

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
Secretaría Académica

**M8**

REFORMA ACADÉMICA DEL NIVEL MEDIO SUPERIOR

*Texto*

FISICA, PRIMERA EDICION 1995

*J*

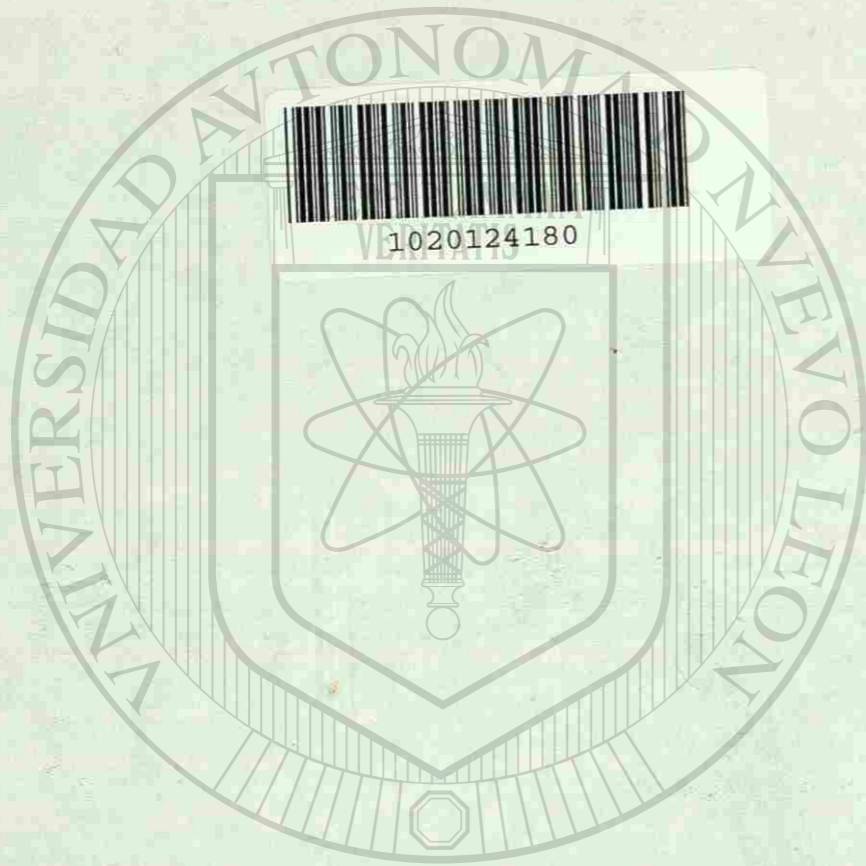
**Física**

SEGUNDA PARTE

QC21  
U530  
1995  
v.8  
pte.

Qc21  
U530  
1995a  
v.8  
pte.2

0120-21260



1020124180



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

INDICE

1	Introducción	7
2	Naturaleza de la luz	15
3	Velocidad de la luz	25
4	Fotometría	35
5	Flujo luminoso	45
6	Intensidad luminosa	55
7	Iluminación	65
8	Espectro electromagnético y espectro visible	75
9	Reflexión de la luz	85
10	Espejos planos	95
11	Espejo esférico	105
12	Rayos principales	115
13	Refracción de la luz	125
14	Refracción de la luz	135
15	Refracción de la luz	145
16	Refracción de la luz	155
17	Refracción de la luz	165
18	Refracción de la luz	175
19	Refracción de la luz	185
20	Refracción de la luz	195
21	Refracción de la luz	205
22	Refracción de la luz	215
23	Refracción de la luz	225
24	Refracción de la luz	235
25	Refracción de la luz	245
26	Refracción de la luz	255
27	Refracción de la luz	265
28	Refracción de la luz	275
29	Refracción de la luz	285
30	Refracción de la luz	295
31	Refracción de la luz	305
32	Refracción de la luz	315
33	Refracción de la luz	325
34	Refracción de la luz	335
35	Refracción de la luz	345
36	Refracción de la luz	355
37	Refracción de la luz	365
38	Refracción de la luz	375
39	Refracción de la luz	385
40	Refracción de la luz	395
41	Refracción de la luz	405
42	Refracción de la luz	415
43	Refracción de la luz	425
44	Refracción de la luz	435
45	Refracción de la luz	445
46	Refracción de la luz	455
47	Refracción de la luz	465
48	Refracción de la luz	475
49	Refracción de la luz	485
50	Refracción de la luz	495
51	Refracción de la luz	505
52	Refracción de la luz	515
53	Refracción de la luz	525
54	Refracción de la luz	535
55	Refracción de la luz	545
56	Refracción de la luz	555
57	Refracción de la luz	565
58	Refracción de la luz	575
59	Refracción de la luz	585
60	Refracción de la luz	595
61	Refracción de la luz	605
62	Refracción de la luz	615
63	Refracción de la luz	625
64	Refracción de la luz	635
65	Refracción de la luz	645
66	Refracción de la luz	655
67	Refracción de la luz	665
68	Refracción de la luz	675
69	Refracción de la luz	685
70	Refracción de la luz	695
71	Refracción de la luz	705
72	Refracción de la luz	715
73	Refracción de la luz	725
74	Refracción de la luz	735
75	Refracción de la luz	745
76	Refracción de la luz	755
77	Refracción de la luz	765
78	Refracción de la luz	775
79	Refracción de la luz	785
80	Refracción de la luz	795
81	Refracción de la luz	805
82	Refracción de la luz	815
83	Refracción de la luz	825
84	Refracción de la luz	835
85	Refracción de la luz	845
86	Refracción de la luz	855
87	Refracción de la luz	865
88	Refracción de la luz	875
89	Refracción de la luz	885
90	Refracción de la luz	895
91	Refracción de la luz	905
92	Refracción de la luz	915
93	Refracción de la luz	925
94	Refracción de la luz	935
95	Refracción de la luz	945
96	Refracción de la luz	955
97	Refracción de la luz	965
98	Refracción de la luz	975
99	Refracción de la luz	985
100	Refracción de la luz	995

UNIDAD IV

MOVIMIENTO ONDULATORIO

1	Introducción	1
2	Velocidad de propagación del sonido	2
3	Efecto Doppler	3
4	Ruido	4

## ÍNDICE

### A.- MOVIMIENTO OSCILATORIO

	Página
1 Introducción	7
2 Movimiento periódico	7
3 Movimiento armónico simple	10
4 El péndulo simple	16
5 Cuerpo-resorte	20

### B.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

1 Introducción	25
2 Tipos de onda	26
3 Magnitudes que caracterizan a las ondas	29
4 Fenómenos ondulatorios	32
Reflexión	33
Refracción	34
Superposición	35
Interferencia	36
Difracción	37
5 Ondas estacionarias	38
6 Resonancia	41

