

En Autor, *TERMODINAMICA Movimiento Temperatura y Física*. Caracas (Venezuela): Autor.

TERMODINAMICA.Movimiento Temperatura y Física. Chapter 1.

Saab Verardy, Latif Oswaldo.

Cita:

Saab Verardy, Latif Oswaldo (2006). *TERMODINAMICA.Movimiento Temperatura y Física. Chapter 1*. En Autor *TERMODINAMICA Movimiento Temperatura y Física*. Caracas (Venezuela): Autor.

Dirección estable: <https://www.aacademica.org/latif.oswaldo.saab.verardy/4>

ARK: <https://n2t.net/ark:/13683/p3E2/Wcd>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons.
Para ver una copia de esta licencia, visite
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.

Acta Académica es un proyecto académico sin fines de lucro enmarcado en la iniciativa de acceso abierto. Acta Académica fue creado para facilitar a investigadores de todo el mundo el compartir su producción académica. Para crear un perfil gratuitamente o acceder a otros trabajos visite: <https://www.aacademica.org>.

Prólogo

Durante los años de experiencia como docente universitario en la enseñanza de la termodinámica enmarcada en el contexto de Ingeniería, he observado la necesidad de presentar una definición precisa y detallada del concepto de energía y entropía.

A raíz de intentar ahondar en estos términos, poco a poco me percaté de la necesidad de abordar el problema desde el punto de vista microscópico y de la importancia vital, a mi parecer, de enseñar los fundamentos de la materia, entendiéndose éstos como el aprendizaje de lo siguiente:

- Características del núcleo y de las partículas.
- Fuerzas de cohesión del átomo.
- Fuerzas interatómicas e intermoleculares.
- Campo eléctrico y magnético.
- Ondas electromagnéticas.
- Cuantización de la energía.
- Dualidad onda – partícula.
- Relaciones de de Broglie.

A partir de este conocimiento es inmediato el entendimiento del concepto de energía y, en consecuencia, del significado del fenómeno de intercambio energético entre la materia, objeto principal de estudio de la Termodinámica; igualmente, la comprensión del abstracto término de entropía que tanta polémica ha suscitado.

Con lo expuesto anteriormente, creo conveniente el estudio de la Termodinámica desde un punto de vista microscópico y, a partir de éste, establecer la integración con lo macroscópico. Es así que este libro pretende este objetivo al intentar abarcar conceptualmente el marco micro y su continuación a lo macroscópico, expresándolo en

términos claros y precisos. Para ello, me pareció oportuno incorporar íntegramente el contenido del libro intitulado: “Movimiento, Energía y Entropía”, realizado conjuntamente con mi esposa, ya que en éste el objetivo es el estudio del concepto de energía y entropía en el ámbito de partículas.

Es importante destacar, por otra parte, que el enfoque acordado a esta obra es conceptual y formalmente matemático en las demostraciones. En algunos casos se hizo necesario tomar directamente ciertas expresiones demostradas en el contexto de la Física Estadística sin hacer su demostración formal, ya que ello se aleja del objetivo inicialmente planteado.

La orientación fundamental dada es para cumplir con los requerimientos del programa de Termodinámica para ingenieros, sin embargo, mucho de los aspectos aquí expuestos, son de importancia para los estudiantes de la licenciatura de Física y Química.

La estructuración del contenido es secuencial y dividida en 4 capítulos que a continuación, brevemente, se describen:

- **Capítulo 1:** se estudian los fundamentos de la materia y el concepto de energía.
- **Capítulo 2:** en este capítulo se hace una descripción estadística de la interacción energética y el establecimiento de la primera ley.
- **Capítulo 3:** se estudia la descripción macroscópica y la introducción a los diagramas y a la tabla termodinámica, la aplicación de la primera ley a sistemas cerrados y el análisis de volúmenes de control.

- **Capítulo 4:** se estudia el concepto de entropía, ciclos y el análisis de la segunda ley en sistemas cerrados y en sistemas de flujo estable y uniforme.

Para finalizar, quisiera destacar la importancia que tuvo en la elaboración de esta obra el libro titulado “Fundamentals of Statistical and Thermal Physics” de F. Reif. Ésta constituyó la principal referencia que utilicé para desarrollar los aspectos microscópicos. Para ello, consideré lo establecido y desarrollado por este autor en diversas secciones del libro.

“ $E = MC^2$ es una invitación a ver toda materia como energía: la roca, la planta, la serpiente, el animal y el ser humano. La energía entonces, se convierte en nuestra perspectiva unitaria.”

Elaine de Beauport
Educadora.
Tomado de su libro:
“Las Tres Caras de la Mente”
Editorial Galac.

“Gracias a Dios porque todos somos iguales,
Y por ser el universo un único ser”.

Latif Oswaldo Saab Verardy

Contenido

Pág.

Capítulo 1: Fundamentos de la Materia

1.1 Características del Núcleo y las Partículas.	20
1.2 Fuerza de Cohesión del Átomo.	25
Interacción Nuclear Fuerte (INF).	25
Fuerzas Eléctricas – Fuerza de Coulomb.	27
1.3 Fuerzas Interatómicas e Intermoleculares.	29
Fuerzas Interatómicas.	30
Fuerzas Intermoleculares.	33
Modelo de Lennard – Jones.	34
Modelo de Esferas Rígidas.	34
Modelo de Pozo Cuadrado.	35
1.4 Campo Eléctrico y Magnético.	36
Campo Eléctrico.	36
Campo Magnético.	38
Ley de Lorentz.	38
Ley de Biot – Savart.	39
Ondas Electromagnéticas.	41
Modelo Atómico.	42
Movimiento Armónico.	42
Parámetros Característicos de la	44
Oscilación en el Tiempo.	44
Período.	44
Frecuencia.	44
Frecuencia Angular.	45
Parámetros Característicos de la	50
Oscilación en el Espacio.	50
Longitud de Onda.	50
Número de Onda.	50
Número de Onda Angular.	50

Ondas Planas Armónicas – Vector de Propagación.	50
Espectro Electromagnético.	51
1.5 Cuantización de la Energía.	53
1.6 Dualidad Onda – Partícula.	55
1.7 Relaciones de de Broglie.	58
1.8 Ejemplo de Sistemas Microscópicos.	60
1.9 Energía y Cambio de Energía.	76
1.10 Equivalencia Masa y Energía	81

Capítulo 2: Descripción Estadística Interacción Energética entre Sistemas Macroscópicos

Primera Ley de la Termodinámica Ley Cero de la Termodinámica

2.1 Descripción Estadística de los Sistemas.	83
Conjunto Estadístico.	83
Estados Accesibles.	84
Postulado Básico.	86
Estados de Equilibrio.	87
2.2 Interacción Energética entre Sistemas Macroscópicos.	87
Parámetros Externos.	88
Interacción Térmica.	89
Definición de Calor.	92
Interacción Mecánica.	101
Definición de Trabajo.	102
Procesos Cuasiestáticos.	103
Procesos No Cuasiestáticos.	108
Expresión Matemática del Trabajo.	109
Trabajo como Levantamiento de un Peso.	114
Diferencial Exacta e Inexacta.	116
Interacción Energética General.	118
Primera Ley de la Termodinámica.	118
Proceso Infinitesimal Cuasiestático.	120

Condiciones de Equilibrio.	122
Interacción Térmica.	126
Ley Cero de la Termodinámica.	130
Propiedades de la Temperatura Absoluta.	130
Interacción General.	135

Capítulo 3: Descripción Macroscópica. Diagramas y Tablas Termodinámicas

3.1 Descripción Macroscópica.	141
Sustancia Pura, Simple y Compresible.	141
Propiedades Extensivas e Intensivas.	142
Entalpía.	147
Diagramas Termodinámicos.	149
Diagrama (Tv).	150
Líneas de Saturación.	150
Calidad.	151
Temperatura de Saturación.	154
Líquido Subenfriado.	155
Vapor Sobrecalentado.	156
Punto Crítico.	156
Diagrama (Pv).	157
Diagrama (PT).	158
Tabla Termodinámica.	159
Sólidos y Líquidos Incompresibles.	161
Gas Ideal.	164
Procesos de Flujos o Sistemas Abiertos - Análisis Energético.	175
Flujo Estable, Estado Estable.	185
Flujo Uniforme, Estado Uniforme.	188

Capítulo 4: Segunda Ley de la Termodinámica

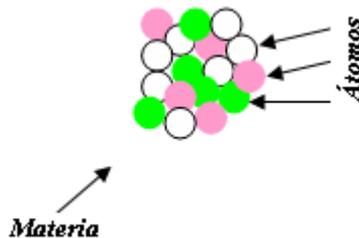
4.1	Entropía y Principio de Incremento.	192
	Entropía.	192
	Principio de Incremento.	194
4.2	Factor de Irreversibilidad.	200
4.3	Interpretación de la Irreversibilidad.	204
4.4	Segunda Ley – Demostración $\left(\beta = \frac{1}{KT}\right)$	209
4.5	Segunda Ley – Propiedad 2 de la Temperatura Absoluta.	212
4.6	Segunda Ley – Máquina Térmica (MT)	215
	Definición.	215
	Rendimiento.	218
	Enunciado de Kelvin y Planck.	219
4.7	Segunda Ley – Ciclo de Refrigeración (CR) y Bomba de Calor (BC).	229
	Definición.	229
	Coeficiente de Operación.	231
	Enunciado de Clausius.	232
4.8	Ciclo de Carnot.	239
	Definición.	239
	Transformación Isoentrópica.	246
	Diagrama (Ts).	248
	Rendimiento.	249
	Coeficiente de Operación.	250
	Principio de Carnot.	252
4.9	Desigualdad de Clausius.	257
4.10	Procesos de Flujos o Sistemas Abiertos - Segunda Ley.	261
	Flujo Estable, Estado Estable.	267
	Flujo Uniforme, Estado Uniforme.	269
	Nomenclatura.	272
	Bibliografía Sugerida.	275

Capítulo 1

Fundamentos de la Materia

Las investigaciones experimentales llevadas a cabo a fin de determinar los fundamentos de la materia han podido establecer los siguientes principios:

Toda materia está constituida por átomos:



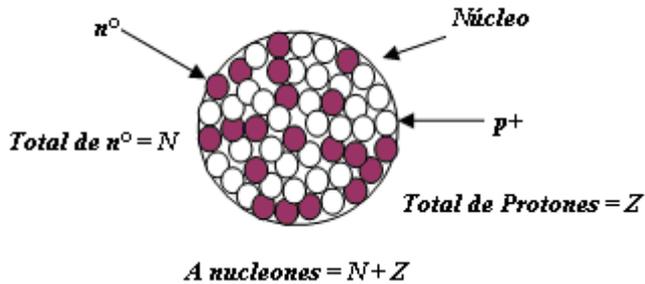
Los átomos se componen de:

- Z electrones y un,
- Núcleo pesado, compuesto de N neutrones y Z protones para un total de A nucleones, es decir, números de neutrones y protones del núcleo.

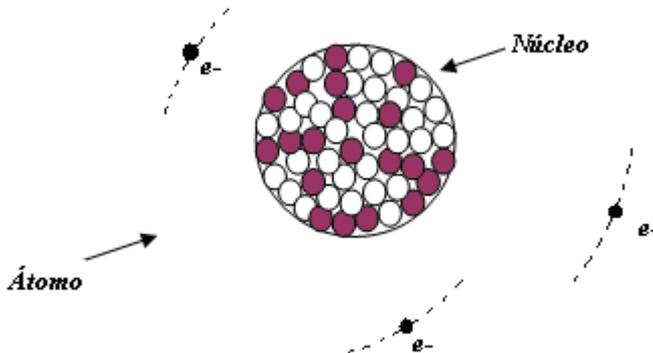
Siendo:

- Z = número atómico: número total de protones en el núcleo o electrones presentes en el átomo.
- N = número total de neutrones en el núcleo.
- A = número másico: suma de neutrones y protones presentes en el núcleo. $A = N + Z$.

Los electrones, protones y neutrones los simbolizaremos e^- , p^+ y n^0 , respectivamente.



