cdot \frac{K \cdot e^2}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot K^2 \cdot m \cdot e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Esto es, la energía del electrón en la órbita está cuantizada, y su valor depende de los posibles valores de n.

El hecho de que sólo se observen determinadas longitudes de onda es otra prueba más de que **la energía de los electrones está cuantizada**, y que por lo tanto, el electrón sólo adquiere ciertos valores de energía, que se corresponden con las órbitas permitidas.

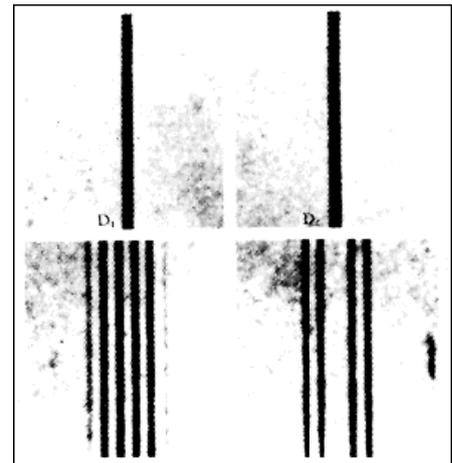
SALTOS	SERIE LYMAN		SERIE BALMER		SERIE PASCHEN	
	ENERGÍA (eV)	λ (Å)	ENERGÍA (eV)	λ (Å)	ENERGÍA (eV)	λ (Å)
desde n = 2	10,23	1212	-----	-----	-----	-----
desde n = 3	12,12	1023	1,89	6563	-----	-----
desde n = 4	12,79	970	2,56	4845	0,67	18514
desde n = 5	13,09	948	2,86	4337	0,97	12788
desde n = 6	13,26	935	3,03	4094	1,14	10881
desde n = 7	13,36	928	3,13	3963	1,24	10004
desde ∞	13,64	909	3,41	3638	1,52	8161

ESPECTRO VISIBLE CONTÍNUO Y ESPECTRO DE EMISIÓN DEL HIDRÓGENO:



En cada salto de nivel, el electrón emite (o absorbe) un fotón de energía, de valor $h \cdot f$, predicho por Planck. De nuevo, la concordancia entre predicción y experimento, constituyó un firme soporte de las ideas cuánticas de Planck y su aplicación a la explicación de los espectros discontinuos en gases.

El modelo de Bohr sólo explica adecuadamente el comportamiento del átomo de hidrógeno, e incluso cuando las técnicas espectroscópicas mejoraron, cada línea del espectro de hidrógeno, se veía desdoblada (ver efectos Zeeman y Zeeman anómalo del curso pasado). Las ideas de Bohr se muestran del todo insuficiente para átomos de más de un electrón ($Z > 1$).

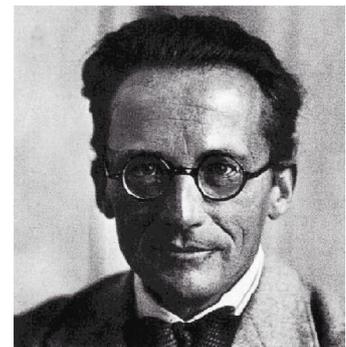


17. GENERALIZACIÓN.

Los resultados obtenidos por De Broglie dieron un rotundo vuelco a la concepción física de la realidad. En 1926, el físico austríaco **E. Schrödinger** desarrolló una teoría matemática de las propiedades atómicas, en la que la cuantización que corresponde a los niveles de energía está relacionada con los valores permitidos que corresponden a las longitudes de onda del electrón. Esta teoría, conocida como "**Mecánica Ondulatoria**", era en realidad, una generalización de los postulados de N. Bohr.

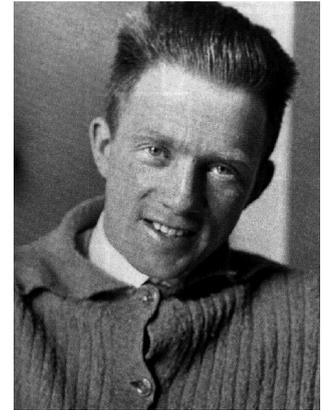
Schrödinger (en la foto) establecía en su teoría una serie de postulados, de los que era posible deducir una ecuación que explicaba el comportamiento de los electrones en cualquier átomo o molécula. Sin embargo, esa ecuación es extremadamente compleja de resolver, y sólo se ha hecho con cierto éxito en el caso de átomos con pocos electrones.

La principal dificultad, tanto de esta teoría como de los postulados de De Broglie, estriba precisamente en determinar qué es lo que vibra. No se trata del electrón, concebido como una partícula puntual, sino que hay que pensar en que el electrón se dispersa por la órbita, moviéndose simultáneamente con velocidades muy diferentes. Compatibilizar esto con un electrón puntual, cuya



carga y masa es posible medir experimentalmente, resulta verdaderamente complicado.

Fue **W. Heisemberg** quien desarrolló una nueva teoría, conocida como "**Mecánica de Matrices**", en la que ofrecía una serie de reglas para calcular las frecuencias y las intensidades de las líneas espectrales en las que sólo utilizaba relaciones entre magnitudes observables. Esa teoría era capaz de ofrecer los mismos resultados que la mecánica de Schrödinger. Sin embargo, pronto se vio que ambas teorías eran matemáticamente equivalentes. Actualmente, se consideran como dos formas alternativas de una única teoría: "**La Mecánica Cuántica**".