### C.- SONIDO

1 Introducción	42
2 Velocidad de propagación del sonido	43
3 Efecto Doppler	47
4 Ruido	52

### D.- OPTICA

1 Introducción	53
2 Naturaleza de la luz	54
3 Velocidad de la luz	56
4 Fotometría	59
Flujo luminoso	61
Intensidad luminosa	62
Iluminación	63
5 Espectro electromagnético y espectro visible	67
6 Reflexión de la luz	71
7 Espejos planos	72
8 Espejo esférico	73
9 Rayos principales en espejos. Obtención de imágenes	75
10 Ecuación del espejo	76
11 Refracción de la luz	80
12 Reflexión interna total	83
13 Lentes	85
14 Rayos principales en lentes. Obtención de imágenes	87
15 Ecuación de las lentes	89
16 Dispositivos ópticos	91
17 Interferencia, Difracción y Polarización	94
Autoevaluación	100

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### IV.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

##### OBJETIVO:

Al término de la unidad, el alumno:

- Explicará el comportamiento de las ondas
- Caracterizará las ondas
- Definir los siguientes tipos de movimiento
  - a) Periódico
  - b) Oscilatorio
  - c) Amortiguado
  - d) Forzado
  - e) Armónico simple.
- Explicará la forma en que se originan las ondas sonoras
- Comprenderá la propagación de las ondas sonoras
- Comprenderá la naturaleza de la luz
- Representará la formación de imágenes en los diferentes tipos de lentes
- Representará la combinación de las lentes en dispositivos ópticos.

##### METAS:

- Caracterizar el movimiento armónico simple
- Enunciar la Ley de Hooke
- Definir onda mecánica
- Diferenciar entre ondas longitudinales y transversales
- Explicar los conceptos:
  - a) longitud de onda
  - b) frecuencia
  - c) período
  - d) amplitud
  - e) desplazamiento

- f) fase
- g) reflexión
- h) refracción
- i) difracción
- j) interferencia
- k) polarización

- Resolver como mínimo cinco problemas relacionados con velocidad, período, longitud de onda y frecuencia.
- Caracterizar las ondas sonoras.
- Resolver como mínimo cinco problemas en donde se calcule la intensidad de la onda sonora.
- Identificar el efecto Doppler en situaciones cotidianas.
- Describir mediante esquemas el comportamiento y propagación de la luz
- Relacionar las características generales de las ondas con el comportamiento de las ondas de la luz.
- Describir los experimentos de Galileo, Roemer, Fizeau y Michelson para medir la velocidad de la luz.
- Explicar los conceptos de:
  - a) flujo luminoso,
  - b) intensidad luminosa
  - c) iluminación.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con el cálculo de flujo luminoso, intensidad luminosa e iluminación.
- Describir el espectro de la luz visible tomando como referencia la frecuencia y la longitud de la onda.
- Resolver como mínimo tres problemas relacionados con la frecuencia y la longitud de onda de la luz.
- Explicar el fenómeno de la polarización de la luz.
- Explicar con un dibujo las leyes de la reflexión de la luz.

- Aplicar las leyes de la reflexión de la luz en la solución de un mínimo de cuatro problemas típicos.
- Establecer la Ley de Snell.
- Resolver como mínimo tres problemas en donde se aplique la Ley de Snell.
- Explicar algunos fenómenos naturales en donde se observe la reflexión y la refracción de la luz.
- Construir diagramas de rayos para determinar la posición de la imagen, caracterizándola como real o virtual, mediante el uso de lentes o espejos.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con lentes y espejos, en donde se determine la posición de la imagen, indicando si es real o virtual.
- Explicar el funcionamiento de algunos dispositivos ópticos.

## A.-MOVIMIENTO OSCILATORIO

### 1.- Introducción:

En esta unidad consideraremos un tipo de movimiento en el cual la fuerza resultante que actúa sobre un objeto varía periódicamente. La fuerza puede variar en magnitud o en dirección.

Existen en la naturaleza acontecimientos cotidianos de este tipo de movimiento, por ejemplo: el movimiento de un péndulo, un satélite alrededor de la Tierra, el día y la noche, las fases de la luna, las estaciones del año, las mareas, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el respirar y el latir del corazón.

En el ejemplo del latir del corazón, cada 0.5s aproximadamente, se contrae, o sea cada vez que transcurre un tiempo igual a 0.5s el corazón se encuentra en iguales condiciones de movimiento.

Existen movimientos en los cuales el cuerpo va y viene por la misma trayectoria, repitiéndola todo el tiempo, por ejemplo el movimiento de un cuerpo suspendido de un resorte, el movimiento de los iones en un cristal, el movimiento de las cargas eléctricas en un circuito oscilador, etc.

El movimiento de un péndulo es un caso ideal, cuando consideramos despreciable la fuerza de fricción, de tal forma que oscilará indefinidamente. *Cuando actúa la fuerza de fricción en el péndulo que oscila, es el caso real, decae o disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento amortiguado. Cuando un agente externo por ejemplo una fuerza impulsora, suministra energía y el movimiento del péndulo es uniforme, a este movimiento se le llama forzado.*

Analizaremos el movimiento del péndulo que oscila, en donde los extremos de la oscilación están igualmente separados de la posición de equilibrio.

### 2.- Movimiento periódico

En muchos casos existen movimientos o procesos que tienen la característica de que al cabo de un tiempo fijo, repiten sus condiciones o estado de movimiento.

- Aplicar las leyes de la reflexión de la luz en la solución de un mínimo de cuatro problemas típicos.
- Establecer la Ley de Snell.
- Resolver como mínimo tres problemas en donde se aplique la Ley de Snell.
- Explicar algunos fenómenos naturales en donde se observe la reflexión y la refracción de la luz.
- Construir diagramas de rayos para determinar la posición de la imagen, caracterizándola como real o virtual, mediante el uso de lentes o espejos.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con lentes y espejos, en donde se determine la posición de la imagen, indicando si es real o virtual.
- Explicar el funcionamiento de algunos dispositivos ópticos.

## A.-MOVIMIENTO OSCILATORIO

### 1.- Introducción:

En esta unidad consideraremos un tipo de movimiento en el cual la fuerza resultante que actúa sobre un objeto varía periódicamente. La fuerza puede variar en magnitud o en dirección.

Existen en la naturaleza acontecimientos cotidianos de este tipo de movimiento, por ejemplo: el movimiento de un péndulo, un satélite alrededor de la Tierra, el día y la noche, las fases de la luna, las estaciones del año, las mareas, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el respirar y el latir del corazón.

En el ejemplo del latir del corazón, cada 0.5s aproximadamente, se contrae, o sea cada vez que transcurre un tiempo igual a 0.5s el corazón se encuentra en iguales condiciones de movimiento.

Existen movimientos en los cuales el cuerpo va y viene por la misma trayectoria, repitiéndola todo el tiempo, por ejemplo el movimiento de un cuerpo suspendido de un resorte, el movimiento de los iones en un cristal, el movimiento de las cargas eléctricas en un circuito oscilador, etc.