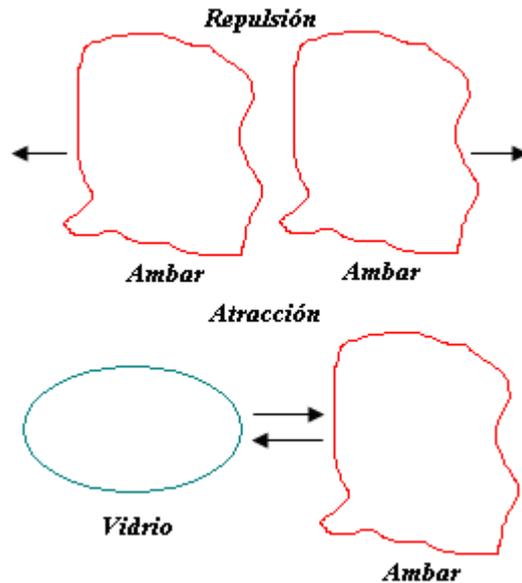
Los electrones orbitan alrededor del núcleo.



1.1 Características del Núcleo y de las Partículas

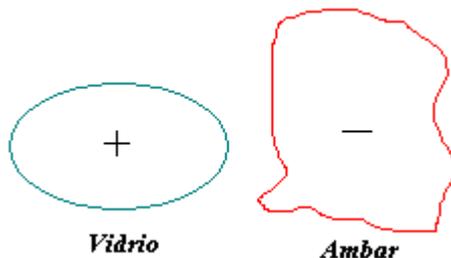
La carga eléctrica de la materia se puede evidenciar realizando experiencias sencillas, como por ejemplo, frotar un pedazo de ámbar (el cual es una resina dura y amarillenta) con piel, o vidrio con seda.

Al frotar el ámbar con la piel y al poner en contacto con un segundo pedazo de ámbar igualmente frotado, estos se repelerán entre sí, en tanto que si acercamos el ámbar al vidrio, frotado con seda, estos se atraerán.



A fin de explicar el fenómeno de atracción y repulsión, en el siglo pasado se afirmó que toda la materia poseía electricidad y que esta se puede transferir quedando la materia en exceso o deficiencia de ella.

A objetos con las características del vidrio, arbitrariamente se le asignó la carga positiva (+), por el contrario a aquellos similares al ámbar se le asignó la carga negativa (-).



Cualquier materia cargada positiva o negativamente, experimentalmente se determinó que la variación de la carga es proporcional al valor e .

$$\text{Variación de la carga} = n e$$

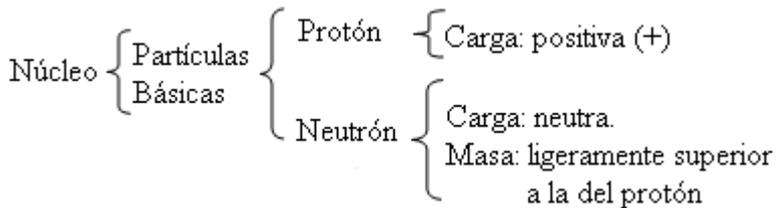
Siendo:

- $n =$ número entero 1, 2, 3...

El valor de e se obtuvo a través de las mediciones y se llama ***Carga Elemental***.

En las observaciones que se realizaron, permitieron establecer que toda la carga que posee la materia es múltiplo de la carga elemental (e), ya conocida experimentalmente.

Las partículas elementales que conforman el átomo son el electrón, protón y el neutrón y tienen las siguientes características:

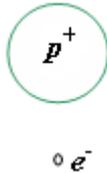


Quarks

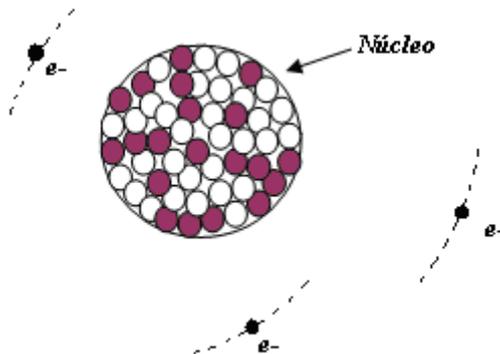
1. Recientemente se descubrió que los p^+ y n^0 están constituidos por estas partículas más elementales.
2. Transportan cargas de $\pm 1/3 e$, $\pm 2/3 e$.
3. Se pueden combinar para producir cargas como el n^0 de carga neutra, o el p^+ de carga positiva.

Características del Electrón

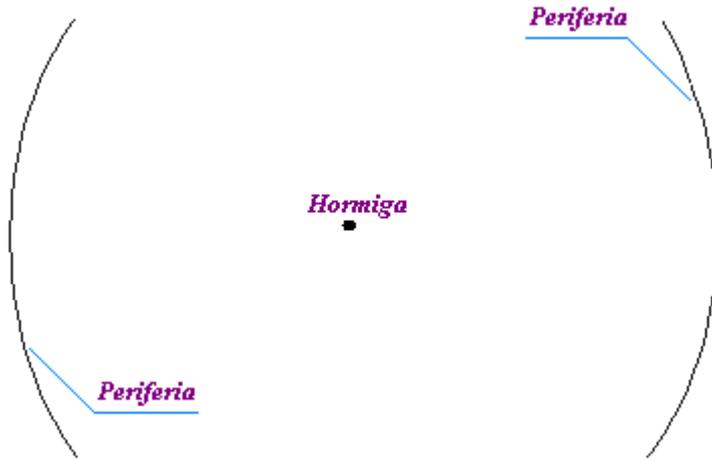
1. **Carga:** negativa (-)
2. **Masa:** 1836 veces más pequeña que la del protón.



3. **Órbitas:** giran alrededor del núcleo en diferentes órbitas con diferente energía.

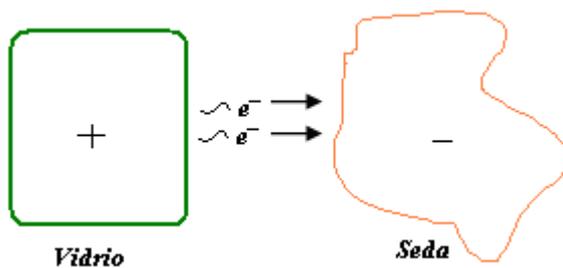


4. **Distancia núcleo $-e^-$:** esta distancia es tal que nos pudiéramos imaginar una diminuta hormiga paseándose en el centro del estadio de béisbol. La hormiga sería el núcleo y en la periferia se encuentra el electrón.

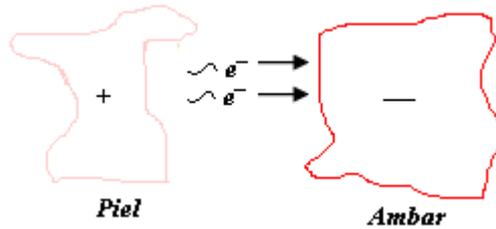


5. **Movimiento:** es mucho mayor que el núcleo debido a que este es más pesado.

Actualmente se explica el fenómeno observado con el vidrio y el ámbar ya que se sabe que en el primer caso hay una transferencia de electrones del vidrio a la seda, por lo tanto se presenta una deficiencia electrónica en el vidrio, lo que implica que su carga es positiva ya que los electrones son negativos.



En lo que respecta al ámbar, este recibe electrones de la piel, en consecuencia, se presenta un exceso de ellos, por lo que su carga es negativa.

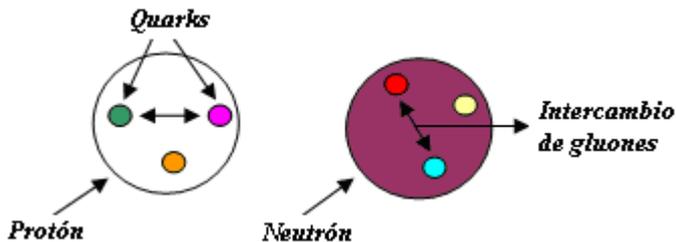


1.2 Fuerzas de Cohesión del Átomo

1.2.1. Interacción Nuclear Fuerte (I.N.F.)

La I.N.F mantiene al núcleo y es transmitida por partículas portadoras de fuerzas llamadas gluones.

A velocidades por debajo de la luz, la cual se estima en 300000 Km./s, la I.N.F. une a los quarks, en tanto que por el contrario, a velocidades cercanas a la de la luz, esta se hace menos intensa encontrándose los quarks transformados en otras partículas.



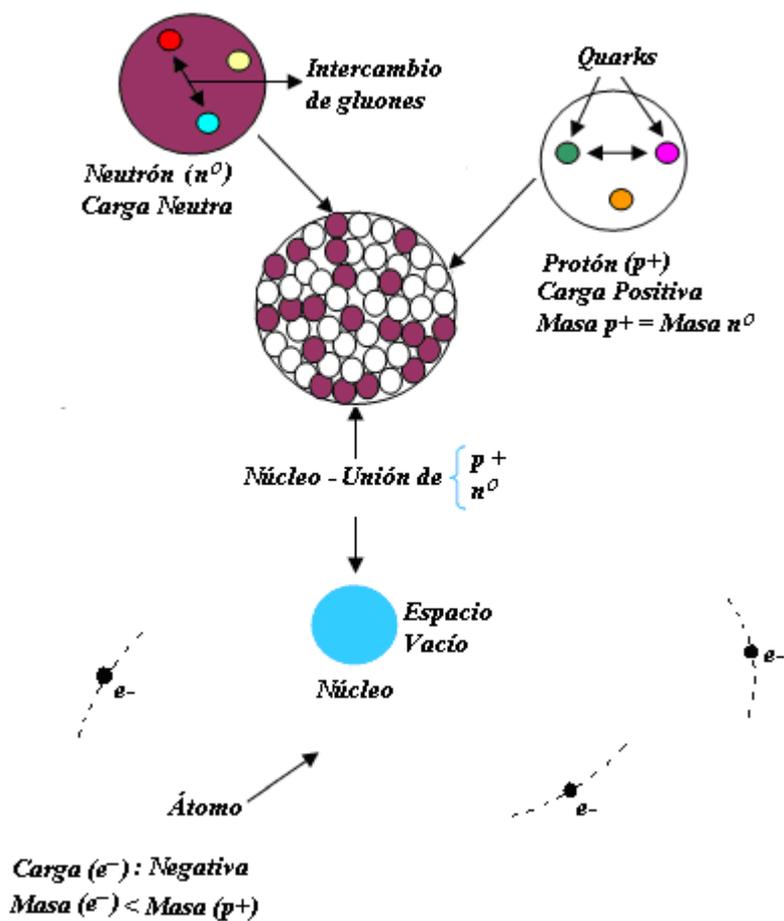


Figura 1.1

1.2.2. Fuerzas Eléctricas – Fuerzas de Coulomb

Toda la materia se mantiene unida por la fuerza de atracción entre los electrones, cargados negativamente, y por los protones, cargados positivamente interaccionando según la Ley de Coulomb.

Ley de Coulomb

COULOMB, Charles Agustín.
Físico y Matemático Francés.
Angoulême, 1736 – París, 1800.

Sean dos cargas idealizadas como puntuales de dimensión nula.

q_1 , puede ser el electrón (e^-).

q_2 , puede ser el protón (p^+).

La fuerza entre q_1 y q_2 es proporcional a sus magnitudes es inversamente al cuadrado de la distancia (r_{12}) entre ellas, esto es, entre más cerca estén las cargas, mayor será la fuerza.

$$F = \frac{(q_1)(q_2)}{(r_{12})^2} \hat{e}_{12} \quad (1.2.2.1)$$

Donde:

\hat{e}_{12} = vector unitario en dirección de las cargas q_1 y q_2 . (Figura 1.2.2.1)

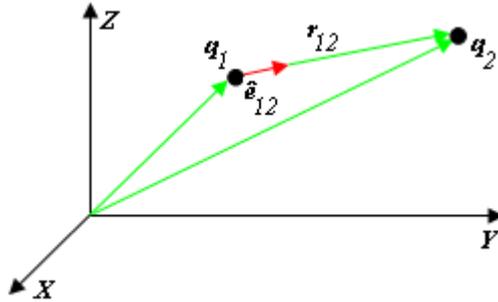
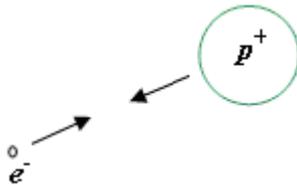


Figura 1.2.2.1

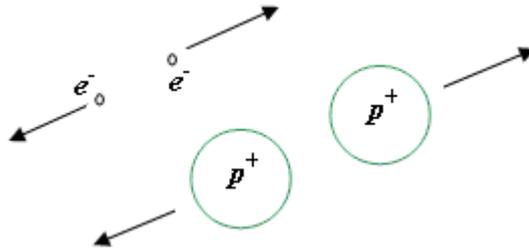
Fuerza Atractiva

- Sí las cargas son de signos opuestos se atraen entre sí.
- En el caso de protones – electrones, existe esta fuerza de atracción debido a que son cargas opuestas.
- Para contrarrestarla y separar las cargas, se debe realizar un trabajo en oposición a esta fuerza.