Un modo de caracterizar **las consecuencias que la mecánica cuántica** introduce en la física es el denominado **principio de incertidumbre de Heisemberg**. En el año 1927, Heisemberg postuló que **ciertas propiedades de las partículas NO pueden ser medidas simultáneamente de forma exacta**. Cuanto mayor sea la precisión en la medida de una de esas magnitudes, con menor precisión se medirá la otra, y viceversa. De hecho, **es imposible medir con precisión simultáneamente la posición y la cantidad de movimiento de una partícula**, ya que el producto de sus imprecisiones es siempre mayor que una cantidad constante, función de la constante de Planck:

$$\delta x \cdot \delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Esta indeterminación **es inherente a la propia realidad**, por lo que en el mundo macroscópico también existe. Sin embargo, el pequeño valor de la constante de Planck explica que sólo deba ser tenido en cuenta en el mundo microscópico.

A veces, se ha interpretado **ERRÓNEAMENTE** que el principio de incertidumbre es "una limitación experimental", es decir, que debido a la parquedad de los instrumentos de medida, es imposible obtener datos con "exactitud", libre de incertidumbre. Nada de eso: la indeterminación es algo propio, inherente, a la propia Naturaleza. Esto ha tenido profundas repercusiones en el terreno de la filosofía, y de hecho, hoy en día, "la filosofía se hace en los laboratorios y despachos de los físicos teóricos".

El principio de indeterminación también se aplica a la energía y al tiempo; es imposible determinar ambas magnitudes simultáneamente con precisión, debido a la restricción:

$$\delta E \cdot \delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

Ello hace de la física una ciencia mucho menos determinista de lo que cabría esperar, habituados a las "precisiones" del mundo macroscópico. Por lo mismo, es una ciencia mucho más sugestiva y mucho más hermosa.

PROBLEMAS RESUELTOS Y PROPUESTOS

1. Una radiación monocromática que tiene una longitud de onda en el vacío de 600 nm y una potencia de 0,54 W, penetra en una célula fotoeléctrica de cátodo de cesio cuyo trabajo de extracción es de 2,0 eV. Determina :

- El número de fotones por segundo que viajan con la radiación.
- La longitud de onda umbral del efecto fotoeléctrico para el cesio.
- La energía cinética de los electrones emitidos.
- La velocidad con que llegan los electrones al ánodo si se aplica una diferencia de potencial de 100 V.

Datos :

Velocidad de la luz en el vacío	$c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Valor absoluto de la carga del electrón	$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
Masa del electrón	$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$
Constante de Planck	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$

DATOS

$$\lambda = 600 \text{ nm} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$P = 0,54 \text{ W}$$

$$W_{\text{extr}} = 2,0 \text{ eV} = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

a)

$$P = 0,54 \text{ W} = 0,54 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

$$E_{\text{fotón}} = h \frac{c}{\lambda} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} = 3,315 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{fotón}}$$

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ fotones}}{\text{s}} = \frac{0,54 \frac{\text{J}}{\text{s}}}{3,313 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{fotón}}} = 1,63 \cdot 10^{18} \frac{\text{fotones}}{\text{s}}$$

$$\frac{\text{N}^\circ \text{ fotones}}{\text{s}} = 1,63 \cdot 10^{18} \frac{\text{fotones}}{\text{s}}$$

b)

$$W_{\text{extr}} = h \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow \lambda_0 = \frac{h \cdot c}{W_{\text{extr}}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{3,2 \cdot 10^{-19}} = 6,21 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$W_{\text{extr}} = 6,21 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

c)

$$h \frac{c}{\lambda} = W_{\text{extr}} + E_c$$

$$E_c = h \frac{c}{\lambda} - W_{\text{extr}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} - 3,2 \cdot 10^{-19} = 1,15 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

$$E_c = 1,15 \cdot 10^{-20} \text{ J}$$

d)

$$\frac{1}{2} m v^2 + e \Delta V = \frac{1}{2} m v'^2 \Rightarrow \frac{1}{2} m v'^2 = 1,15 \cdot 10^{-20} + 1,6 \cdot 10^{-17} \Rightarrow v' = 5,93 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v' = 5,93 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2. Considere las longitudes de onda de De Broglie de un electrón y de un protón. Razone cuál es menor si tienen:

- a) El mismo módulo de la velocidad.
b) La misma energía cinética.

Suponga velocidades no relativistas.

a)

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_e}$$

$$\lambda_p = \frac{h}{m_p v_p}$$

será Si las velocidades son iguales $v_e = v_p$, la relación entre las longitudes de onda de de Broglie

$$\frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{m_p}{m_e}$$

Como

$$m_p > m_e \Rightarrow \frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{m_p}{m_e} > 1 \Rightarrow \lambda_e > \lambda_p$$

$$\lambda_e > \lambda_p$$

b)

La misma energía cinética $E_{c_e} = E_{c_p} = E_c$

$$E_c = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2} m_p v_p^2$$

$$v_e^2 = \frac{2E_c}{m_e} \Rightarrow v_e = \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}} \Rightarrow \lambda_e = \frac{h}{m_e v_e} = \frac{h}{m_e \sqrt{\frac{2E_c}{m_e}}} = \frac{h}{\sqrt{2E_c m_e}}$$

$$v_p^2 = \frac{2E_c}{m_p} \Rightarrow v_p = \sqrt{\frac{2E_c}{m_p}} \Rightarrow \lambda_p = \frac{h}{m_p v_p} = \frac{h}{m_p \sqrt{\frac{2E_c}{m_p}}} = \frac{h}{\sqrt{2E_c m_p}}$$

Como

$$m_p > m_e \Rightarrow \frac{\lambda_e}{\lambda_p} = \frac{\frac{h}{\sqrt{2E_c m_e}}}{\frac{h}{\sqrt{2E_c m_p}}} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}} > 1 \Rightarrow \lambda_e > \lambda_p$$

$$\lambda_e > \lambda_p$$

3. Calcula el defecto de masa y la energía total del enlace del isótopo $^{15}_7\text{N}$ de masa atómica 15,0001089 u. Calcula la energía de enlace por nucleón.