El movimiento de un péndulo es un caso ideal, cuando consideramos despreciable la fuerza de fricción, de tal forma que oscilará indefinidamente. *Cuando actúa la fuerza de fricción en el péndulo que oscila, es el caso real, decae o disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento amortiguado. Cuando un agente externo por ejemplo una fuerza impulsora, suministra energía y el movimiento del péndulo es uniforme, a este movimiento se le llama forzado.*

Analizaremos el movimiento del péndulo que oscila, en donde los extremos de la oscilación están igualmente separados de la posición de equilibrio.

### 2.- Movimiento periódico

En muchos casos existen movimientos o procesos que tienen la característica de que al cabo de un tiempo fijo, repiten sus condiciones o estado de movimiento.

Se denomina movimiento periódico, a aquél en el que el sistema repite sus condiciones de movimiento, al cabo de cierto intervalo de tiempo, que va a ser constante, por ejemplo, el movimiento circular uniforme (estudiado en el Módulo VI), el movimiento del péndulo, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el latir del corazón, etc.

Las magnitudes que describen el movimiento periódico son: el período (T) y la frecuencia (f). El período es el tiempo mínimo al cabo del cual se repiten las condiciones del proceso. En particular en el movimiento circular uniforme es el tiempo que tarda en dar una revolución completa. En general, en el movimiento periódico las condiciones del proceso se repiten cuando han realizado un ciclo o una oscilación completa. Siendo un ciclo o una oscilación completa cuando el cuerpo va de una posición extrema a otra y regresa a la posición inicial (o sea de la posición A a C y regresa a A, ver figura No. 1).

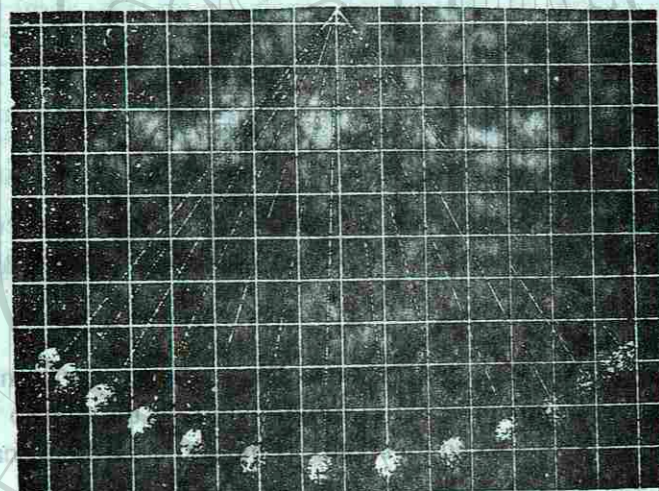


FIGURA 1 Movimiento periódico

La frecuencia se define como el número de veces que el proceso repite sus condiciones en la unidad de tiempo. Para calcular la frecuencia se necesita conocer las veces ciclos que el proceso repite sus condiciones en un tiempo cualquiera, entonces

$$f = \frac{\text{Numero de ciclos}}{\text{tiempo}}$$

dado que  $f$  y  $T$  son magnitudes que caracterizan el mismo proceso, de tal forma que se relacionan entre si

$$\text{para un ciclo, nos quedaría } f = \frac{1}{\text{tiempo}}$$

como el tiempo es el período (T), entonces  $f = \frac{1}{T}$

quedando las dos magnitudes relacionadas de esta manera.

En el Sistema Internacional, la unidad de período es el segundo (s). La unidad de la frecuencia es el inverso del segundo  $\left(\frac{1}{s}\right)$ , que se interpreta como ciclo/segundo u

oscilación/segundo. A la unidad del inverso del segundo se le llama Hertz (Hz), en honor del físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) descubridor de las ondas electromagnéticas. De tal manera que si un sistema tiene una frecuencia de 50 Hz, esto quiere decir que el proceso se repite 50 veces por segundo.

**Ejemplo 1.** El médico determina que el corazón del paciente está latiendo 120 pulsaciones en un minuto. Determina la frecuencia y el período de las pulsaciones.

Solución:

El corazón es el proceso, en este caso particular y realiza 120 pulsaciones (ciclos) en un minuto, interpretándose que repite sus condiciones 120 veces por minuto. Este dato es la frecuencia, pero expresada en ciclos por minuto

$$\text{entonces } f = \frac{\text{numero de ciclos}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{sustituyendo } f = \frac{120 \text{ ciclos}}{60 \text{ segundos}} = 2 \frac{1}{s}$$

$$f = 2 \text{ Hz}$$

$$\text{Como } T = \frac{1}{f}$$

$$\text{sustituyendo } T = 2 \frac{1}{1}$$

$$T = 0.5s$$

**Ejemplo 2.** Un cuerpo suspendido de un resorte tiene un período de oscilaciones de 4 segundos. Calcula la frecuencia de las oscilaciones de dicho cuerpo.



$$T = 4s$$

Como  $f = \frac{1}{T}$

sustituyendo  $f = \frac{1}{4s}$

$$f = 0.25$$

**Ejemplo 3.-** Un péndulo realiza oscilaciones y se observa que cada 4 segundos realiza 12 oscilaciones completas. Determina la frecuencia y el período de las oscilaciones completas.

Como  $f = \frac{\text{numero de ciclos}}{\text{tiempo}}$

sustituyendo  $f = \frac{12 \text{ oscilaciones}}{4 \text{ segundos}}$

$$f = 3 \text{ Hz}$$

Como  $T = \frac{1}{f}$

sustituyendo

$$T = \frac{1}{3} \text{ s}$$

$$T = 0.33 \text{ s}$$

### 3.- Movimiento armónico simple

Dentro de la variedad de movimientos periódicos se destaca una clase especial, que son aquellos movimientos en los cuales el cuerpo repite su trayectoria. Este es el caso del movimiento de un péndulo en el cual el cuerpo va y viene por la misma trayectoria, repitiéndola todo el tiempo. A los movimientos periódicos en los cuales el cuerpo repite la trayectoria se le llama movimiento oscilatorio. Este es el caso del movimiento de un cuerpo suspendido de un resorte, el movimiento de los iones en un cristal, etc.

La distancia entre la posición de equilibrio y la posición extrema ocupada por un cuerpo que oscila se le conoce como amplitud del movimiento, en la fig. 1, es de la posición B a la posición A, también es de la posición B a la posición C.

Al analizar el movimiento de un péndulo y observar el péndulo cuando está en la posición vertical (ver fig.1 posición B), la fuerza resultante que actúa sobre el cuerpo es cero, porque el peso del cuerpo está equilibrado con la tensión de la cuerda. En esta posición de equilibrio el cuerpo puede permanecer todo el tiempo si no se altera su estado por un agente externo. Si alejamos el péndulo de la posición de equilibrio, aplicando una fuerza

externa, y lo soltamos, el cuerpo comienza a moverse hacia la posición de equilibrio, pero cuando llegue a ella va a seguir su movimiento por inercia, debido a la velocidad que posee, por lo cual el cuerpo va a moverse alejándose de la posición de equilibrio, hacia el otro lado, hasta que su velocidad sea cero, en los extremos de la oscilación, cuando su amplitud es máxima, ver fig.1 en la posición A o en B. Entonces cambia el sentido de movimiento y regresa hacia la posición, de equilibrio, pero de nuevo la pasa, llegando al extremo de la oscilación, realizando así una oscilación completa o ciclo. De este análisis se puede concluir que existe una fuerza que tiende a regresar al cuerpo a la posición de equilibrio y que provoca las variaciones de su velocidad. A la fuerza que hace oscilar a un cuerpo se le llama fuerza restauradora o de restitución.