Fuerza Repulsiva

- Sí las cargas son de igual signo, se repelen entre sí.
- Para acercar las cargas, se debe realizar un trabajo.



Fuerza Nula

- Sí la carga se encuentra aislada no experimenta alguna fuerza.

$$e^- \quad F = 0$$

1.3 Fuerzas Interatómicas e Intermoleculares

Es importante destacar que los diferentes elementos encontrados en la naturaleza dependen del número de protones y neutrones, por ejemplo:

Hidrógeno Normal $\rightarrow 1 p^+$

Helio $\rightarrow 2 p^+, 2 n^0$

Moléculas

Las moléculas están formadas por la unión de varios átomos; es así que podemos encontrar la molécula de Hidrógeno (H_2) compuesta por dos hidrógenos normales. Figura 1.3.1

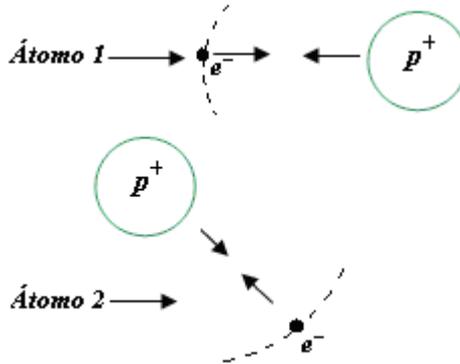


Figura 1.3.1

Fuerzas Interatómicas

Entre los átomos que conforman las moléculas, se establecen fuerzas de atracción y repulsión de origen electrostático debido a la presencia de los electrones y protones.

Para el caso de las ***moléculas diatómicas***, es decir, aquellas compuestas por dos átomos, como son por ejemplo, el H₂, nitrógeno (N₂), oxígeno (O₂), las fuerzas interatómicas las podemos representar gráficamente como se muestra en la figura 1.3.2.

La curva que se presenta evidencia la intensidad interactiva entre los átomos en función de la distancia interatómica (r).

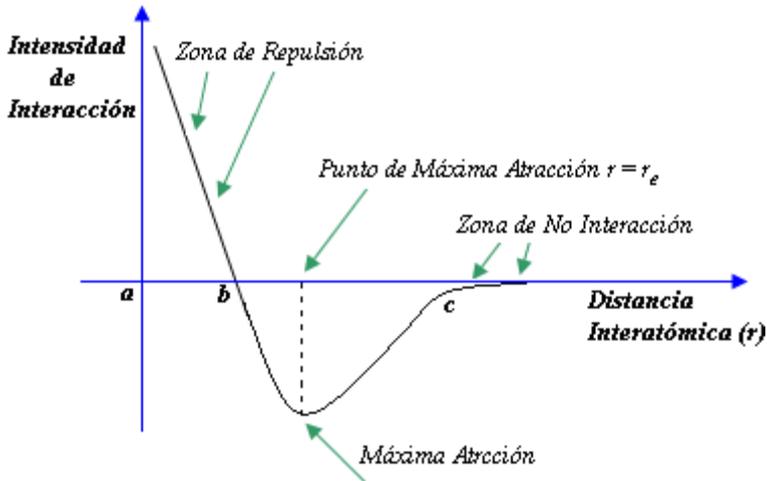


Figura 1.3.2

Sí r es grande \rightarrow los átomos no interaccionan.

Sí r decrece \rightarrow se evidencian fuerzas de atracción, denominadas Fuerzas de Van Der Waals.

VAN DER WAALS, Johannes Diderik.
Físico Holandés.
Leyde, 1837 – Amsterdam, 1923.

Sí $r = r_e \rightarrow$ los electrones se solapan pasando la curva por un mínimo, el cual, corresponde a la distancia de atracción máxima.

La causa de la atracción máxima es la deslocalización de los electrones, ya que sienten la fuerza de atracción de los protones de ambos núcleos. Figura 1.3.3.

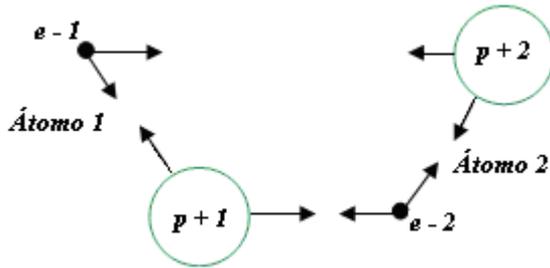


Figura 1.3.3

Sí $r \rightarrow 0$, existe repulsión entre los átomos debido a la cercanía de los p^+ .

Molécula de Amoníaco

La molécula de amoníaco está formada por tres átomos de hidrógeno (H) y uno de nitrógeno (N), como se muestra en la figura 1.3.4.

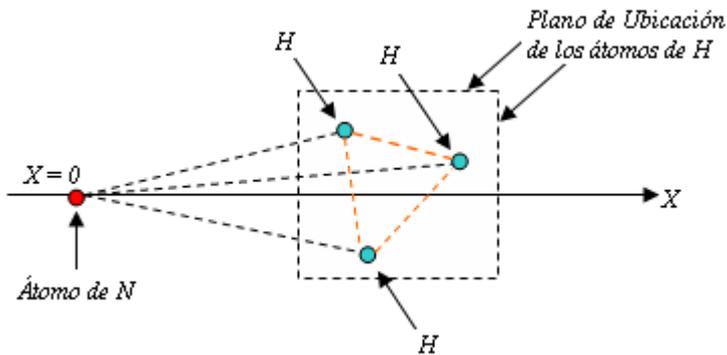


Figura 1.3.4

Se puede suponer que los átomos de hidrógeno se encuentran todos en el mismo plano, a cierto valor dado de x .

Debido a las fuerzas que se manifiestan, el plano que contiene los hidrógenos, se acerca y se aleja del átomo de nitrógeno, llegando incluso a pasar por el plano de ubicación de este átomo, a pesar de la repulsión entre ellos producido por la diferencia de cargas que se establece. Figura 1.3.5.

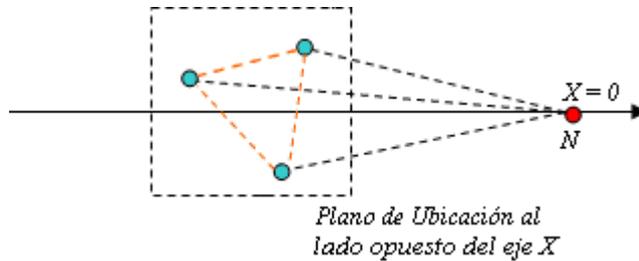


Figura 1.3.5

En la figura 1.3.6 se presenta la intensidad de la interacción.

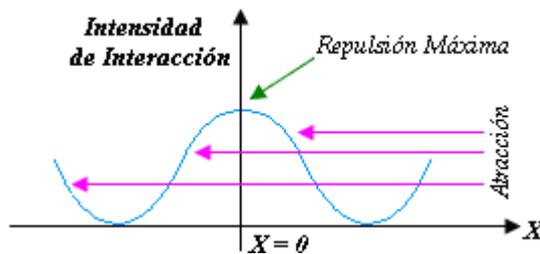


Figura 1.3.6

Fuerzas Intermoleculares

Al igual que en las fuerzas interatómicas, entre las moléculas se manifiesta repulsión y atracción entre ellas dependiendo de la distancia de separación, debido esto a la presencia de electrones y protones en cada molécula.

El conocimiento de las fuerzas intermoleculares es obtenido de observaciones experimentales y consideraciones teóricas; la teoría evidencia la forma de la función y la data experimental permite ajustar los parámetros contenidos en las ecuaciones.

Se ha determinado diversos modelos, la escogencia de algunos de ellos depende del tipo de molécula y del grado de realidad que se desea y las dificultades del uso. Entre estos modelos podemos citar los siguientes:

Modelo de Lennard – Jones

LENNARD – JONES, Sir John Edward.
Químico Inglés.
1894.

Este modelo corresponde al utilizado en las fuerzas interatómicas y es mostrado en la figura 1.3.2

Modelo de Esferas Rígidas (Figura 1.3.7)

Se supone la molécula como una esfera de diámetro σ y los cálculos son pocos precisos.

En este caso las moléculas no interaccionan cualquiera que sea la distancia que las separa, cuando esta es mayor que el diámetro σ : en el momento en que $r = \sigma$, se repelen fuertemente entre sí.

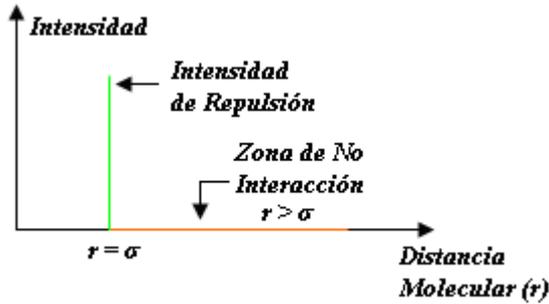


Figura 1.3.7

Modelo de Pozo Cuadrado (Figura 1.3.8)

Se supone las moléculas en forma esférica de diámetro σ . Se toma en cuenta la atracción y la repulsión molecular para moléculas complejas.

Sí $r > r_a \rightarrow$ las moléculas no interactúan.

Sí $\sigma < r < r_a \rightarrow$ las moléculas se atraen.

Sí $r = \sigma \rightarrow$ las moléculas se repelen.

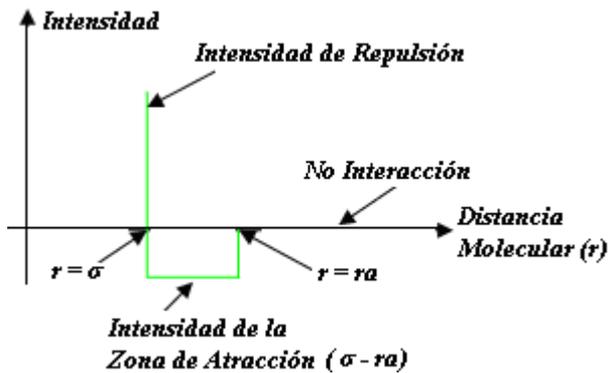


Figura 1.3.8

1.4 Campo Eléctrico y Magnético

1.4.1 Campo Eléctrico

Consideremos una carga fija cualquiera denotada q_i ubicada en algún punto del espacio y alrededor de la cual se encuentran N cargas fijas, como se ilustra en la figura 1.4.1.1

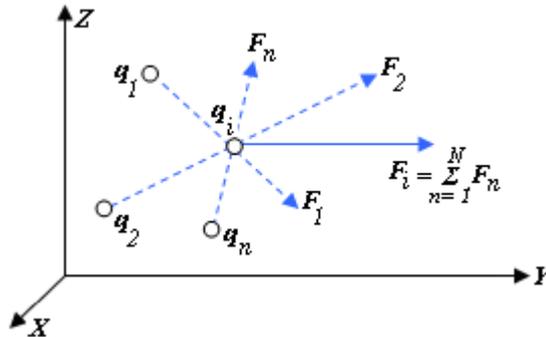


Figura 1.4.1.1

Debido a la presencia de las N cargas, q_i experimentará una fuerza que viene dada por la suma de las fuerzas ejercidas por cada carga individual, las cuales se pueden expresar a través de la Ley de Coulomb, ecuación 1.2.2.1

$$\vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_N \quad (1.4.1.1)$$

$$\vec{F}_i = \left(\frac{(q_1)(q_i)}{(r_{1i})^2} \right) \hat{e}_{1i} + \left(\frac{(q_2)(q_i)}{(r_{2i})^2} \right) \hat{e}_{2i} + \left(\frac{(q_3)(q_i)}{(r_{3i})^2} \right) \hat{e}_{3i} + \dots + \left(\frac{(q_N)(q_i)}{(r_{Ni})^2} \right) \hat{e}_{Ni} \quad (1.4.1.2)$$

$$\overline{F}_i = q_i \left[\left(\frac{q_1}{(r_{1i})^2} \right) \hat{e}_{1i} + \left(\frac{q_2}{(r_{2i})^2} \right) \hat{e}_{2i} + \left(\frac{q_3}{(r_{3i})^2} \right) \hat{e}_{3i} + \dots + \left(\frac{q_N}{(r_{Ni})^2} \right) \hat{e}_{Ni} \right] \quad (1.4.1.3)$$

$$\overline{F}_i = (q_i)(\overline{E}_i) \quad (1.4.1.4)$$

$$\overline{E}_i = \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{(r_{ni})^2} \hat{e}_{ni} \quad (1.4.1.5)$$

$$\overline{E}_i = \overline{E}_1 + \overline{E}_2 + \overline{E}_3 + \dots + \overline{E}_N \quad (1.4.1.6)$$

$\overline{F}_i // \overline{E}_i$ El campo eléctrico es paralelo a la fuerza.