Datos: Masa del protón $m_p = 1,007276 \text{ u}$; Unidad de masa atómica $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$
 Masa del neutrón $m_n = 1,008665 \text{ u}$; Velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$

DATOS



$$M_a = 15,0001089 \text{ u.}$$

$$Z = \text{N}^\circ \text{ atómico} = \text{n}^\circ \text{ de protones} = 7$$

$$A = \text{n}^\circ \text{ de protones} + \text{n}^\circ \text{ de neutrones} = \text{n}^\circ \text{ de nucleones} = 15$$

$$A - Z = \text{n}^\circ \text{ de neutrones} = 15 - 7 = 8$$

a) El Nitrógeno $^{15}_7\text{N}$ contiene en el núcleo 7 protones y 8 neutrones. Para calcular el defecto de masa producido en la formación de ese núcleo, restaremos la masa del núcleo a la suma de las masas de todas las partículas que constituyen el núcleo por separado

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) m_n - M_a$$

$$\Delta m = 7 \cdot 1,007276 \text{ u} + 8 \cdot 1,008665 \text{ u} - 15,0001089 \text{ u} = 0,120144 \text{ u} \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}}{1 \text{ u}}$$

$$= 1,99 \cdot 10^{-12} \text{ Kg}$$

$$\Delta m = 1,99 \cdot 10^{-12} \text{ Kg}$$

Para calcular la energía equivalente aplicaremos la ecuación de Einstein $E = \Delta m \cdot c^2$

$$E = 1,99 \cdot 10^{-12} \text{ Kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 1,79 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

$$E = 1,79 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

b)

$$\frac{\text{Energía}}{\text{nucleón}} = \frac{E}{A} = \frac{1,79 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{15} = 1,19 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$\frac{E}{A} = 1,19 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

4. El período de semidesintegración del estroncio-90 es de 28 años. Calcula:

a) Su constante de desintegración y la vida media.

b) El tiempo que deberá transcurrir para que una muestra de 1,5 mg se reduzca un 90%

DATOS

$t_{1/2} = 28$ años

Inicial = 1,5 mg $\Rightarrow N_0 = n^\circ$ de átomos iniciales

Final = 0,1. 1,5 mg $\Rightarrow N = n^\circ$ de átomos finales = 0,1. N_0

a)

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \Rightarrow k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{28} = 0,0247 \text{ años}^{-1}$$

$$k = 0,0247 \text{ años}^{-1}$$

$$\tau = \frac{1}{k} = \frac{1}{0,0247} = 40,39 \text{ años}$$

$$\tau = 40,39 \text{ años}$$

b)

$$N = N_0 e^{-kt}$$

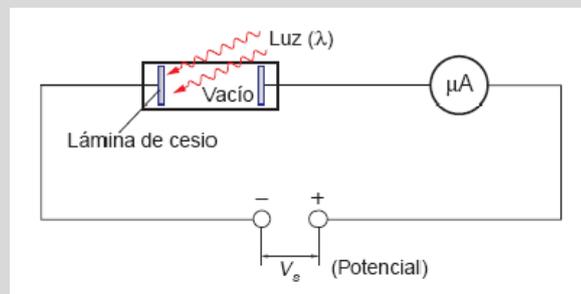
$$0,1 N_0 = N_0 e^{-40,39 \cdot t}$$

$$\ln 0,1 = -40,39 \cdot t$$

$$t = \frac{-40,39}{\ln 0,1} = 17,54 \text{ años}$$

$$t = 17,54 \text{ años}$$

5. El circuito de la figura se usa para estudiar el efecto fotoeléctrico.



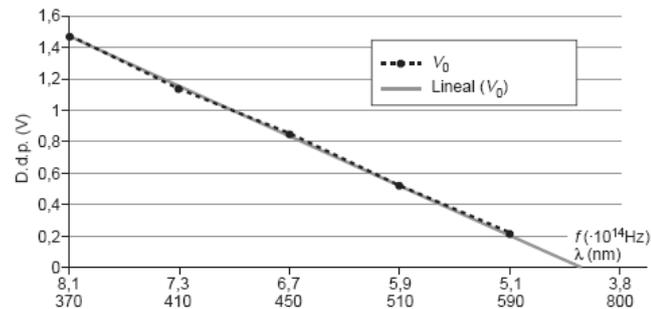
El cátodo de cesio se ilumina con luz monocromática de diferentes longitudes de onda. El potencial de frenado V_0 se ajusta hasta que la corriente medida se anula. Los resultados obtenidos son los que se ofrecen en la tabla

λ (nm)	590	510	450	410	370
V_0 (V)	0,22	0,54	0,86	1,13	1,46

Dibujar una gráfica en la que se aprecie cómo varía V_0 en función de la frecuencia de la radiación incidente.

A partir de la gráfica, obtener la frecuencia umbral del cesio, la constante de Planck y el trabajo de extracción de un electrón del cesio.

a) Al representar los datos en función de f y λ , resulta:



En el gráfico, la línea gris es la interpolación lineal de los valores experimentales obtenidos.

b) La ecuación del efecto fotoeléctrico es:

$$h \cdot f = W_{ext} + E$$

La frecuencia umbral es aquella para la cual el fotón tiene una energía igual al trabajo de extracción. Por tanto, para la frecuencia umbral:

$$h \cdot f_0 = W_{ext} \rightarrow E = e \cdot V = 0 \rightarrow V = 0$$

Como vemos, a la frecuencia umbral, el potencial de frenado es nulo; si prolongamos la recta hasta que corte en el eje de abscisas ($V = 0$), según se muestra en la interpolación lineal, obtenemos la frecuencia (o longitud de onda) umbral:

$$\lambda_0 \approx 720 \text{ nm} \rightarrow f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \approx 4,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Para calcular el trabajo de extracción y la constante de Planck, hemos de aplicar la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico a dos de los casos (tomaremos los dos primeros, por ejemplo):

$$h \cdot f_1 = W_e + e \cdot V_1 \quad ; \quad h \cdot f_2 = W_e + e \cdot V_2$$