De todos los procesos oscilatorios que existen vamos a estudiar el caso más sencillo. Si un sistema cualquiera, cumple con las siguientes condiciones:

1) Presenta una fuerza proporcional al desplazamiento y dirigida siempre hacia la posición de equilibrio, o sea que tiende a regresar al cuerpo a la posición de equilibrio, con un sentido contrario al desplazamiento:

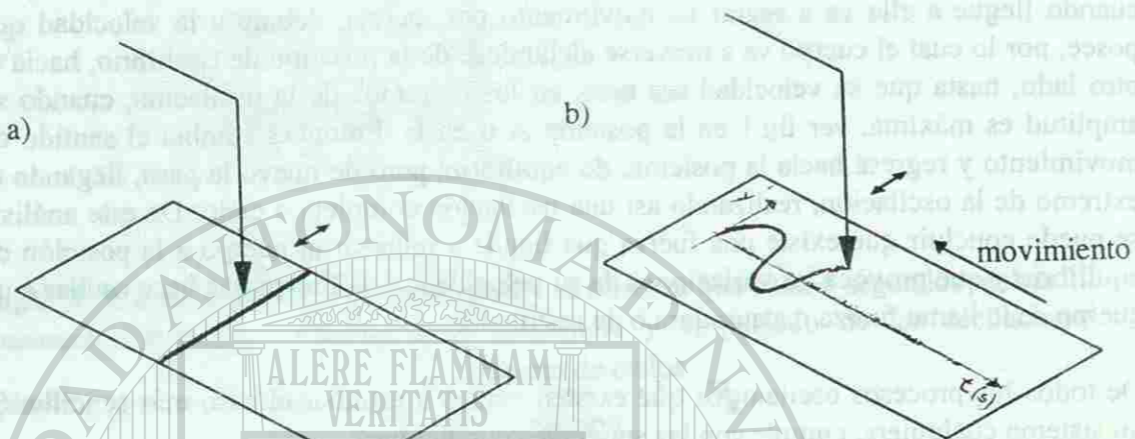
$$F = -kx$$

donde  $x$  es el desplazamiento, medido desde la posición de equilibrio,  $k$  es la constante de proporcionalidad, que puede ser un valor o una expresión, que tenga un valor constante para el sistema dado, y el signo menos indica que la fuerza  $F$  y el desplazamiento  $x$  tienen sentido contrario.

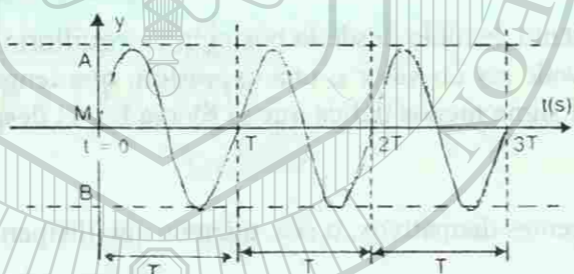
2) No presente agentes disipativos, o sea, agentes que disipen energía por fricción u otra causa.

Entonces el sistema realiza un movimiento oscilatorio llamado movimiento armónico simple, lo abreviaremos por MAS.

El movimiento del péndulo que oscila a lo largo de un plano único en un arco pequeño es un ejemplo de movimiento armónico simple. Esto se puede visualizar considerando que, del objeto suspendido se hace escapar arena, al encontrarse oscilando trazará una línea recta de corta longitud una y otra vez, ver fig.2. Si hacemos oscilar el péndulo arriba de una banda que se mueve uniformemente en dirección perpendicular al plano del péndulo oscilante, trazará una curva senoidal o sinusoidal, en donde se considera el movimiento de la banda como la variable tiempo y el péndulo realizando un movimiento armónico simple, formándose una gráfica que nos representa la posición del péndulo con respecto al tiempo, entonces, la gráfica de posición contra tiempo del movimiento armónico simple es una curva senoidal, ver fig.2b.



**Figura 2.** a) Línea recta de arena trazada por el péndulo al oscilar sobre la banda sin moverse. b) Curva senoidal o sinuoidal trazada por el péndulo cuando la banda se mueve uniformemente y en dirección perpendicular al plano de oscilación.



**Figura 3.** Gráfica de posición contra tiempo del movimiento armónico simple.

El nombre MAS proviene del hecho de que la posición del cuerpo queda determinada por una función armónica (seno o coseno) del tiempo.

Es importante destacar que en este caso, por primera vez, estudiamos el movimiento de un cuerpo bajo la acción de una fuerza variable. Por otra parte, a pesar de que la segunda condición, de la no presencia de agentes disipativos, puede parecer demasiado ideal, sí existen muchos sistemas que cumplen aproximadamente estas condiciones y por ello la importancia del estudio de este movimiento.

Ejemplos de estos sistemas, que pueden realizar un movimiento armónico simple, son: un péndulo cuando su desplazamiento desde la posición de equilibrio no es grande, un cuerpo suspendido de un resorte despreciando la fricción, las variaciones de la carga de un capacitor en un circuito compuesto por un inductor y un capacitor (sin resistencia), etc.

Analicemos el caso de un sistema mecánico, a partir de la Segunda Ley de Newton

$$F = ma$$

la fuerza debe ser proporcional al desplazamiento y en sentido contrario, entonces

$$F = -kx$$

sustituyendo

$$-kx = ma$$

despejando

$$a = -\frac{k}{m}x$$

A partir de la ecuación se observa que la aceleración del cuerpo no es constante, sino que depende de la magnitud del valor del desplazamiento  $x$ .

Dado que tanto  $k$  como  $m$  son positivas, se puede expresar el cociente  $k/m$  como una magnitud al cuadrado, o sea entonces

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

y por tanto

$$a = -\omega_0^2 x$$

a la magnitud  $\omega_0$ , se le llama frecuencia cíclica, o sea que un sistema, que tenga su aceleración en función del desplazamiento en la forma

$$a = -\omega_0^2 x$$

siempre que  $\omega_0^2$  sea una magnitud positiva y constante, realizará un movimiento armónico simple (MAS).

Analicemos el por qué de la magnitud llamada frecuencia cíclica, que nos recuerda el movimiento circular uniforme (módulo VI).