\overline{E}_i Es el campo eléctrico producido por todas las cargas fijas alrededor de q_i .

\overline{E}_i Se define como:

$$\overline{E}_i = \frac{\overline{F}_i}{q_i} \quad (1.4.1.7)$$

\overline{E}_i Corresponde a la fuerza que está sintiendo la carga q_i por unidad de carga correspondiente sobre la cual se actúa.

Análogamente pudiéramos decir que si existe una fuerza sobre q_i , quedará alguna perturbación sobre la posición en la cual se ubica q_i cuando esta sea retirada. La perturbación corresponde al campo eléctrico, el cual es responsable de la fuerza ejercida sobre q_i al colocarla en la posición.

Sí las cargas en un instante dado se ponen en movimiento, se crean desviaciones en las líneas de fuerzas de campo eléctrico y crea líneas de campo magnético.

1.4.2 Campo Magnético

Desde la antigüedad, los chinos conocían que ciertas sustancias tales como la Magnetita de Óxido de Hierro tenía la particularidad de atraer diminutos trozos de hierro; esta característica no está asociada con la fuerza de gravedad puesto que no se presenta en todas las sustancias, tampoco esta relacionada con las fuerzas eléctricas. Este fenómeno se observó por primera vez en la ciudad antigua de Asia Menor llamada Magnesia, por lo cual se le dio el nombre de magnetismo.

Actualmente se sabe que el magnetismo es consecuencia del movimiento de los electrones en los átomos, ya que estos al describir la órbita alrededor del núcleo generan corrientes microscópicas capaces de originar el campo magnético.

Experimentalmente se ha observado que los imanes naturales tienen propiedades magnéticas y poseen dos polos, llamados polo norte y polo sur, atrayéndose éstos mutuamente.

Los imanes son capaces de generar campos magnéticos que se orientan del polo norte y entran en el polo sur.

1.4.2.1 Ley de Lorentz

LORENTZ, Hendrik Antoon.
Físico Neerlandés.
Arnhem, 1853 – Haarlem, 1928.

Para el siglo XIX se realizaron experiencias a fin de determinar las propiedades del campo magnético, es así que se pudo evidenciar la Fuerza de Lorentz. (Figura 1.4.2.1)

La fuerza \vec{F} se ejerce sobre una partícula q que se desplaza a la velocidad \vec{V} , siendo \vec{F} perpendicular a ésta, así como al campo magnético \vec{B} , producido éste por una carga en movimiento o por algún imán, pudiendo variar el campo de punto a punto del espacio.

Características de Esta Fuerza

- Es perpendicular a \vec{B} y \vec{V} .
- Proporcional a la carga q .
- Función del módulo de la velocidad.

Matemáticamente se expresa:

$$\vec{F} = q\vec{V} \times \vec{B} \quad (1.4.2.1)$$

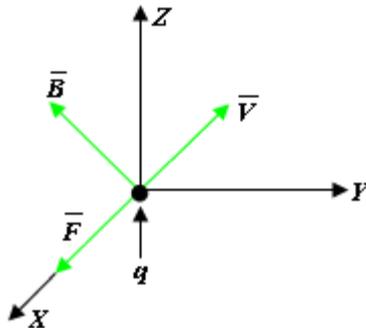


Figura 1.4.2.1

1.4.2.2 Ley de Biot – Savart

BIOT, Jean Baptiste.

Físico Francés.

París, 1774 – París, 1862.

SAVART, Félix.
Físico Francés.
Mezieres, 1791 – París 1841.

Ampère demostró que las corrientes eléctricas ejercían fuerzas entre sí y que el efecto que se puede obtener es análogo al producido por los imanes. Cabe señalar que al producirse el campo con corrientes, tiene la ventaja de que se puede controlar a voluntad.

AMPÉRE, André Marie.
Físico y Matemático Francés.
Lyon, 1775 – Marseille, 1836.

A partir de lo señalado por Ampère, Biot y Savart establecieron el campo \vec{B} a una distancia \vec{r} de alguna carga eléctrica en movimiento. (Figura 1.4.2.2)

Sí la carga se desplaza a la velocidad \vec{V} , se produce un campo magnético \vec{B} el cual se puede expresar, para cualquier punto del espacio, de la siguiente forma:

$$\vec{B} = q\vec{V} \times \frac{\vec{r}}{r^2} \quad (1.4.2.2)$$

Características del Campo \vec{B}

- Es perpendicular a \vec{V} y \vec{r} .
- Depende de la magnitud de la carga y de \vec{V} .
- Es inversamente proporcional a la distancia r .

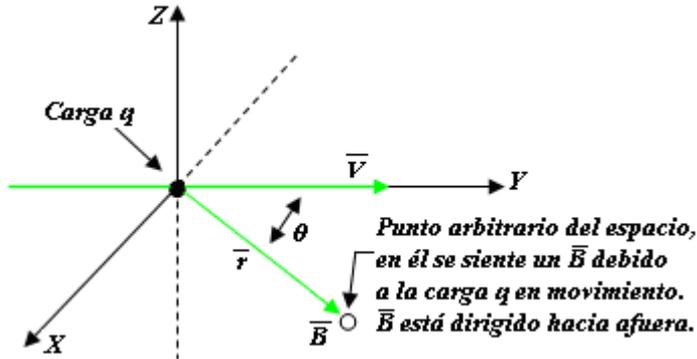


Figura 1.4.2.2

Es importante señalar la diferencia del efecto producido por \vec{E} y \vec{B} sobre la partícula. Ambos campos producen fuerza sobre esta y el resultado es el siguiente:

<i>Campo Eléctrico</i>	{	Producido por cargas eléctricas fijas o en movimiento. Varía la velocidad de la partícula.
<i>Campo Magnético</i>	{	Producido por cargas en movimiento. Desvía la partícula de su dirección original.

1.4.3 Ondas Electromagnéticas

Las ondas electromagnéticas son la manifestación física de la evolución de los campos \vec{E} y \vec{B} a través del espacio y del tiempo.

Es posible imaginarse una cuerda fija en uno de sus extremos, al sacudir el otro extremo de arriba hacia abajo se observa una onda.

Sí se hace la analogía con el campo \vec{E} y \vec{B} , la cuerda sería las líneas de fuerza y la onda se desplazaría por ellas.

Según lo sugerido por Faraday, las Ondas Electromagnéticas son un movimiento ondulatorio producido por líneas a través de las cuales se desplazan los campos \vec{E} y \vec{B} .

FARADAY, Michael.
Físico y Químico Inglés.
Newington, 1791 – Hampton, 1867.

Para entender físicamente el concepto de ondas, consideremos en detalle el movimiento de una partícula, tomaremos como ejemplo el modelo atómico.

1.4.3.1 Modelo Atómico

El átomo está constituido por un núcleo y electrones girando alrededor de este. Debido a que la masa del electrón es mucho más pequeña que la del protón y, en consecuencia del núcleo, se ha establecido que este se encuentra fijo, en tanto que el electrón se desplaza con grandes movimientos alrededor de él, atraído eléctricamente, como consecuencia de las cargas opuestas que la caracterizan, siguiendo el electrón un MOVIMIENTO ARMÓNICO producido por la interacción con campos electromagnéticos.

Movimiento Armónico

Imaginemos que hacemos un seguimiento de la partícula, la cual se desplaza sobre una línea. Esta línea la podemos asociar al eje de coordenadas Z.

Observemos la posición Z y el tiempo transcurrido.

$$\text{Tiempo} = 0 \rightarrow Z = 0$$

$$t_1 \rightarrow Z = Z_1$$

$$t_2 \rightarrow Z = Z_2$$

A cierto tiempo, la partícula llega a un punto máximo en el cual retorna, llamemos este punto Z_m y t_m .

$$t_m \rightarrow Z = Z_m$$

A partir del Z_m , la partícula se devuelve a medida que transcurre el tiempo pasando por todos los puntos recorridos hasta alcanzar un punto mínimo $Z = -Z_m$.

En la figura 1.4.3.1 se muestra la trayectoria.

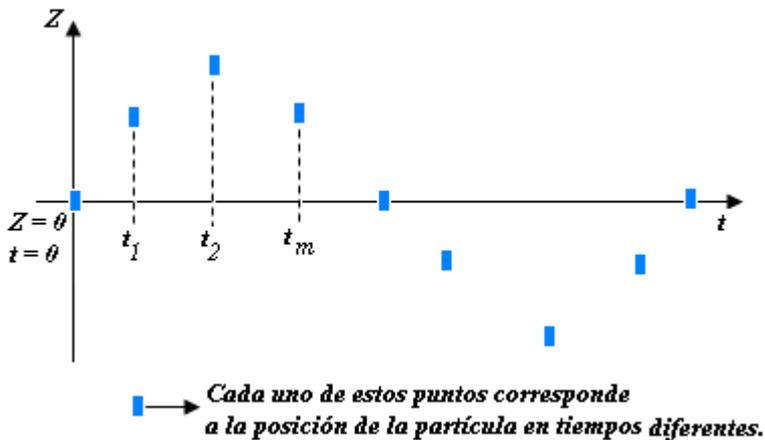


Figura 1.4.3.1

Se puede observar que al unir todos los puntos por donde pasa la partícula, se ve una curva correspondiente a un movimiento oscilatorio. Figura 1.4.3.2.

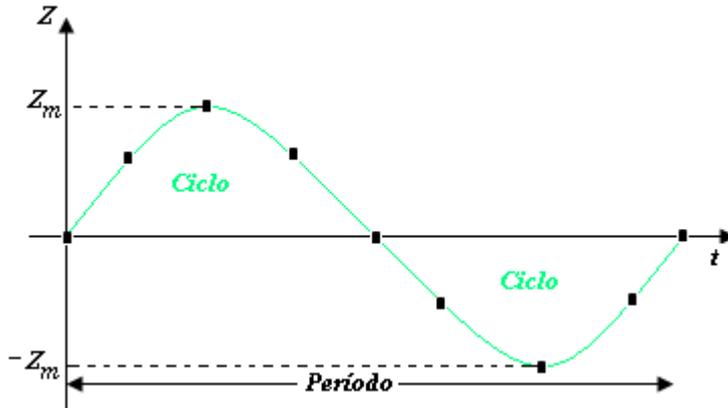


Figura 1.4.3.2

Parámetros Característicos de la Oscilación en el Tiempo

Período (T)

El período es el tiempo que tarda la oscilación en realizar un ciclo, entendiéndose este como la trayectoria seguida por la partícula antes de que comience a repetirse. Tomemos por ejemplo, cuando parte de $Z = 0$, llega al máximo $Z = Z_m$, se regresa hasta llegar al mínimo $Z = -Z_m$ y retorna a $Z = 0$.

Frecuencia (v)

Es el número de ciclos por unidad de tiempo.

Es la inversa del período.

$$v = \frac{1}{T} \left(\frac{\text{Ciclos}}{\text{seg}} \right) \quad (1.4.3.1)$$

Frecuencia Angular (ω)

La frecuencia angular se expresa en función de ν de la siguiente manera:

$$\omega = 2\pi\nu \quad (1.4.3.2)$$

A fin de entender el concepto, consideremos el siguiente caso:

Sea un instante de tiempo cualquiera t_1 y el período de oscilación T_1 , tal que:

$$T_1 = 2t_1 \quad (1.4.3.3)$$

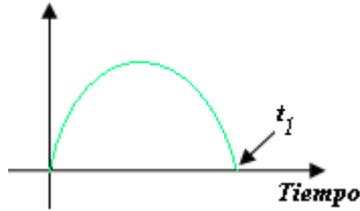
Aplicando las ecuaciones anteriores,

$$\omega_1 = 2\pi\nu_1 \quad \text{y} \quad \nu_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{2t_1} \quad (1.4.3.4)$$

Sustituyendo ν_1

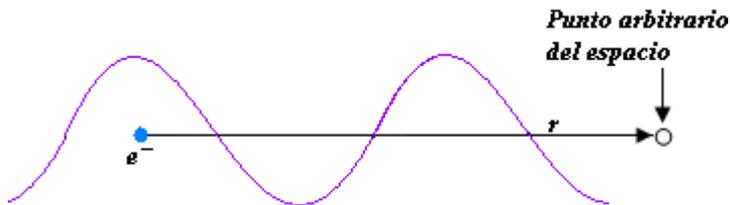
$$\omega_1 = \frac{2\pi}{2t_1} \rightarrow \omega_1 t_1 = \pi \quad (1.4.3.5)$$

Sabemos de la ecuación 1.4.3.3 que t_1 es la mitad del período, lo que corresponde a π radianes, por lo que según lo obtenido en la ecuación 1.4.3.5, podemos concluir que ω nos permite determinar los radianes obtenidos al transcurrir cierto tiempo.