De esta forma, se tiene un sistema de ecuaciones que permite determinar el valor que corresponde a cada una de las dos magnitudes pedidas. Restando miembro a miembro la primera ecuación de la segunda y sacando factor común:

$$h \cdot (f_2 - f_1) = e \cdot (V_2 - V_1)$$

Despejando h y sustituyendo valores:

$$h = \frac{e \cdot (V_2 - V_1)}{f_2 - f_1} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (0,54 - 0,22)}{5,9 \cdot 10^{14} - 5,1 \cdot 10^{14}} = 6,4 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Si ahora despejamos el trabajo de extracción, por ejemplo, de la segunda de las ecuaciones, resulta:

$$W_e = h \cdot f_2 - e \cdot V_2 = 6,4 \cdot 10^{-34} \cdot 5,9 \cdot 10^{14} - 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,54 = 2,912 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,82 \text{ eV}$$

PROBLEMAS CON SOLUCIONES PROPUESTAS
(Buscar los datos de masas y constantes necesarias)

1. Para un metal la frecuencia umbral es de $4,5 \cdot 10^{14}$ Hz. ¿Cuál es la energía mínima para arrancarle un electrón?. Si el metal se ilumina con una luz de $5 \cdot 10^{-7}$ m de longitud de onda. ¿Cuál es la energía de los electrones emitidos y su velocidad?

SOLUCIÓN: $2,98 \cdot 10^{-19}$ J; $9,94 \cdot 10^{-20}$ J; $4,67 \cdot 10^5$ m/s

2. El cátodo de una célula fotoeléctrica es iluminado con una radiación electromagnética de longitud de onda λ . La energía de extracción para un electrón del cátodo es 2,2 eV, siendo preciso establecer entre el cátodo y el ánodo una tensión de 0,4 V para anular la corriente fotoeléctrica. Calcular:

A) La velocidad máxima de los electrones emitidos.

b) Los valores de la longitud de onda de la radiación empleada λ y la longitud de onda umbral λ_0

SOLUCIÓN: a) $3,75 \cdot 10^5$ m/s

b) $\lambda = 4,78 \cdot 10^{-7}$ m; $\lambda_0 = 5,65 \cdot 10^{-7}$ m

3. Sobre la superficie del potasio incide luz de $6 \cdot 10^{-8}$ m de longitud de onda. Sabiendo que la longitud de onda umbral para el potasio es de $7,5 \cdot 10^{-7}$ m. Calcula: a) El trabajo de extracción de los electrones en el potasio; b) La energía máxima de los electrones emitidos.

SOLUCIÓN: a) $2,65 \cdot 10^{-19}$ J

b) $3,05 \cdot 10^{-18}$ J

4. Si en un cierto metal se produce el efecto fotoeléctrico con luz de frecuencia f_0 , ¿se producirá también con luz de frecuencia $2f_0$? Razona la respuesta.

SOLUCIÓN:

Sí y además el electrón arrancado de la superficie del metal tendrá una energía cinética mayor

5. Si se ilumina con luz de $\lambda = 300$ nm la superficie de un material fotoeléctrico, el potencial de frenado vale 1,2 V. El potencial de frenado se reduce a 0,6 V por oxidación del material. Determina:

A. La variación de la energía cinética máxima de los electrones emitidos.

B. La variación de la función de trabajo del material y de la frecuencia umbral.

SOLUCIÓN: a) $-9,6 \cdot 10^{-20}$ J

b) $9,6 \cdot 10^{-20}$ J; $1,45 \cdot 10^{14}$ Hz

6. Los fotones de luz cuya frecuencia es la umbral para un cierto metal tienen una energía de 2 eV. ¿Cuál es la energía cinética máxima, expresada en eV, de los electrones emitidos por ese metal cuando se le ilumina con la luz cuyos fotones tiene 3 eV de energía?

SOLUCIÓN: 1 eV

7. Al iluminar una superficie metálica con una longitud de onda $\lambda_1 = 200 \cdot 10^{-9}$ m, el potencial de frenado de los fotoelectrones es de 2 V., mientras que si la longitud de onda es $\lambda_2 = 2240 \cdot 10^{-9}$ m, el potencial de frenado se reduce a 1 V. Obtenga:

A) El trabajo de extracción del metal

B) El valor que resulta para la constante de Planck, h , a partir de esta experiencia.

SOLUCIÓN: a) $6,4 \cdot 10^{-19}$ J

b) $6,4 \cdot 10^{-34}$ J.s

8. El cátodo metálico de una célula fotoeléctrica se ilumina simultáneamente con dos radiaciones monocromáticas: $I_1 = 228$ nm y $I_2 = 524$ nm. El trabajo de extracción de un electrón de este cátodo es $W = 3,40$ eV. A) ¿Cuál de las radiaciones produce efecto fotoeléctrico. Razone la respuesta; B) Calcule la velocidad máxima de los electrones emitidos. ¿Cómo variaría dicha velocidad al duplicar la intensidad de la radiación luminosa incidente?

SOLUCIÓN:

La $I_1 = 228$ nm, la I_2 no tiene suficiente energía.

$8,5 \cdot 10^5$ m/s. No variaría, sólo aumentaría el número de fotones incidentes.

9. En un experimento fotoeléctrico se iluminó la placa metálica con una radiación $\lambda_1 = 521,8$ nm dando un potencial de detención de 0,596 V, mientras que al iluminarla con una radiación de $\lambda_2 = 656,6$ nm, el potencial de detención era de 0,108 V. Calcula:

A) La función trabajo del metal.