Suponiendo que tenemos un cuerpo realizando un movimiento circular uniforme, con velocidad angular constante  $\omega_0$ , en un círculo de radio  $R$ . Vamos a analizar la proyección de este movimiento en un eje cualquiera, por ejemplo el eje  $x$ . Esto sería lo mismo que si iluminamos el cuerpo en movimiento, a lo largo del plano del círculo, y observamos el movimiento de la sombra del cuerpo en una pantalla, (ver fig. 4). Lo anterior lo podemos obtener en un plato giratorio (tocadiscos) y colocando cuatro monedas sobre el borde e iluminando el aparato con una linterna colocada a la misma altura, de tal manera que la dirección del eje del rayo de luz de la linterna pase por el centro del plato giratorio. Al utilizar una pared como pantalla para proyectar la sombra del plato y las monedas. Se hace girar el plato a razón de 33 1/3 r.p.m. observando el movimiento de las monedas de la posición A a la B como un péndulo y la proyección en la pantalla como un movimiento armónico simple.

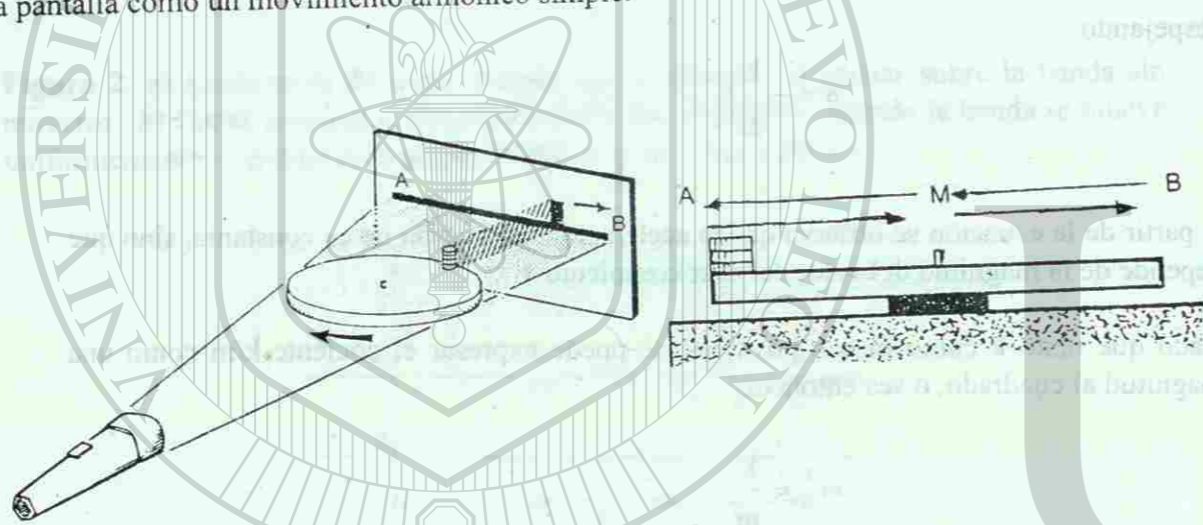


Figura 4. La sombra de las monedas colocadas sobre el borde del plato giratorio describe, sobre la trayectoria AB, un movimiento armónico simple.

Por lo anterior podemos interpretar un movimiento armónico simple como la proyección de un movimiento circular uniforme a lo largo de uno de sus diámetros. Esta interpretación es otra de las contribuciones hechas por Galileo, quien concluyó lo anterior al analizar el movimiento de una de las lunas de Jupiter en el año 1610. Tomando en cuenta esta analogía, determinaremos el período de oscilación de un péndulo simple. A partir de la figura 5, se considera el plato giratorio como círculo de referencia, en donde la posición de la proyección del cuerpo, queda en función del radio  $R$  y del ángulo  $\theta$ , como:

$$x = R \cos \theta$$

La aceleración  $a_x$  de la proyección del cuerpo, en función de la aceleración centrípeta  $a_c$  y el ángulo  $\theta$  será:  $a_x = -a_c \cos \theta$  donde el signo indica que el sentido de la aceleración es contrario al desplazamiento.

Recordemos que la aceleración centrípeta, en función de la velocidad angular es

$$a_c = \omega_0^2 R$$

sustituyendo

$$a_x = -\omega_0^2 R \cos \theta$$

sustituyendo

$$x = R \cos \theta$$

nos queda

$$a_x = -\omega_0^2 x$$

que coincide con la expresión de la aceleración del MAS, o sea que la proyección del movimiento circular uniforme de un cuerpo en un eje cualquiera, es un movimiento armónico simple. A este círculo se le denomina círculo de referencia, ver figura 5.

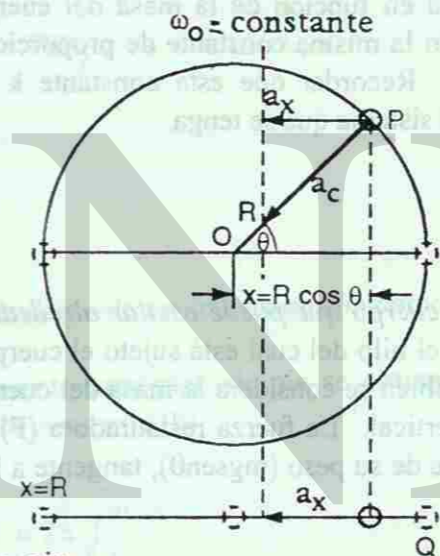


Figura 5. Círculo de referencia.

Ya podemos ver que la magnitud  $\omega_0$ , es la velocidad angular del movimiento circular uniforme del círculo de referencia.

De este análisis vamos a obtener una expresión para el período del MAS. Recordemos del movimiento circular que

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

donde  $f$  es la frecuencia y  $T$  es el período.

Como el periodo del movimiento circular uniforme del círculo de referencia y del MAS asociado son iguales podemos obtener

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

y como

$$\omega_0 = \frac{k}{m} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

por lo cual nos queda que al sustituir el periodo del MAS será

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

El periodo del MAS queda en función de la masa del cuerpo  $m$  y de la constante de proporcionalidad ( $k$ ), siendo la misma constante de proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento ( $F = -kx$ ). Recordar que esta constante  $k$  puede ser un valor o una expresión, dependiendo del sistema que se tenga.

#### 4.- El péndulo simple

*El péndulo es todo cuerpo que puede oscilar alrededor del punto de suspensión.*

Es simple si consideramos el hilo del cual está sujeto el cuerpo, con longitud constante y de masa despreciable. También se considera la masa del cuerpo concentrada en un punto y oscilando en un plano vertical. La fuerza restauradora ( $F$ ) que mantiene al cuerpo en oscilación es la componente de su peso ( $mg \sin \theta$ ), tangente a la trayectoria. La fricción se considera despreciable.

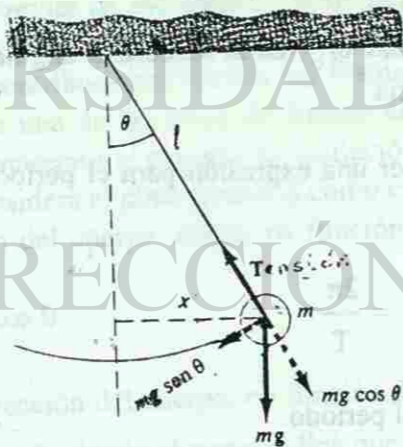


Figura 6. Péndulo simple.