Influencia del Movimiento Armónico Electrónico

Presentaremos ahora la influencia que tiene la partícula oscilatoria sobre un punto distante r .



El campo eléctrico sobre el punto r en función del tiempo se presenta en la siguiente figura. Figura 1.4.3.3.

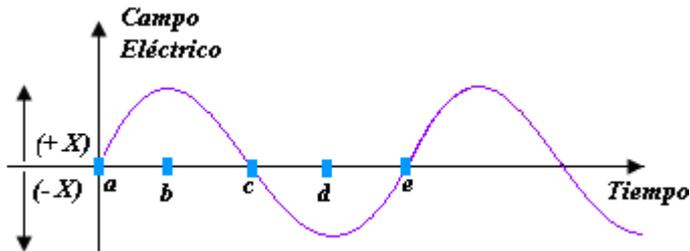
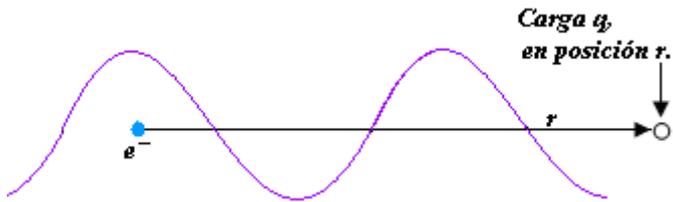


Figura 1.4.3.3

Recordando que se está estudiando la influencia sobre la posición fija r y además, que el campo eléctrico produce una fuerza \vec{F} sobre cualquier carga q , como se expresó en la ecuación 1.4.1.7, ubicada esta q en la posición r , se puede afirmar lo siguiente para

diferenciar los intervalos de tiempo y suponiendo que la carga es positiva:



Consideremos la figura 1.4.3.3:

Instante $t = 0$:

Corresponde al instante t_a ; en este el campo es nulo, en consecuencia, la carga no siente fuerza alguna.

Intervalo (t_a, t_b) :

La magnitud del campo aumenta en la dirección $(+x)$, por lo tanto, la fuerza ejercida también aumentará desplazando la carga en ésta dirección $(+x)$.

Intervalo (t_b, t_c)

La magnitud del campo disminuye hasta anularse en t_c , de igual manera la fuerza.

Intervalo (t_c, t_d) :

El campo aumenta pero en dirección $(-X)$, opuesta a la anterior, por lo cual, la carga q sentirá una fuerza que lo empujará en dirección $(-X)$.

Intervalo (t_d , t_e):

La magnitud en este caso, disminuye apuntando el campo en dirección (-X) hasta anularse en t_e , la carga sentirá una fuerza que disminuirá gradualmente siendo empujada en la dirección (-X).

De la misma manera, si medimos en función de la distancia r se obtiene la figura 1.4.3.4

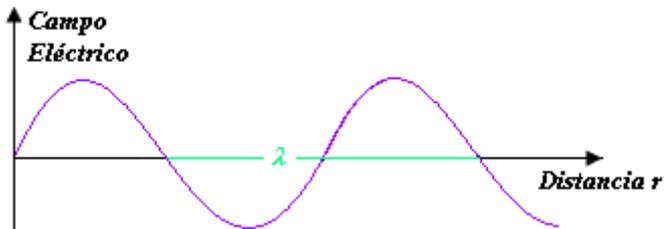


Figura 1.4.3.4

En ambos casos se obtiene que la variación del campo eléctrico sigue un movimiento ondulatorio.

En el caso del campo magnético, la oscilación es igualmente armónica pero perpendicular \vec{E} .

Consideremos una carga positiva q ubicada en el instante t en la posición Y, como se ilustra en la figura 1.4.3.5.

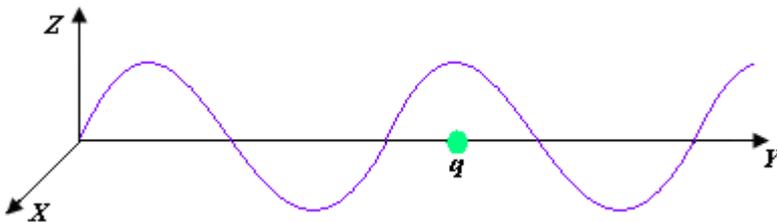
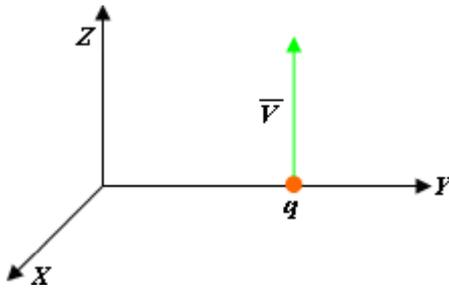


Figura 1.4.3.5

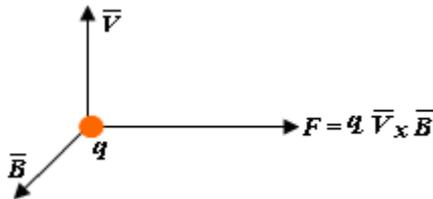
La magnitud del campo eléctrico en ese instante t , y en esa posición Y , acelerará la partícula en la dirección Z con una fuerza \bar{F} tal que:

$$\bar{F} = (q)(\bar{E})$$

Esta alcanzará alguna velocidad \bar{V} en esta dirección.



Debido a la presencia del campo magnético \bar{B} , de acuerdo a la ley de Lorentz, ecuación 1.4.2.1, esta carga sentirá una fuerza magnética que la empujará en la dirección Y.



Como se ha podido ilustrar, debido a la presencia de estos campos generados por una carga oscilante, cualquier carga ubicada en cualquier punto del espacio sentirá una fuerza acelerándose, a su vez esta misma carga acelerada, generará campos \bar{E} y \bar{B} .

Parámetros Característicos de la Oscilación en el Espacio

Longitud de Onda (λ)

Distancia recorrida en un ciclo de oscilación.

Número de Onda (σ)

Es el inverso de la longitud de onda.

Es el análogo en el espacio de la frecuencia para oscilaciones en el tiempo.

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\text{Ciclos}}{\text{cm}} \right) \quad (1.4.3.6)$$

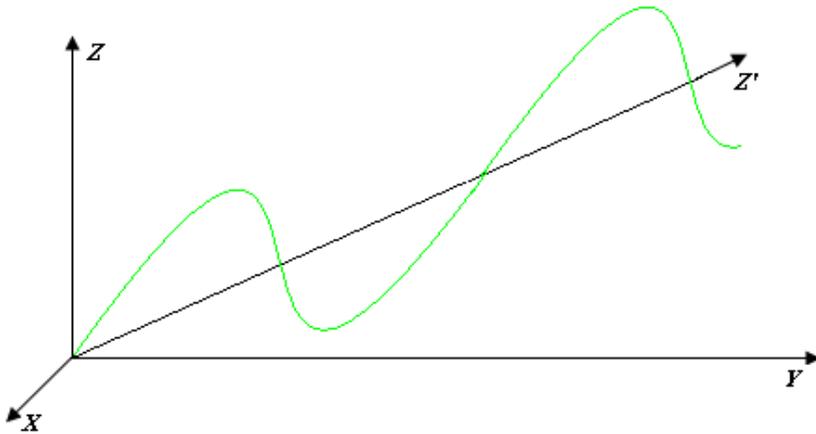
Número de Onda Angular (K)

Es el número de radianes de fase por unidad de desplazamiento a lo largo de la dirección en la cual se propaga la onda.

Es el análogo a la frecuencia angular para oscilaciones en el tiempo.

Ondas Planas Armónicas – Vector de Propagación

Supongamos que \bar{E} se desplaza como una onda de propagación plana armónica en la dirección del eje Z'.



Esta onda se expresa matemáticamente:

$$\psi(Z', t) = A \cos(\omega t - kZ')$$

Esta misma función se puede expresar en función del sistema de coordenadas (X, Y, Z).

$$\psi(X, Y, Z) = A \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

Siendo:

$$\vec{K} = K\vec{Z}' \text{ o vector de propagación.}$$

A = amplitud de la onda.

Es importante señalar que esta es la ecuación de la onda eléctrica magnética.

1.4.3.2 *Espectro Electromagnético*

La distinción básica de emisión de la radiación electromagnética viene dada por los valores de la longitud de onda.

Se pueden conseguir valores dentro del siguiente rango:

$$\lambda = (10^{-14} - 10^{+7})\text{m}$$

En lo que respecta a la luz, Maxwell estableció que esta correspondía a una onda luminosa, siendo ella misma una onda electromagnética entre otras, es decir, la combinación de un campo magnético y de un eléctrico oscilando.

La longitud de onda de la luz visible se encuentra en el espectro dentro del rango:

$$(400 - 700)10^{-9}\text{m}$$

MAXWELL, James Clerk.

Físico Escocés.

Edimbourg, 1831 – Cambridge, 1879.

En la figura 1.4.3.6 se presenta el espectro.

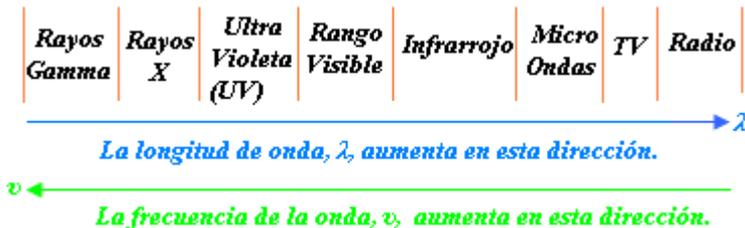


Figura 1.4.3.6

A título ilustrativo podemos mencionar que cuando un material se encuentra a altas temperaturas, se produce una emisión de ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda son cortas; sí se encuentra a temperatura ambiente, la radiación de ondas es invisible correspondiente a la longitud infrarroja, pero sí su temperatura es de

algunas centenas, el material emite luz visible de color rojo y si seguimos aumentándola, la emisión será anaranjada, amarilla, etc.

1.5 Cuantización de la Energía

En 1900, Max Planck estudiando el espectro de la radiación electromagnética de ciertos cuerpos en función de la temperatura, supuso que la energía de las moléculas solo pueden tener valores discretos, razón por la cual se dice que la energía está cuantizada. Además, estableció que la emisión o absorción energética de las moléculas se hace a través del intercambio de paquetes discretos de energía a los cuales posteriormente se les llamó fotones.

PLANCK, Max.

Físico Alemán.

Kiel, 1858 – Gottingen, 1947.

La energía correspondiente a una onda electromagnética de frecuencia ν , son aquellas que son múltiplos del cuanto $h\nu$.

Donde:

h = constante fundamental de Planck.

A partir de allí se estableció lo siguiente:

La materia al interactuar con ondas electromagnéticas, lo hace a través de partículas llamadas fotones cuyas características son:

- Energía $E = h\nu$
- Masa y carga nulas.
- Son partículas indistinguibles.

Durante el presente siglo se desarrolló el formalismo físico-matemático de la Física Cuántica y se encontró que la energía de las partículas microscópicas estaba dividida en niveles energéticos; estas partículas al pasar a niveles de menor energía lo hacen emitiendo la radiación electromagnética en forma de cuantos o fotones.

Podemos imaginarnos estos niveles como pisos de un edificio, cada uno siendo un nivel energético caracterizado por un número llamado número cuántico como se ilustra en la figura 1.5.1.