B) La frecuencia umbral.

C) La velocidad máxima de los fotoelectrones.

SOLUCIÓN: a) $2,847 \cdot 10^{-19}$ J

b) $4,31 \cdot 10^{14}$ Hz

c) Para λ_1 la velocidad máxima es $4,58 \cdot 10^5$ m/s y para λ_2 la velocidad máxima es $1,95 \cdot 10^5$ m/s

10. Al iluminar un metal con luz de frecuencia $2,5 \cdot 10^{15}$ Hz se observa que emite electrones que pueden detenerse al aplicar un potencial de frenado de 7,2 V. Si la luz que se emplea con el mismo fin es de longitud de onda en el vacío de $1,78 \cdot 10^{-7}$ m, dicho potencial pasa a ser de 3,8 V. Determine: a) El valor de la constante de Planck; b) La función trabajo (o trabajo de extracción) del metal.

SOLUCIÓN: a) $6,68 \cdot 10^{-34}$ J.s; b) $5,17 \cdot 10^{-19}$ J

11. a) ¿Qué intervalo aproximado de energía (en eV) corresponde a los fotones del espectro visible?
b) ¿Qué intervalo aproximado de longitudes de onda de De Broglie tendrán los electrones en ese intervalo de energías?. Las longitudes de onda del espectro visible están comprendidas, aproximadamente, entre 390 nm en el violeta y 740 nm en el rojo.

SOLUCIÓN: a) 3,1875 eV y 1,68 eV
b) $6,87 \cdot 10^{-10}$ m y $9,47 \cdot 10^{-10}$ m

12. Se acelera desde el reposo un haz de electrones sometiéndoles a una diferencia de potencial de 10^3 Voltios. Calcular:
A) La energía cinética adquirida por los electrones.
B) La longitud de onda de De Broglie asociadas a dichos electrones.

SOLUCIÓN: a) $1,6 \cdot 10^{-16}$ J
b) $3,88 \cdot 10^{-11}$ m

13. Un fotón posee una longitud de onda igual a $2,0 \cdot 10^{-11}$ m. Calcula la cantidad de movimiento y la energía que tiene.

SOLUCIÓN: $3,31 \cdot 10^{-23}$ Kg.m.s⁻¹; $9,94 \cdot 10^{-15}$ J

14. a) Calcula la longitud de onda asociada a un electrón que se propaga con una velocidad de $5 \cdot 10^6$ m s⁻¹.
b) Halla la diferencia de potencial que hay que aplicar a un cañón de electrones para que la longitud de onda asociada a los electrones sea de $6 \cdot 10^{-11}$ m.

SOLUCIÓN: a) $1,45 \cdot 10^{-10}$ m; b) 418,4 V

15. Un núcleo radiactivo tiene una vida media de 1 segundo:

- A) ¿Cuál es su constante de desintegración?
B) Si en un instante dado una muestra de esta sustancia radiactiva tiene una actividad de $11,1 \cdot 10^7$ desintegraciones por segundo.
C) ¿Cuál es el número medio de núcleos radiactivos en ese instante?
Justifica la respuesta.

SOLUCIÓN: a) 1 s^{-1}
b) $11,1 \cdot 10^7$ núcleos

16. ¿A qué se llama vida media de un núcleo inestable? ¿Cuál es la ley de desintegración radiactiva?
¿Qué es una serie radiactiva? Cita una de ellas.

SOLUCIÓN:

Se llama vida media ($\tau = 1/k$) ($k = \text{cte de desintegración}$) de un núcleo inestable al tiempo de vida promedio de todos los núcleos presentes en una muestra. La ley de desintegración radiactiva se puede expresar: $A = A_0 \cdot e^{-kt}$. Siendo "A" la actividad de una sustancia radiactiva
Una serie radiactiva es el conjunto de los núcleos radiactivos que proceden por desintegraciones sucesivas (α ó β) de un mismo núcleo inicial, llamado padre, hasta llegar a un núcleo estable. Por ejemplo la del $^{238}\text{U}_{92}$

17. El período de semidesintegración del polonio-210 es de 138 días. Si disponemos inicialmente de 2 mg de polonio-210. ¿Qué tiempo debe de transcurrir para que queden 0,5 mg?

SOLUCIÓN: 276 días

18. El período de semidesintegración de un núcleo radiactivo es de 100 s. Una muestra que inicialmente contenía 109 núcleos posee en la actualidad 107 núcleos. Calcula:

- a) La antigüedad de la muestra.
b) La vida media.
c) La actividad de la muestra dentro de 1000 s.

SOLUCIÓN: a) 664,5 s b) 144,3 s c) 67,8 núcleos que se desintegran por s

19. Si inicialmente tenemos 1 mol de átomos de radio ¿Cuántos átomos se han desintegrado en 1995 años?.

Datos: El período de semidesintegración del radio: 1840 años

SOLUCIÓN: $3,181 \cdot 10^{23}$ átomos

20. ¿Cómo es posible afirmar que la energía de un fotón es, según Planck $E = h \cdot f$ si la presencia de la frecuencia, f, en la expresión, implica que la luz es una onda?

21. Un fotón de $2 \cdot 10^{-11}$ m de longitud de onda, ¿qué momento lineal posee? ¿Qué energía?

22. Una bombilla incandescente posee una temperatura de 2800 K. Calcula la potencia que irradia por unidad de superficie y la longitud de onda máxima de su espectro.

23. (SELECTIVIDAD) Una superficie de sodio iluminada con luz de 1 A emite fotoelectrones. El trabajo de extracción del sodio es de 2,46 eV. A) Indique el fenómeno físico que rige este proceso y haga un análisis de las transformaciones de energía que en él se producen; B) Calcule la energía cinética, longitud de onda y frecuencia de los fotoelectrones emitidos y la longitud de onda umbral.