Como  $F = -mg \sin \theta$ , entonces, se observa que la fuerza no es proporcional al desplazamiento, lo cual es necesario para el MAS.

Si  $\theta$  es menor a  $12^\circ$ , entonces, los valores de  $\sin \theta$  y  $\theta$  rad son aproximadamente iguales, por lo tanto

$$\sin \theta = \theta \text{ rad} = \theta$$

entonces

$$F = -mg \theta$$

observándose que la fuerza es proporcional al desplazamiento ( $\theta$ ), por lo cual es un MAS

en donde  $\theta = \frac{x}{l}$  de la figura 6.

sustituyendo

$$F = -mg \frac{x}{l}$$

como  $m, g, l$  son constantes

$$\text{entonces } k = \frac{mg}{l}$$

como se dijo anteriormente,  $k$  puede ser una expresión como es este caso.

En el análisis del movimiento armónico simple se obtiene que el periodo ( $T$ ) está en función de la masa ( $m$ ) y la constante ( $k$ )

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

sustituyendo

$$k = \frac{mg}{l}$$

se tiene

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{mg/l}}$$

quedando

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

De este análisis se concluye que:

- 1) Si la longitud del péndulo es mayor, mayor será su período.
- 2) El período del péndulo no depende de su masa ni de la amplitud de oscilación, siempre que el ángulo sea pequeño ya que en la expresión de período no aparecen estas magnitudes.

El péndulo se aplica en geología, para determinar la aceleración de la gravedad la cual cambia por irregularidades en la superficie. Para un determinado lugar, se usa un péndulo de diseño especial para obtener con precisión el valor de la gravedad.

**Ejemplo 4.** Un péndulo simple de un geólogo tiene 37.10 cm de longitud y 0.8190 Hz de frecuencia en determinado lugar de la Tierra. ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en ese lugar?

$f = 0.8190 \text{ Hz} = 0.8190 \frac{1}{\text{s}}$  Como  
 $l = 37.10 \text{ cm} = 0.371 \text{ m}$  entonces  
 sustituyendo  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.8190 \frac{1}{\text{s}}} = 1.22 \text{ s}$   
 entonces  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$   
 despejando g, nos queda  $g = \frac{4l\pi^2}{T^2}$

sustituyendo  $g = \frac{4(0.371 \text{ m})(3.14)^2}{(1.22 \text{ s})^2}$   
 $g = 9.83 \text{ m/s}^2$

**Ejemplo 5.** En el aeropuerto del Norte, en Monterrey, el valor de la aceleración de la gravedad reportado es de  $9.7886 \text{ m/s}^2$ . Si se quiere construir un péndulo que tenga un período de oscilaciones de 2 segundos, determina que largo deberá tener el péndulo.

$g = 9.7886 \text{ m/s}^2$  Como  
 $T = 2 \text{ s}$   $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$   
 despejando l, nos queda  
 $l = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 g$   
 sustituyendo  
 $l = \left(\frac{2 \text{ s}}{2(3.14)}\right)^2 (9.7886 \text{ m/s}^2)$   
 $l = 0.992 \text{ m}$

**Ejemplo 6.** Un péndulo de 2m de longitud está situado en un lugar donde  $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Determine el período y la frecuencia de las oscilaciones

$l = 2 \text{ m}$  Como  
 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$   $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$   
 sustituyendo  
 $T = 2(3.14) \sqrt{\frac{(2 \text{ m})}{9.81 \text{ m/s}^2}}$   
 $T = 2.837 \text{ s}$   
 Como  
 $f = \frac{1}{T}$   
 sustituyendo  
 $f = \frac{1}{2.837 \text{ s}}$   
 $f = 0.352 \text{ Hz}$

## 5.- Cuerpo -resorte

El movimiento armónico simple se representa con un objeto que oscila en el extremo de un resorte, ver fig. 7. A continuación se analiza este tipo de movimiento, al considerar despreciable la masa del resorte, el movimiento es horizontal de tal forma que el objeto de masa ( $m$ ) se desliza sin fricción sobre la superficie horizontal; en la dirección vertical la fuerza normal está en equilibrio con el peso ( $mg$ ), por lo tanto no se consideran estas fuerzas. El resorte (en general) tiene una longitud determinada, la cual no ejerce fuerza sobre la masa ( $m$ ), ver fig. 7 a, siendo la posición de equilibrio. Si la masa se mueve hacia la izquierda, comprimiendo el resorte, o hacia la derecha, estirándolo, el resorte ejerce una fuerza ( $F$ ) sobre la masa que actúa en tal sentido que ésta trata de regresarla a la posición de equilibrio; denominada fuerza de restitución. Se ha observado que la magnitud de la fuerza de restitución ( $F$ ) es directamente proporcional al desplazamiento ( $x$ ) en que se ha estirado o comprimido el resorte y de sentido contrario, o sea

$$F = -kx$$

en donde  $x$  es el desplazamiento que recorre el objeto cuando el resorte se estira o se comprime. Cuando su desplazamiento es máximo desde la posición de equilibrio, entonces, es igual a la amplitud ( $A$ ) del movimiento y la constante de proporcionalidad ( $k$ ) es la constante elástica del resorte, determinada por la rigidez del mismo.

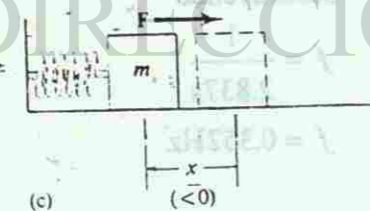
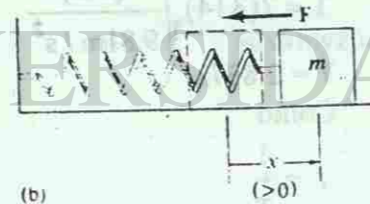
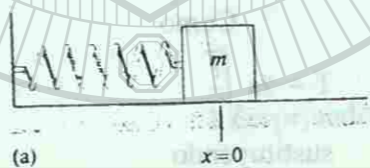


Figura 7. Movimiento armónico simple.

La ecuación  $F = -kx$  es una relación que se conoce como la Ley de Hooke. Fue descubierta por Robert Hooke (1635-1703), se aplica en el comportamiento de resortes y otros cuerpos elásticos, siempre que su deformación no sea muy grande.

El resorte se estira y si en un momento dado ya no recupera su forma original, a este punto se le llama límite elástico. Todos los materiales elásticos, tienen su propio límite elástico.

A partir de la figura 7, se observa que al estirar el resorte una distancia  $x=A$  inicialmente (fig 7b) y al soltarlo el resorte ejerce una fuerza sobre el objeto que tira de él hacia la posición de equilibrio conforme el objeto se acerca a la posición de equilibrio, la fuerza va disminuyendo. Pero debido a que la fuerza ha acelerado el objeto, pasa por la posición de equilibrio con cierta velocidad.