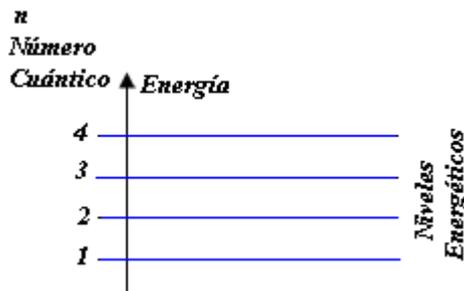


Figura 1.5.1

Supongamos que la partícula microscópica es un electrón y que se encuentra en el nivel energético cuyo número cuántico es $n = 2$, ilustrado en la figura 1.5.2

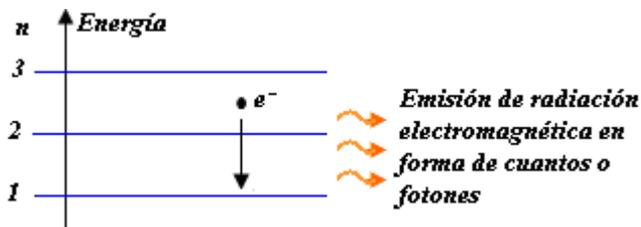


Figura 1.5.2

El electrón puede pasar espontáneamente al nivel $n = 1$, emitiendo los cuantos de luz, la diferencia energética entre ambos niveles corresponde al valor de la energía del fotón emitido y se interpreta como la mínima cantidad de energía emitida. La diferencia se expresa como sigue:

$$E_{(\text{nivel } n = 2)} - E_{(\text{nivel } n = 1)} = E_{\text{fotón}} = h\nu$$

Cabe destacar que la diferencia de los niveles energéticos atómicos corresponde a fotones de luz visible, infrarroja o ultravioleta.

1.6 Dualidad Onda-Partícula

Con la aparición del concepto de fotón se puso en evidencia lo que se conoce como ***Dualidad Onda –Partícula*** o Corpúsculo de la radiación; se evidencia la doble naturaleza, continua, referida al aspecto ondulatorio y discontinua, referida al corpúsculo.

Aspecto Onda

El aspecto onda se puso en evidencia con el experimento de interferencia de la doble rendija de Young.

YOUNG, Thomas.

Médico y Físico Inglés.

Milverston, Somersetshire, 1773 – Londres, 1829.

El experimento consiste en enviar luz proveniente de alguna fuente, la cual incide sobre una rendija de doble abertura, cada una de estas a su vez se comportan como fuentes de una onda propagándose en dirección de una pantalla, produciéndose sobre esta, franjas de interferencia, es decir, presencia de zonas claras y oscuras alternadas y de intensidades diferentes, traduciéndose estas diferencias en una forma ondulatoria.

El fenómeno se explica considerándose la superposición de las ondas electromagnéticas provenientes de las rendijas, por lo que, el campo eléctrico en algún punto de la pantalla corresponde a la suma vectorial de ambas ondas incidentes y sabiendo que la intensidad es proporcional al campo, esta disminuirá o aumentará dependiendo de la incidencia que presenten las ondas.

Aspecto Partícula

La noción de corpúsculo de la radiación tomó gran auge a raíz de la descripción realizada por Max Planck al fenómeno observado por éste, correspondiente a la emisión de radiación electromagnética de los cuerpos en función de la temperatura.

El fenómeno observado dio origen a la discretización de la energía, cuando se afirmó que se emitía radiación electromagnética en forma de cuantos o fotones.

Efecto Fotoeléctrico

A objeto de explicar dicho fenómeno, en 1905 Einstein propuso una extensión de la cuantización de la radiación que inicialmente había desarrollado Planck. Supuso que ésta contiene una corriente de partículas sin masa o paquetes de energía, llamados fotones.

EINSTEIN, Albert.

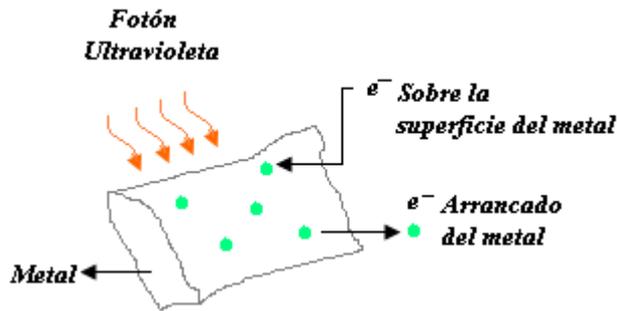
Físico Alemán.

Ulm, Alemania, 1879 – Princeton, USA, 1955.

El efecto consiste en lo siguiente:

Sea un material cargado negativamente, esto significa la presencia de los electrones que se desplazan más o menos libremente en la superficie. Si la temperatura a la cual se encuentran es moderada, los electrones no tienen suficiente energía para

desprenderse de las fuerzas que actúan sobre el producidas por las otras cargas a su alrededor.



Si se hace incidir la radiación electromagnética sobre el metal, los fotones correspondientes deberán tener una energía suficiente E_f para vencer las fuerzas que están actuando sobre el electrón.

Sí se llama Φ la energía mínima necesaria para desprender el electrón de la superficie del metal, se debe cumplir

$$E_f > \Phi$$

La energía restante de los electrones emitidos, se convierte en energía cinética la cual se traduce en ganancia de velocidad a la que se desplaza el electrón.

Como se puede observar, la radiación incidente necesaria para arrancar los electrones debe tener una E_f mínima, lo cual significa que no todas pueden lograr el efecto; es así, que se comprobó que si está en el rango visible, no hay emisión de electrones, en tanto que si corresponde a la ultravioleta, si se evidencia la emisión, esto es debido a que la energía correspondiente a los fotones del visible tienen menos que la del ultravioleta.

1.7 Relaciones de de Broglie

Simultáneamente al descubrimiento de los fotones, en 1923 de Broglie estableció las siguientes hipótesis referentes a las partículas materiales:

BROGLIE, Louis de.
Físico Francés.
Dieppe, 1892.

La hipótesis principal de Einstein para explicar el efecto fotoeléctrico fue establecer que la radiación podía tener propiedades de las partículas. El físico francés Louis Víctor de Broglie consideró lo planteado por Einstein y de la misma manera se preguntó si la materia se comportaba análogamente. Es decir, si además de las propiedades que le son propias a ellas se puede considerar que tengan igualmente las propiedades que caracterizan a las radiaciones electromagnéticas u ondas.

En este punto es importante señalar que estas propiedades se refieren a cantidades como la masa, la velocidad en el caso de las partículas y de lo que se conoce como longitud de onda y frecuencia asociada a las ondas.

Partiendo en consecuencia de lo establecido, en 1925 de Broglie postuló que dado que los fotones poseían las características ondulatorias y de las partículas, igualmente estas deben tener las mismas propiedades, es decir, poseer características propias de las ondas, lo que se conoce como el aspecto ondulatorio, y la de las partículas.

A partir de ello, se pueden establecer las siguientes formulaciones:

La función de onda Ψ caracteriza el estado cuántico de una partícula material, por ejemplo, el electrón, y se interpreta como la amplitud de probabilidad de presencia de esta partícula. A objeto de entender este concepto consideremos lo siguiente:

Se pretende medir la posición de la partícula que conforma un sistema determinado en un intervalo $(X_0, X_0 + \Delta X)$



Sabiendo que el estado está definido por la función Ψ , se puede afirmar lo siguiente:

La probabilidad de encontrar la partícula en el intervalo ΔX se puede expresar:

$$\Psi^2 \Delta X \quad (1.7.1)$$

Considerando toda la formulación descrita, se puede afirmar que la Física Cuántica proporciona una ley para el movimiento de las partículas microscópicas y es fundamentalmente de naturaleza ***Probabilística***.

Esto se interpreta como la posibilidad de predecir probabilidades de los posibles resultados.

No se conoce con certeza el resultado exacto.

Se puede además insistir en que la función de onda describe el movimiento de la partícula que se comporta como una onda localizándola en alguna región del espacio, lo cual se diferencia de la propia definición de la onda ya que esta se encuentra distribuida en una amplia región.

Experimento de Young con Electrones

A partir de lo establecido por de Broglie referente al carácter ondulatorio de las partículas materiales, manifestado a través de la función de onda Ψ , experimentalmente se pudo comprobar fácilmente con la ayuda de las doble rendijas de Young. En este caso la fuente no es de luz sino de electrones.

Los electrones al ser emitidos por la fuente pueden pasar por algunas de las aberturas. Estos hacen impacto al chocar con la placa detectora evidenciándose las regiones sobre las cuales inciden.

Se observa de la experiencia de Young, que este es idéntico al obtenido con los fotones de la misma longitud de onda.

Hemos afirmado que la función Ψ es la probabilidad de encontrar los electrones, esto nos permite decir que las zonas de mayor intensidad sobre la pantalla corresponden a las regiones en las cuales existe mayor probabilidad de encontrar los electrones.

Zonas de mayor incidencia \rightarrow Probabilidad más alta de encontrar el electrón.

1.8 Ejemplo de Sistemas Microscópicos

Sin pretender cumplir con todo el formalismo Físico-Matemático necesario, vamos a considerar algunos ejemplos donde se presentan las funciones de onda y sus energías.

Es importante señalar que en todos los casos, antes de tomar en cuenta el formalismo cuántico, se consideró que:

La energía del sistema viene dada por la suma de la energía cinética, función de la velocidad de la partícula, y de la energía potencial, función de las fuerzas actuantes que se pueden

manifestar como atracción, repulsión producida por las cargas positivas o negativas presentes e igualmente por la acción de los campos eléctricos o magnéticos.

1.8.1 Átomo de Hidrógeno

El átomo de hidrógeno está constituido por un protón y un electrón.

Se suponen ambas cargas puntuales que interactúan según la Ley de Coulomb.

La fuerza de atracción protón-electrón, se expresa según la ecuación 1.2.2.1

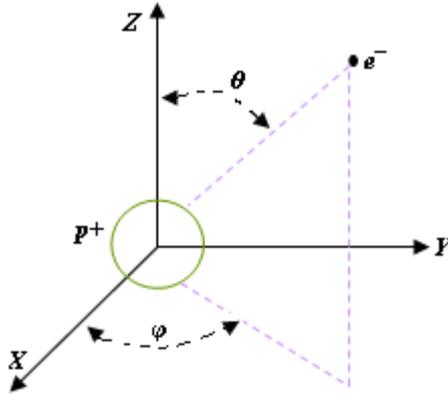
$$\vec{F} = \frac{-e^2}{r^2} \hat{e}_r$$

Tomando en cuenta la fuerza de atracción coulombiana y la velocidad del electrón, se puede demostrar que se tiene el siguiente movimiento:

Movimiento Electrónico

El movimiento electrónico corresponde al del electrón alrededor del núcleo considerando que su masa es mucho menor.

Las funciones de onda correspondientes están caracterizadas por 3 números cuánticos n , l y m .



$$\psi(r, \theta, \varphi) = R(r)Y'_m(\theta, \varphi) \quad (1.8.1.2)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, \dots, (n - 1)$$

$$m = -l, -l + 1, \dots, 0, 1, +l$$

Los niveles de energía de los estados son:

$$E = \frac{-e^2}{2an^2} \quad (1.8.1.3)$$

Siendo a un valor conocido.

A partir de la función $R(r)$ se puede obtener la probabilidad de encontrar el electrón a una distancia r del núcleo.

$$[R(r)r]^2 = \text{función de distribución radial.} \quad (1.8.1.4)$$

Se puede afirmar que el punto de máxima probabilidad corresponderá al radio de la órbita en la cual se encuentra el electrón; dependiendo del nivel en el cual se encuentre, las órbitas descritas pueden tener las siguientes formas ilustradas en la figura 1.8.1.

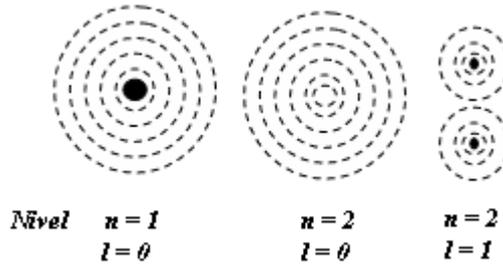


Figura 1.8.1

Cabe destacar que las zonas más oscuras son las de mayor probabilidad de encontrar el electrón.

1.8.2 Oscilador Armónico

El oscilador armónico representa un modelo de las vibraciones de los núcleos en un cristal o sólido; estos consisten en un sistema de átomos o iones regularmente distribuidos en el espacio formando una red periódica.

En la figura 1.8.2.1 se muestra un modelo unidimensional de una cadena lineal de átomos.

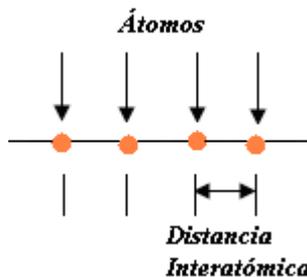


Figura 1.8.2.1

Sobre cada átomo se ejerce una fuerza promedio debido a la interacción con los otros, independientemente de la posición exacta

de estos, se puede suponer que cada átomo vibra de manera independiente, alrededor de un punto de equilibrio produciéndose un movimiento armónico idéntico al descrito en la figura 1.4.3.1.

Considerando la fuerza promedio y la velocidad del átomo alrededor de un punto de equilibrio y aplicando el formalismo cuántico se obtiene los niveles de energía.