24. (SELECTIVIDAD) Un material emite fotoelectrones cuando se ilumina con luz azul, pero no los emite cuando se ilumina con luz amarilla. Razone qué sucederá si se ilumina con: a) luz roja; b) luz ultravioleta

25. (SELECTIVIDAD) Comente las siguientes afirmaciones indicando si son o no correctas: A) Una radiación que no sea monocromática no puede producir efecto fotoeléctrico; B) Cuanto más intensa sea la luz, mayor será la energía cinética de los electrones emitidos por efecto fotoeléctrico
26. (SELECTIVIDAD) Una partícula de 2 mg de masa se deja caer al suelo desde una altura de 2 cm. La energía adquirida en la caída se emite como radiación visible de color verde ($\lambda = 540 \text{ nm}$) A) Haga un análisis energético del problema; B) ¿Cuántos fotones serán emitidos?
27. (SELECTIVIDAD) Una antena emite una onda electromagnética de 50 kHz. A) Calcule su longitud de onda; B) Determine la frecuencia de una onda sonora de la misma longitud de onda.
28. (SELECTIVIDAD) A) ¿Qué se entiende por interferencia de la luz?; B) ¿Por qué no observamos la interferencia de la luz producida por dos faros de un coche?
29. (SELECTIVIDAD LOGSE) A) ¿Qué es una onda electromagnética? B) ¿Cambian las magnitudes características de una onda electromagnética que se propaga en el aire al penetrar en un bloque de vidrio? Si cambia alguna, ¿aumenta o disminuye? ¿Por qué?
30. (SELECTIVIDAD) Un metal, para el que la longitud de onda umbral de efecto fotoeléctrico es de 275 nm, se ilumina con luz de 180 nm. A) Explique el proceso en términos de energía; B) Calcule la longitud de onda, frecuencia y energía cinética de los fotoelectrones.
31. (DE SELECTIVIDAD) El cátodo metálico de una fotocélula se ilumina simultáneamente con dos radiaciones monocromáticas de 228 y 524 nm respectivamente. El trabajo de extracción de un electrón de este cátodo es 3,4 eV. A) ¿Cuál de las radiaciones produce efecto fotoeléctrico? Razone la respuesta.; B) Calcular la velocidad máxima de los electrones emitidos. ¿Cómo varía dicha velocidad al duplicar la intensidad de la radiación luminosa incidente? (Consulta los datos que necesites)
32. (DE SELECTIVIDAD) Dualidad onda-corpúsculo. Ecuación de De Broglie y comentarios sobre su importancia física. Determinar la longitud de onda asociada a un electrón de 50 eV de energía cinética.
33. Determinar la longitud de onda de la radiación que ha de absorber un átomo de hidrógeno para pasar del estado fundamental ($n = 1$) al primer estado excitado ($n = 2$). DATO: $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$
34. Un átomo de hidrógeno está en un estado excitado 2 con una energía de $E_2 = -3.4 \text{ eV}$. Ocurre una transición hacia el estado 1 con una energía $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ y se emite un fotón. Determina la frecuencia de la radiación emitida.
35. Calcular la energía necesaria para disociar completamente en sus partículas constituyentes, 1 gramo del isótopo $^{40}\text{Ca}_{20}$ si su masa atómica es 39,97545 uma (Sol.: $7,73 \cdot 10^{11} \text{ J}$)
36. Calcula la masa de deuterio que requeriría cada día una hipotética central de fusión de 500 MW de potencia eléctrica en la que la energía se obtuviese del proceso 2 Deuterio \rightarrow Helio, suponiendo un rendimiento del 30%. (Sol.: 0,2518 kg)
37. Un neutrón incide sobre un núcleo de deuterio, formándose un núcleo de tritio. El proceso va acompañado de la emisión de un fotón de radiación gamma:
- Escriba la ecuación que corresponde al proceso de desintegración nuclear.
 - Calcula la energía desprendida en el proceso, expresada en eV.
 - ¿Cuántas reacciones de este tipo son necesarias para producir 1 J de energía?
- Datos: $m(^2\text{H}) = 2,014740 \text{ u}$
 $m(^3\text{H}) = 3,017005 \text{ u}$
 $m(n) = 1,008986 \text{ u}$
38. El $^{210}\text{Bi}_{83}$ se desintegra espontáneamente por emisión beta con un período de semidesintegración de 5 días. Inicialmente tenemos 16 g de dicho isótopo. Calcula: a) ¿Qué cantidad quedará al cabo de 15 días?; b) ¿Cuántos protones y neutrones tiene el núcleo que resulta después de dicha emisión? (Sol.: 1,99 g; 84 protones y 126 neutrones)
39. DE SELECTIVIDAD.
Un átomo de sodio, inicialmente en reposo, emite un fotón de luz amarilla ($\lambda = 598 \cdot 10^{-9} \text{ m}$). ¿Cuál es la dirección y el módulo de la velocidad (rapidez) de retroceso del átomo, cuya masa es de $24 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$? NOTA: el fotón posee una cantidad de movimiento dada por $p = h/\lambda$, siendo h (constante de Planck) = $6,61 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- (Sol.: $4,6 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$)
40. Un fotón de $0,951 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ de longitud de onda, interacciona con un electrón, que puede considerarse libre y que inicialmente estaba en reposo. El fotón sufre una dispersión de 180° y modifica su longitud de onda, que pasa a ser 10^{-10} m . Calcula la cantidad de movimiento del electrón tras la interacción y la energía cinética que le corresponde.
- (Sol.: $1,35 \cdot 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m/s}$; 637,6 eV)

41. En una experiencia de difusión de Compton, un fotón de $7,11 \cdot 10^{-11}$ m de longitud de onda interacciona con un electrón que se supone en reposo y libre. El fotón es dispersado en una dirección que forma 90° con la dirección incidente, siendo su nueva longitud de onda de $7,35 \cdot 10^{-10}$ m. Determina la dirección en la que sale el electrón, así como su energía y cantidad de movimiento.