En realidad, cuando el objeto alcanza la posición de equilibrio, la fuerza que actúa sobre el objeto es cero, pero su velocidad en ese punto es máxima (fig. 7a). Al moverse más hacia la izquierda, la fuerza que actúa sobre el objeto trata de desacelerarlo, deteniéndolo en forma momentánea en  $x=-A$ . A continuación empieza a moverse hacia la posición de equilibrio, pasando de nuevo hasta alcanzar el punto donde  $x=A$ . Después repite el movimiento, de un lado a otro, en forma simétrica entre  $x=A$  y  $x=-A$ . El objeto realizará un ciclo en su movimiento completo de ida y vuelta desde un punto inicial, por ejemplo desde  $x=A$  hasta  $x=-A$ , y regresa  $x=A$ . El período ( $T$ ) se define como el tiempo necesario para un ciclo completo y la frecuencia es el número de ciclos completos por segundo, es decir

$$f = \frac{1}{T}$$

Recordando que el período ( $T$ ), en el MAS, también se puede expresar como

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Veamos el siguiente ejemplo.

**Ejemplo 7.** Un resorte está sujeto en uno de los extremos de la pared y del otro extremo tiene un objeto cuya masa es 0.300 kg. A continuación se estira 10 cm a partir del punto de equilibrio, aplicando una fuerza de 1.96 N. Calcula a) la constante elástica ( $k$ ) del resorte b) El período del sistema c) La frecuencia del sistema

$$\begin{aligned} m &= 0.300 \text{ kg} \\ x &= 10 \text{ cm} = 0.10\text{m} \\ F &= 1.96\text{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{a) Como} \\ F &= kx \end{aligned}$$

despejando

$$k = \frac{F}{x}$$

sustituyendo

$$k = \frac{1.96 \text{ N}}{0.10 \text{ m}}$$

$$k = 19.6 \text{ N/m}$$

b) Como

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

sustituyendo

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{0.300 \text{ kg}}{19.6 \text{ N/m}}}$$

$$T = 0.78 \text{ s}$$

c) Como

$$f = \frac{1}{T}$$

sustituyendo

$$f = \frac{1}{0.78 \text{ s}}$$

$$f = 1.28 \text{ Hz}$$

La energía potencial asociada con un objeto sujeto en el extremo de un resorte, es debido a que cuando se comprime o se estira el resorte y al soltarlo puede efectuar un trabajo sobre el objeto.

Para calcular la energía potencial del resorte comprimido, sólo se necesita calcular el trabajo necesario para comprimirlo, o el trabajo que efectúa al soltarlo. En ambos casos el trabajo efectuado es

$$W = Fx$$

siendo la fuerza (F), la fuerza de restauración o de restitución del resorte ( $F = -kx$ ); x es el desplazamiento que se estira desde su posición de equilibrio.

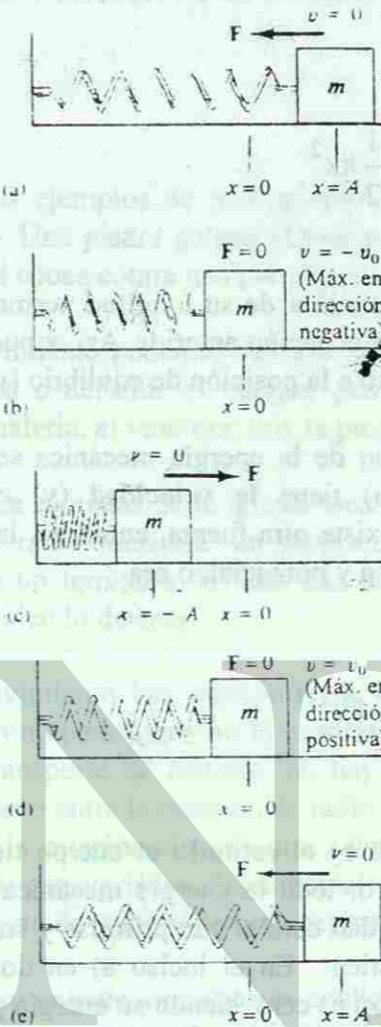


Figura 8. La energía cambia de cinética a potencial, y viceversa, al oscilar el resorte con el objeto.

La Fuerza (F) varía en esa distancia x, siendo mayor F cuando más se estira el resorte. La fuerza varía desde cero cuando el resorte no está estirado, su posición de equilibrio (ver fig.8a), hasta kx cuando está completamente estirado, la fuerza promedio se considera

como  $\frac{1}{2}kx$ . El trabajo efectuado, entonces es

$$W = \left(\frac{1}{2}kx\right)(x)$$

$$W = \frac{1}{2}kx^2$$

Por consiguiente, la energía potencial elástica es proporcional al cuadrado del estiramiento

$$EP \text{ elástica} = \frac{1}{2} kx^2$$

Si se comprime un resorte una distancia  $x$  de su longitud normal (ver fig. 8c), también tiene la energía potencial dada por la ecuación anterior. Así,  $x$  puede ser tanto la cantidad comprimida o la estirada con respecto a la posición de equilibrio (ver fig. 8).

En este ejemplo, en la conservación de la energía mecánica se considera la masa del resorte despreciable. La masa ( $m$ ) tiene la velocidad ( $v$ ) en cualquier momento, despreciando la fricción y que no existe otra fuerza, entonces, la energía mecánica total ( $E$ ) es la suma de las energías cinética y potencial, o sea

$$E = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} kx^2$$

A partir de la figura 8 en el inciso b) al estirarlo el cuerpo tiene velocidad cero y la energía cinética por lo tanto es cero, toda la energía mecánica es la energía potencial elástica. En el inciso c) tiene velocidad cero al comprimirse y su energía cinética es cero y sólo tiene energía potencial elástica. En el inciso a) en donde se encuentra en su posición de equilibrio, la distancia ( $x$ ) es cero, siendo su energía potencial elástica igual a cero y como lleva el cuerpo una velocidad ( $v$ ) sólo tiene energía cinética en ese punto. Cuando la masa oscila para la izquierda y para la derecha, la energía se intercambia continuamente de energía potencial a energía cinética y viceversa.

## B.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

### 1.- Introducción

Analicemos algunos ejemplos de movimiento: Un vaso cae de una mesa y al golpear el piso, se rompe. Una piedra golpea el vidrio de una ventana y lo rompe. Un automóvil a gran velocidad choca contra una pared y se destruye.

En estos ejemplos de movimiento podemos ver que hay transporte de energía, que es lo que provoca que se rompa o deforme el cuerpo, pero este transporte de energía está asociado al transporte de materia, el vaso que cae, la piedra o el automóvil.

Veamos otros ejemplos: La campana de la iglesia toca y el sonido se escucha en todo el pueblo. Una estación de radio transmite un programa y nosotros lo escuchamos en nuestra casa. Se produce un terremoto en una isla del Océano Pacífico y la estación sismológica de Ciudad México lo detecta.