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{h}{2\pi} \right) W \quad (1.8.2.1)$$

Donde:

W = la frecuencia angular de vibración.

$n = 1, 2, 3, \dots$

1.8.3 Molécula Diatómica

1.8.3.1 Movimiento Vibracional

Las vibraciones de una molécula diatómica se pueden aproximar a las de un oscilador armónico.

En la figura 1.3.1 se esquematizó esta molécula y en la figura 1.3.2 las fuerzas de atracción y repulsión.

Para esta molécula las energías se expresan:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \left(\frac{h}{2\pi} \right) (W - V_0) \quad (1.8.3.1.)$$

Donde:

V_0 = valor que depende de la fuerza máxima de atracción.

$n = 1, 2, 3, \dots$

Moléculas Heteropolares

Cuando uno de los átomos tiene más afinidad para atraer los electrones quedando cargado negativamente, en tanto que el otro positivamente, como se ilustra en la figura 1.8.3.1, e interactúa con algún campo electromagnético, puede absorber un fotón de energía $h\nu$ (figura 1.8.3.2) pasando a un estado de mayor energía, en consecuencia, de mayor vibración; puede igualmente emitir un fotón pasando a un nivel de menor energía vibracional (figura 1.8.3.3)

Es importante destacar que el movimiento de vibración se manifiesta como una variación de la distancia interatómica r .

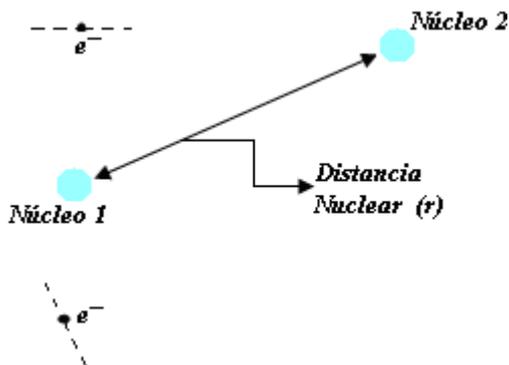


Figura 1.8.3.1

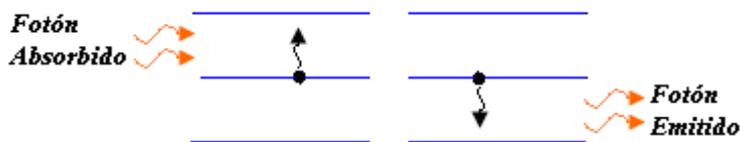


Figura 1.8.3.2 Figura 1.8.3.3

Moléculas Homopolares

Sí por el contrario, la molécula consiste de átomos idénticos, como se ilustra en la figura 1.8.3.4, se induce una separación núcleo - e⁻ y estos sufrirán oscilaciones forzadas y reemitirán radiación de la misma frecuencia Ω de la radiación electromagnética incidente; la vibración traerá como consecuencia que ciertos fotones con mayor o menor energía sean emitidos, dependiendo sí la molécula vibra más o menos lentamente. En la figura 1.8.3.5 se presentan estas alternativas.

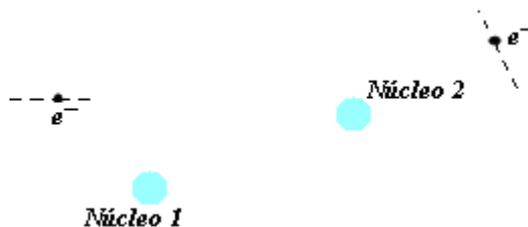


Figura 1.8.3.4

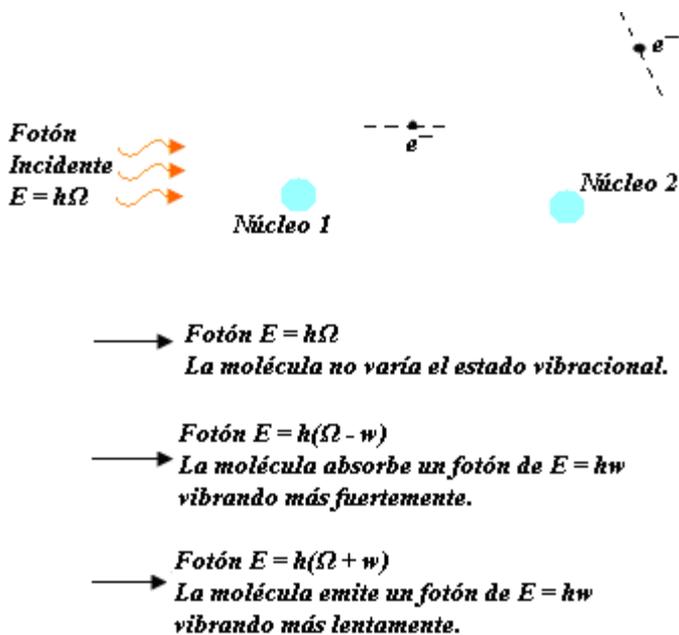


Figura 1.8.3.5

1.8.3.2 Movimiento Rotacional

Ilustremos el movimiento considerando la molécula diatómica conformada por los átomos A_1 y A_2 ubicados en el espacio tal y como se representa en la figura 1.8.3.6.

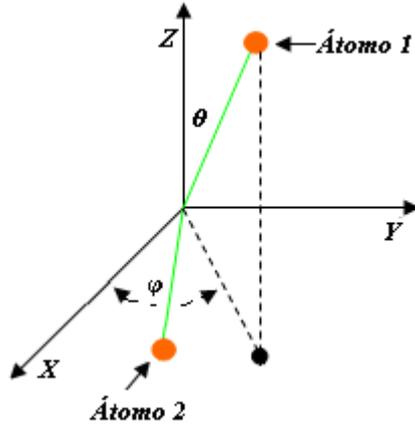


Figura 1.8.3.6

Para visualizar el movimiento, se puede decir que es equivalente al producido por una partícula imaginaria de cierta masa, en la cual se combinan las del átomo A_1 y A_2 .

La partícula imaginaria está forzada a permanecer a la distancia que separa los átomos, tomada desde el punto o; ubicada en esta posición, ella rota con una cierta velocidad angular, variando los ángulos θ y ϕ . Figura 1.8.3.7.

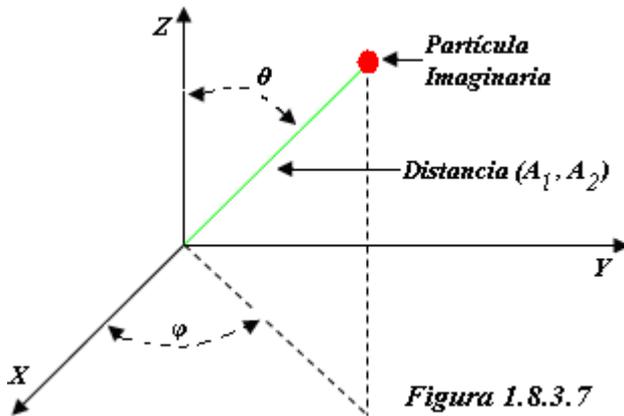


Figura 1.8.3.7

La función de onda $\Psi(\theta, \varphi)$ que representa este movimiento es tal que

$$|\Psi(\theta, \varphi)|^2 d\theta d\varphi \quad (1.8.3.2.)$$

Es la probabilidad de encontrar el eje (A_1, A_2) apuntando en alguna dirección ($d\theta, d\varphi$) alrededor de los ángulos θ, φ .

Las energías vienen dadas por:

$$E_l = Bh l(l+1) \quad (1.8.3.3)$$

La separación de dos niveles se expresa

$$(E_l - E_{l-1}) = Bh[l(l+1) - (l-1)l] = 2Bhl \quad (1.8.3.4)$$

Donde:

l = número cuántico rotacional.

B = constante rotacional.

Moléculas Heteropolares

Es el caso mostrado en la figura 1.8.3.1.

Sí una onda electromagnética incide sobre la molécula, esta absorbe un fotón de la misma frecuencia Ω de la incidente.

La absorción o emisión de la frecuencia $2Bl$, corresponde al pasaje de la molécula desde el nivel $(l-1)$ al nivel (l) , o viceversa al mismo tiempo que un fotón de frecuencia $\Omega = 2Bl$ es absorbido o emitido. Figura 1.8.3.8.

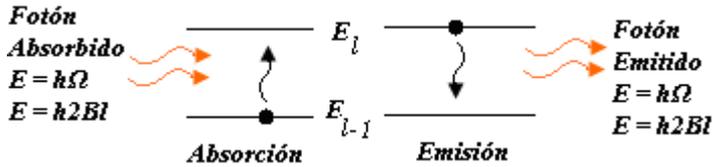


Figura 1.8.3.8

Moléculas Homopolares

Esta molécula se ilustró en la figura 1.8.3.4.

Al igual que lo señalado en el caso de las vibraciones, si un campo electromagnético de frecuencia Ω incide sobre la molécula, los electrones sufrirán oscilaciones forzadas induciéndose una separación núcleo-e- de los átomos, pudiéndose absorber o emitir fotones de energía.

$$E = h\Omega + (E_l - E_{l'}) \quad (1.8.3.5)$$

Tal que se debe cumplir la condición

$$(l - l') = \pm 2 \quad (1.8.3.6)$$

1.8.4 Partícula en una Caja

Consideremos una partícula encerrada en una caja como se muestra en la figura 1.8.4.1

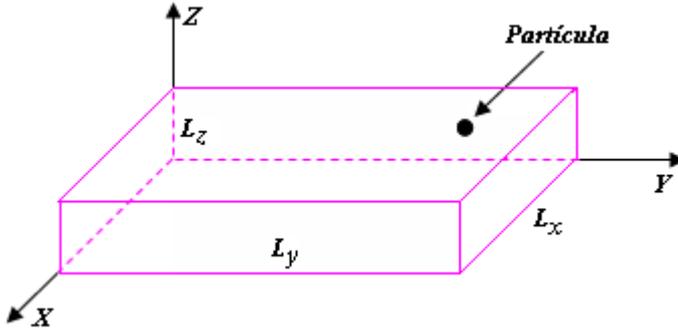


Figura 1.8.4.1

Dado que la dimensión $L_Y \gg L_X, L_Z$, se dice que es una caja unidimensional.

Sí la partícula se puede desplazar con una velocidad \bar{V} y sí su movimiento es libre debido a que no se ejerce ninguna fuerza sobre ella, se puede demostrar que se obtiene la siguiente función de onda:

$$\psi = \left(\frac{2}{L_Y} \right)^{\frac{1}{2}} \text{Sen} \left(\frac{nY\pi}{L_Y} \right) \quad (1.8.4.1)$$

Donde: n = número cuántico.

Dependiendo de la órbita o nivel de energía en el cual se encuentra la partícula, n puede tomar los valores

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

Por otra parte, los valores discretos de la energía se expresan

$$E_n = \frac{(n)^2(\hbar)^2}{8m(L_Y)^2} \quad (1.8.4.2)$$

Tenemos una serie completa de funciones de onda, cada una de las cuales corresponde a un valor diferente de la energía y está caracterizada por el número cuántico n .

En las figuras 1.8.4.2 y 1.8.4.3 se presentan Ψ y Ψ^2 en función de la variable Y .

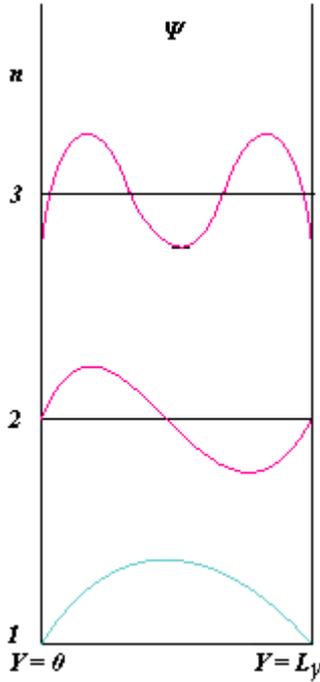


Figura 1.8.4.2

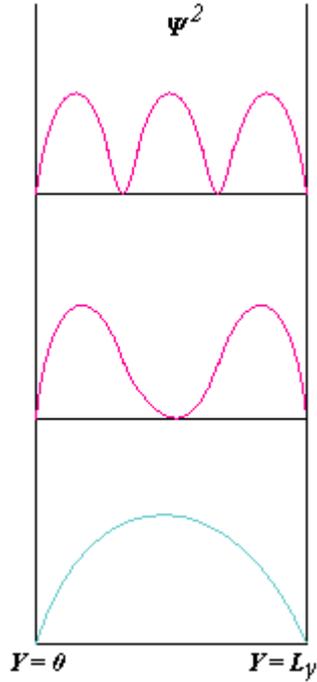
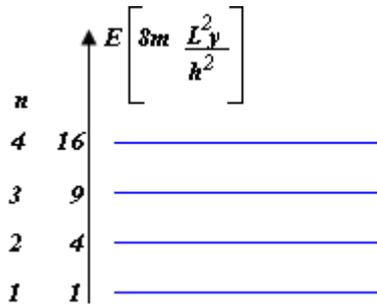


Figura 1.8.4.3

Los niveles energéticos se esquematizan de la siguiente manera:



Recordando lo expresado en la ecuación 1.7.1 en la cual se enunció la densidad Ψ^2 como la probabilidad de encontrar la partícula en cierto intervalo, de la figura 1.8.4.3, podemos afirmar lo siguiente:

Supongamos que la partícula se encuentra en el nivel $n = 1$.