(Sol.: 44° con la inicial del fotón; 568,3 eV; $1,29 \cdot 10^{-23}$ kgm/s)

42. Sobre la Tierra incide la radiación solar a razón de 2 cal/cm².min. ¿A cuántos fotones corresponde esa cifra, suponiendo para la luz solar una longitud de onda media de 5500 Å?

(Sol.: $2,4 \cdot 10^{22}$ fotones/m².s)

El universo, desde una idea alternativa

Medio millar de especialistas mundiales debaten en Madrid los avances de la Teoría de Cuerdas

ALICIA RIVERA - Madrid - 04/07/2007

¿Qué pasó antes del principio de todo, antes del Big Bang? Sí, es una pregunta perfectamente científica; de momento no podemos contestarla, pero es una de esas preguntas que antes era religiosa y que ahora es ciencia", comentaba el físico teórico y premio Nobel David Gross en Madrid, el pasado sábado, poco después de impartir una charla sobre *La revolución que se avecina en física fundamental*.

Él es uno de los máximos expertos en la denominada Teoría de Cuerdas, un atrevido e influyente desarrollo científico que, al menos en el papel, permite profundizar en el conocimiento del universo tanto a la escala cósmica como a la de sus componentes más minúsculos, y avanzar ahí donde la física más convencional -y comprobada- choca con recalcitrantes barreras.

Para muchos investigadores, ese antes del principio sería una pregunta científicamente imposible, una especulación fuera del alcance de cualquier experimento que verifique o descarte una respuesta. Para otros, la ciencia tiene que ser osada, al menos intelectualmente, para ser fructífera. De ideas atrevidas, razonamientos que parecen perturbar el sentido común y soluciones imprevisibles ha estado bien nutrido el congreso Strings 07, que reunió la semana pasada en la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) a 500 físicos teóricos expertos en la denominada Teoría de Cuerdas, Gross entre ellos.

"El Big Bang, la explosión inicial, es algo que no entendemos, porque al extrapolar todo hasta ese punto, hasta el mismo inicio, se pierde el control, la teoría de Einstein se rompe, y las cosas se hacen infinitas", explicó Gross. "Muchas veces en la historia de la física ha habido que cambiar nuestras ideas básicas para abordar preguntas que parecían imposibles. Uno de esos problemas ahora es el origen del universo, y sospecho que vamos a tener que cambiar nuestra comprensión del espacio-tiempo; a lo mejor resulta que el antes del principio tiene así una respuesta simple".

Tal vez muchas ideas de física van a cambiar en este siglo XXI, tal vez hayan empezado ya a cambiar. Al menos algo así se intuía en las sesiones de Strings 07, la edición de este año de la cita mundial de los especialistas en esa Teoría de Cuerdas, definida como la alternativa más desarrollada a las teorías establecidas y comprobadas que describen el universo a gran escala y sus componentes más pequeños. Un mayor énfasis en la cosmología por parte de estos especialistas que hasta hace pocos años parecían volcados más que nada en el ámbito de los componentes más minúsculos de la materia, y un creciente interés por los próximos resultados experimentales que ofrecerá el nuevo acelerador de partículas LHC, han sido rasgos distintivos de este congreso respecto a ediciones de otros años.

No es que las cuerdas tiren por tierra lo que ahora se sabe -casi ninguna buena propuesta científica lo ha hecho en la historia-, sino que se pretende dar paso más lejos, o varios pasos, para profundizar y explicar lo inexplicable. Para unos es un formidable y atractivo desafío; para otros, esos pasos se alejan más de lo deseable de la comprobación experimental, del funcionamiento de la propia naturaleza.

El punto de arranque es simple: las partículas fundamentales no serían puntos, como en la teoría de partículas convencional, sino objetos extensos, literalmente cuerdas. "La Teoría de Cuerdas no sólo hace compatible la mecánica cuántica con la gravitación de Einstein, sino que de forma automática tiene todos los ingredientes necesarios para entender el resto de las interacciones fundamentales de la naturaleza. Partículas familiares como el electrón o la radiación electromagnética corresponden a las vibraciones de menor energía de las cuerdas", explica Luis Ibáñez, catedrático de física teórica de la UAM y coordinador de Strings 07 a través del Instituto de Física Teórica UAM-CSIC.

Gross, en su charla de divulgación impartida en la Fundación BBVA, resumió el estado de cosas actual en la física fundamental. "El avance en el conocimiento ha sido extraordinario en el siglo XX: ahora sabemos que hay átomos, que están hechos de núcleos y electrones a su alrededor, y que el núcleo es una estructura compleja formada por protones y neutrones, a su vez formados por diferentes quarks", explicó. Todo lo que nos rodea está hecho de esas partículas.

La teoría vigente basada en la mecánica cuántica, el modelo estándar, que describe las partículas y las tres fuerzas de

interacción entre ellas (el electromagnetismo, la fuerza débil y la fuerza nuclear fuerte), "se ha comprobado experimentalmente con una precisión extraordinaria, y con el modelo estándar más la relatividad general de Einstein, que describe la gravedad, abarcamos todas las fuerzas observadas en la naturaleza, así que... hemos terminado, los físicos podemos irnos a casa... Es evidente que no", exclamó Gross.

El problema que todos los físicos reconocen es que la mecánica cuántica y la relatividad no encajan, y eso de tener dos modelos conceptuales incompatibles para describir y entender la naturaleza es incongruente. Sin embargo, la Teoría de Cuerdas combina de modo natural esos dos colosos teóricos de la ciencia, unificando la gravedad y la mecánica cuántica.

Pero si parece simple esta idea básica de las partículas convertidas en cuerdas con efectos asombrosos de combinar lo que de otro modo resulta irreconciliable, la verdad es que la complejidad de la teoría está resultando enorme. Los mismos especialistas creen que esto se debe a que no es aún una teoría terminada. Por ejemplo, de las diferentes soluciones que encuentran a sus ecuaciones no saben cómo elegir la que realmente corresponde a nuestro universo.

Una de sus características menos intuitivas es el hecho de que para que las cuerdas funcionen hace falta pensar y calcular en diez dimensiones, como mínimo, mientras que el universo a nuestro alrededor sólo muestra cuatro: las tres espaciales y el tiempo. ¿Dónde están las demás? El escenario teórico indica que están escondidas, y la estadounidense Lisa Randall, de Harvard, puso en su charla un ejemplo de cómo es posible tratar esas otras dimensiones. Si uno se pone en el lugar de un hipotético individuo bidimensional (plano) que intenta comprender qué es una esfera, la respuesta sería una pila de discos de tamaño creciente hasta el centro de la esfera y decreciente después.

Las dimensiones extra, afirmó Randall, ofrecen muchas respuestas a preguntas que hasta ahora han resultado intratables para la física, y a la vez que se vislumbran con ellas efectos que de otro modo pasarían inadvertidos. "Las extradimensiones podrían ser el gran descubrimiento en los próximos cinco años", dijo Randall. "¿Cómo vamos a evitar explorar sus posibilidades?"

Puede que el universo efectivamente tenga más dimensiones de las que se observan, y que estén como enrolladas, escondidas para nuestros sentidos. Pero los físicos de cuerdas han valorado cómo una aportación destacada en Strings 07, un estudio que hace justo lo contrario. Ha sido un trabajo desarrollado por el gran especialista en cuerdas estadounidense Edward Witten, sobre sólo tres dimensiones, dos espaciales y el tiempo, entendido como laboratorio para profundizar en el análisis de la gravitación.

El atractivo de la idea y las soluciones que se encuentran en el contexto de las cuerdas han atraído a centenares de físicos en todo el mundo hacia esta teoría, que, por otro lado, no ha podido despegarse de la principal crítica: la falta de experimentos en perspectiva que verifiquen si es correcta. El problema es que las cuerdas y sus efectos serían sólo apreciables en condiciones de energía altísimas, fuera del alcance de los laboratorios y aceleradores de partículas con los que se puede contar de modo realista.

"La Teoría de Cuerdas es muy ambiciosa, pero es difícil comprobar si es correcta", comentó Antonio González Arroyo, director del IFT. "El componente especulativo es importante", dijo este físico, que no se dedica al desarrollo de esta teoría, pero que no por ello deja de reconocer su interés. "La verdad es que no conocemos otra teoría capaz de unir la mecánica cuántica y la gravedad, ambas muy bien establecidas por separado". Para otros muchos, la ausencia de predicciones experimentales de una teoría física después de 20 años de desarrollo, es un inconveniente que no se puede pasar por alto en modo alguno.

También hay posturas diferentes entre quienes dedican todo su esfuerzo científico al desarrollo de la Teoría de Cuerdas. Para unos, los avances matemáticos que implica justifican por sí solos el interés. Otros especialistas reconocen que se sienten algo incómodos. "La mayoría de nosotros estamos deseando que haya experimentos [capaces de verificar la Teoría de Cuerdas], pero es muy difícil que haya una evidencia directa a corto plazo", dijo Enrique Álvarez, catedrático de Física Teórica de la UAM.

Para un congreso de física teórica, fue chocante la charla inaugural de Strings07, impartida por un físico experimental: Gigi Rolandi, del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN). Él resumió la marcha del nuevo acelerador de partículas LHC, que debe empezar a funcionar en 2008. No es que nadie sueñe siquiera con la posibilidad de que en este acelerador se generen cuerdas, pero sí podrían descubrirse nuevas familias de partículas elementales, llamadas supersimétricas, con las que cuenta la Teoría de Cuerdas. "Tanto la línea de cuantizar la gravedad, como la de unificar las interacciones fundamentales, apuntan directamente en la dirección de la supersimetría", señalaba Álvarez.

Palmada en la espalda

Desde luego, no será nada definitivo como prueba porque, además, las partículas supersimétricas encajan en otros enfoques teóricos de partículas, sin tener que recurrir al marco de las cuerdas. Pero, desde luego, la posibilidad de que surja el rastro de la supersimetría en LHC aglutinó gran interés en el congreso de Madrid. La opinión unánime es que ese descubrimiento sería una buena palmada en la espalda a la Teoría de Cuerdas.

"Strings 07 ha cubierto temas muy variados dentro del campo, desde la cosmología en la Teoría de Cuerdas, hasta posibles pistas experimentales en el LHC, pasando por la física de agujeros negros y el estudio de la Correspondencia de Maldacena. Quizá se ha notado menos énfasis matemático que en las dos últimas ediciones", resumió Ibáñez. "Otros temas importantes tratados incluyen aplicaciones de la Teoría de Cuerdas en otras áreas, como la física de iones pesados estudiada experimentalmente en el laboratorio de Brookhaven (EE UU). Ha sido una conferencia muy interesante".

© Diario EL PAÍS S.L.

2. Desde hace tiempo, el tema central de la física lo constituye la unificación de fenómenos dispares en el marco de una misma teoría. El modelo estándar de la física de partículas describe tres de las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza (el electromagnetismo, las interacciones débiles y las interacciones fuertes), pero aún debe unificarse con la relatividad general, que da cuenta de la fuerza de la gravedad y la naturaleza del espacio-tiempo.