En este se observa que la probabilidad de hallarla es máxima en el centro de la caja.

Sí consideramos que está en el nivel $n = 2$, se consigue que la probabilidad en este punto es nula y que se presentan dos máximos de hallar la partícula, y así sucesivamente para los siguientes niveles.

1.8.5 Partícula en una Caja Tridimensional

Sea un paralelepípedo rectangular cuyas aristas tienen la longitud L_x , L_y , L_z , ilustrada en la figura 1.8.5.1.

El movimiento de la partícula es libre debido a que no se ejercen fuerzas sobre ella.

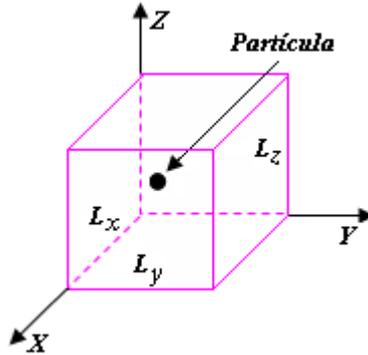


Figura 1.8.5.1

Se obtienen las siguientes funciones de onda:

$$\psi(x, y, z) = (\text{Cte}) \text{Sen}\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \text{Sen}\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \text{Sen}\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right) \quad (1.8.5.1)$$

La energía es la siguiente:

$$E = \frac{h^2}{8m} \left[\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2 \right] \quad (1.8.5.2)$$

Se consiguen en este caso, 3 números cuánticos atribuibles a la naturaleza tridimensional; estos varían independientemente unos de otros.

Sí $L_x = L_y = L_z = L$, la ecuación 1.8.5.2 se escribe

$$E = \frac{h^2}{8mL^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (1.8.5.3)$$

Algunas de las energías serán:

n_x	n_y	n_z	E	$\left(\frac{8mL^2}{h^2}\right)$
1	1	1	3	
2	1	1	6	
1	2	1	6	
1	1	2	6	
1	2	2	9	
2	1	2	9	
2	2	1	9	
1	1	3	11	
1	3	1	11	
3	1	1	11	
2	2	2	12	

Se observa que existen estados con diferentes números cuánticos que tienen la misma energía.

Los estados (2, 1, 1)
 (1, 2, 1)
 (1, 1, 2)

Tiene la energía $E\left(\frac{8mL^2}{h^2}\right) = 6$

Correspondientes a tres estados diferentes de la partícula

$$\psi^1 = \frac{8}{L^3} \text{Sen}\left(\frac{2x\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{y\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{z\pi}{L}\right) \quad (1.8.5.4)$$

$$\psi^2 = \frac{8}{L^3} \text{Sen}\left(\frac{x\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{2y\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{z\pi}{L}\right) \quad (1.8.5.5)$$

$$\psi^3 = \frac{8}{L^3} \text{Sen}\left(\frac{x\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{y\pi}{L}\right) \text{Sen}\left(\frac{2z\pi}{L}\right) \quad (1.8.5.6)$$

Los niveles energéticos para esta partícula se pueden esquematizar de la siguiente manera: Figura 1.8.5.2.

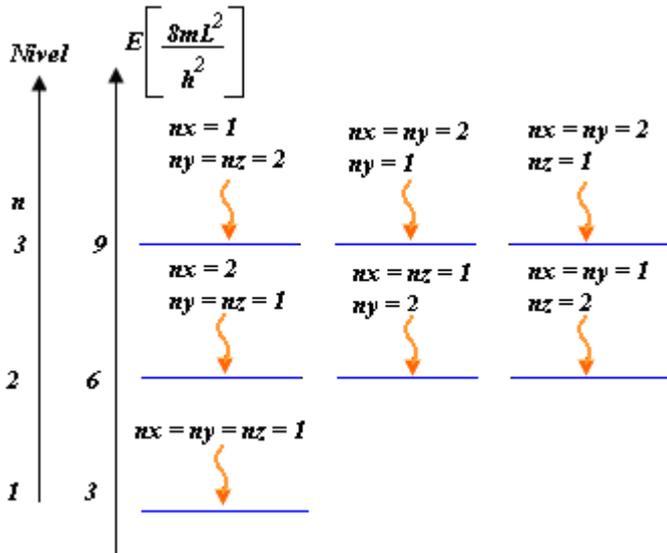


Figura 1.8.5.2

1.9 Energía y Cambio de Energía

Hemos estado hablando de energía pero, ¿cómo la debemos entender?

Para responder a esta pregunta, debemos saber que el formalismo físico-matemático de la Física Cuántica se aplica a los

sistemas en los cuales se considera la velocidad y las fuerzas a las cuales está sometido.

Recordemos los casos estudiados.

Caso: Átomo de Hidrógeno

Se consideró:

- Velocidad del electrón alrededor del núcleo.
- Fuerza de atracción coulombiana $p^+ - e^-$

Caso: Oscilador Armónico

- Velocidad del átomo alrededor de un punto de equilibrio.
- Fuerza ejercida sobre el átomo debido a la interacción con los otros.

Caso: Rotación Molecular

- Velocidad de rotación de los átomos alrededor del punto 0.

Caso: Partícula en una Caja

- Velocidad de desplazamiento de la partícula.
- Fuerzas nulas.

Cada uno de estos ejemplos ilustra los diferentes tipos de energía que un sistema puede tener, es así que encontramos:

ENERGÍA ELECTRÓNICA.

Se ilustró con el átomo de hidrógeno.

Se asocia al movimiento electrónico, es decir, de los electrones en su interacción con el núcleo al ser sometido a la fuerza coulombiana.

ENERGÍA DE VIBRACIÓN

Se presenta en moléculas de más de un átomo, ilustrada en el oscilador.

ENERGÍA DE ROTACIÓN

Se presenta en moléculas de más de un átomo, ilustrada en la rotación molecular.

En ocasiones se define:

$$E_{\text{int}} = E_{\text{vibración}} + E_{\text{rotación}} \quad (1.9.1)$$

ENERGÍA INTERMOLECULAR

Corresponde a la interacción molecular, determinadas por los modelos Lennard-Jones, Esfera Rígida, etc.

ENERGÍA DE TRASLACIÓN

Corresponde al desplazamiento de la partícula, ilustrada en el caso de la partícula en una caja.

Energía Interna

A PARTIR DE LO ANTERIORMENTE EXPUESTO, SE DEFINIRÁ LA ENERGÍA INTERNA DE CUALQUIER SISTEMA COMO LA SUMA DE TODAS LAS ENERGÍAS DESCRITAS.

A objeto de respetar cierta notación standard, esta energía interna la representaremos por la letra U, por lo cual, la expresión de esta será la siguiente:

$$U_{\text{interna}} = E_{\text{electrónica}} + E_{\text{vibración}} + E_{\text{rotación}} + E_{\text{traslación}} + E_{\text{intermolecular}} \quad (1.9.2)$$

Variación de Energía Interna

La variación de energía interna se define como la variación de cada una de las energías expresadas en la ecuación 1.9.2.

$$\Delta U_{\text{interna}} = \Delta E_{\text{electrónica}} + \Delta E_{\text{vibración}} + \Delta E_{\text{rotación}} + \Delta E_{\text{traslación}} + \Delta E_{\text{intermolecular}} \quad (1.9.3)$$

Los cambios de estas energías con llevan la emisión de ondas electromagnéticas distribuidas en un amplio rango de longitudes de onda.

Energía Interna y Sistemas Microscópicos

Sí observamos un sistema macroscópico compuesto de N partículas o moléculas, la energía interna se expresa.

$$U_{\text{Interna Sistema Macroscópico}} = \sum (E_{\text{electr}} + E_{\text{vibra}} + E_{\text{rotac}} + E_{\text{trasl}} + E_{\text{intermol}})_{\text{molécula}_i} \quad (1.9.4)$$

La variación de esta energía se escribe:

$\Delta U_{\text{Interna Sistema Macroscópico}} =$

$$\sum_{i=1}^N \Delta(E_{\text{electr}} + E_{\text{vibra}} + E_{\text{rotac}} + E_{\text{trasl}} + E_{\text{intermol}}) \quad (1.9.5)$$

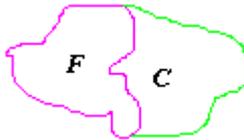
molécula_i

ES IMPORTANTE SEÑALAR QUE DEPENDIENDO DEL SISTEMA, SÍ ES UN GAS, SÓLIDO, LÍQUIDO Y DE LAS CONDICIONES EN LAS CUALES SE ENCUENTRAN, SE CONSIDERARÁ UNA, ALGUNAS O TODAS ESTAS ENERGÍAS SEÑALADAS.

Sistemas Macroscópicos en Contacto

La energía de sistemas macroscópicos que están en contacto, está definida por la suma de las diferentes energías de cada sistema más la contribución energética debido a las interacciones que se pueden presentar entre ellos.

Sí se tienen dos sistemas macroscópicos en contacto, F y C que componen el sistema FC, la energía de este se expresa:



$$U_{FC} = U_F + U_C + U_{\text{interacción F-C}} \quad (1.9.6)$$

Comúnmente se considera que la energía U de interacción F-C es despreciable en relación a U_F y U_C , en consecuencia U_{FC} se escribe:

$$U_{FC} = U_F + U_C \quad (1.9.7)$$

Retomando la ecuación 1.9.4, esta ecuación se puede expresar:

$$U_{FC} = \left[\sum_{i=1}^{N_F} (E_{\text{electr}} + E_{\text{vibra}} + E_{\text{rotac}} + E_{\text{trasl}} + E_{\text{intermol}})_{\text{molécula}_i} \right]_F + \left[\sum_{j=1}^{N_C} (E_{\text{electr}} + E_{\text{vibra}} + E_{\text{rota}} + E_{\text{trasl}} + E_{\text{intermol}})_{\text{molécula}_j} \right]_C \quad (1.9.8)$$

1.10 Equivalencia Masa-Energía

Un sistema, cualquiera que sea, debido a su masa, posee energía.

La relación masa-energía se expresa:

$$E = mc^2 \quad (1.10.1)$$

Esta fórmula fue propuesta por Einstein. Se debe entender como sigue: cualquier partícula con cierta masa contiene en sí misma una alta cantidad de energía.

El sol, la Tierra, el protón, el neutrón, etc. Son ejemplos de esta equivalencia.

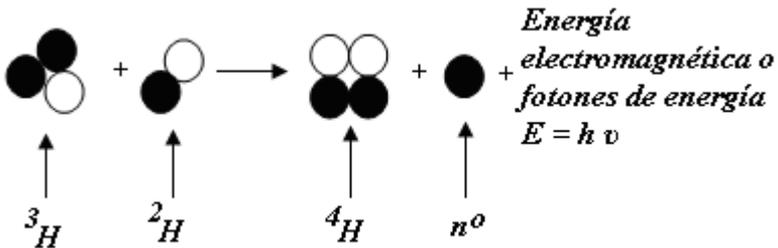
Para ilustrar, tomemos el proceso de fusión nuclear: elementos más ligeros se fusionan para dar origen a otros más pesados, emitiéndose cierta cantidad de energía.

ELEMENTOS LIGEROS:

- Núcleos de tritio (${}^3\text{H}$): Compuesto de un p^+ y dos n^0 .
- Núcleo de deuterio (${}^2\text{H}$): Compuesto de un p^+ y un n^0 .

ELEMENTO PESADO:

- Núcleo de helio (${}^4\text{H}$): Compuesto de dos p^+ y dos n^0 .



La energía debido a la masa de los núcleos de tritio y deuterio es mayor que la contenida en el helio y el neutrón, por lo que la diferencia de energía se emite en forma de fotones. Esta es la razón por la cual se dice que la masa del sol está disminuyendo.