En estos ejemplos de movimiento hay transporte de energía, pues de lo contrario no escucharíamos el sonido, o no podríamos oír el programa de radio o no detectaríamos el terremoto, pero no hay transporte de materia, no hay desplazamiento neto de materia entre la campana y los oídos o entre la estación de radio y nuestro aparato receptor o entre el centro del terremoto y la estación sismológica. Estos son ejemplos de movimiento ondulatorio y se señala la característica fundamental de este tipo de movimiento que consiste en que hay transporte de energía pero no hay transporte de materia.

En todos los casos de movimiento ondulatorio analizados se presentan las siguientes características: una fuente, que provoca la aparición del fenómeno, y la propagación de energía en el espacio, que provoca que ésta pueda ser detectada en otro punto distante del espacio.

Podemos definir una onda como la propagación de una perturbación en el espacio sin que exista transporte de materia. La perturbación es la variación de una magnitud física en un punto del espacio, como puede ser la presión, la densidad, la intensidad del campo eléctrico, la posición de las partículas de un medio, etc.





Por consiguiente, la energía potencial elástica es proporcional al cuadrado del estiramiento

$$EP \text{ elástica} = \frac{1}{2} kx^2$$

Si se comprime un resorte una distancia  $x$  de su longitud normal (ver fig. 8c), también tiene la energía potencial dada por la ecuación anterior. Así,  $x$  puede ser tanto la cantidad comprimida o la estirada con respecto a la posición de equilibrio (ver fig. 8).

En este ejemplo, en la conservación de la energía mecánica se considera la masa del resorte despreciable. La masa ( $m$ ) tiene la velocidad ( $v$ ) en cualquier momento, despreciando la fricción y que no existe otra fuerza, entonces, la energía mecánica total ( $E$ ) es la suma de las energías cinética y potencial, o sea

$$E = \frac{1}{2} mv^2 + \frac{1}{2} kx^2$$

A partir de la figura 8 en el inciso b) al estirarlo el cuerpo tiene velocidad cero y la energía cinética por lo tanto es cero, toda la energía mecánica es la energía potencial elástica. En el inciso c) tiene velocidad cero al comprimirse y su energía cinética es cero y sólo tiene energía potencial elástica. En el inciso a) en donde se encuentra en su posición de equilibrio, la distancia ( $x$ ) es cero, siendo su energía potencial elástica igual a cero y como lleva el cuerpo una velocidad ( $v$ ) sólo tiene energía cinética en ese punto. Cuando la masa oscila para la izquierda y para la derecha, la energía se intercambia continuamente de energía potencial a energía cinética y viceversa.

## B.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

### 1.- Introducción

Analicemos algunos ejemplos de movimiento: Un vaso cae de una mesa y al golpear el piso, se rompe. Una piedra golpea el vidrio de una ventana y lo rompe. Un automóvil a gran velocidad choca contra una pared y se destruye.

En estos ejemplos de movimiento podemos ver que hay transporte de energía, que es lo que provoca que se rompa o deforme el cuerpo, pero este transporte de energía está asociado al transporte de materia, el vaso que cae, la piedra o el automóvil.

Veamos otros ejemplos: La campana de la iglesia toca y el sonido se escucha en todo el pueblo. Una estación de radio transmite un programa y nosotros lo escuchamos en nuestra casa. Se produce un terremoto en una isla del Océano Pacífico y la estación sismológica de Ciudad México lo detecta.

En estos ejemplos de movimiento hay transporte de energía, pues de lo contrario no escucharíamos el sonido, o no podríamos oír el programa de radio o no detectaríamos el terremoto, pero no hay transporte de materia, no hay desplazamiento neto de materia entre la campana y los oídos o entre la estación de radio y nuestro aparato receptor o entre el centro del terremoto y la estación sismológica. Estos son ejemplos de movimiento ondulatorio y se señala la característica fundamental de este tipo de movimiento que consiste en que hay transporte de energía pero no hay transporte de materia.

En todos los casos de movimiento ondulatorio analizados se presentan las siguientes características: una fuente, que provoca la aparición del fenómeno, y la propagación de energía en el espacio, que provoca que ésta pueda ser detectada en otro punto distante del espacio.

Podemos definir una onda como la propagación de una perturbación en el espacio sin que exista transporte de materia. La perturbación es la variación de una magnitud física en un punto del espacio, como puede ser la presión, la densidad, la intensidad del campo eléctrico, la posición de las partículas de un medio, etc.



## 2.- Tipos de Onda

De acuerdo al medio por donde se propagan las ondas pueden dividirse en mecánicas y electromagnéticas.

Ondas mecánicas son aquellas que necesitan de un medio mecánico elástico para propagarse. Por ello pueden definirse como la propagación de una perturbación mecánica en un medio elástico.

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio para su propagación. Por ello podemos transmitir ondas electromagnéticas en el vacío, a través del espacio, por ejemplo desde una nave espacial hacia la Tierra. Consisten en la propagación de una perturbación electromagnética o sea una variación de la intensidad del campo eléctrico y magnético en el espacio.

Analicemos el mecanismo de propagación de una onda mecánica en un medio elástico. Por medio elástico entendemos aquél en el cual las partículas están unidas por fuerzas elásticas o sea fuerzas que tienden a regresar al medio a la posición inicial una vez que cesa la fuerza deformadora sobre él. Recordemos cuando estudiamos el sistema cuerpo resorte las fuerzas elásticas del resorte. Imaginemos ahora un medio como el que se muestra en la figura 9.

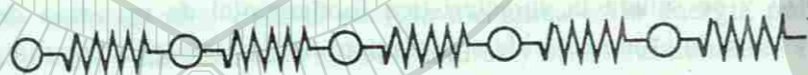


Figura 9. Medio elástico.

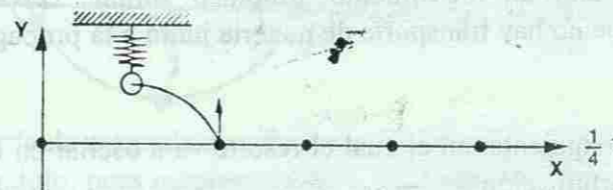
donde las partículas están enlazadas por resortes imaginarios. Está claro que si sacamos de la posición de equilibrio a una de las partículas del medio, sobre ella aparecerán fuerzas que tienden a hacer que la partícula regrese a su posición inicial.

Imaginemos ahora que la partícula del extremo está unida a un resorte de la forma que se muestra en la siguiente figura



donde ya no se muestran los resortes que unen a las partículas entre sí, pero que siguen existiendo. Por otra parte supongamos que las partículas solo pueden moverse en la dirección mostrada, o sea hacia arriba o hacia abajo pero no a la derecha o a la izquierda.

Supongamos que el resorte es sacado de su posición de equilibrio por un impulso hacia arriba. Está claro, de lo estudiado en el tema anterior que el resorte va a realizar un movimiento armónico simple, pero que este movimiento se va a transmitir por todo el medio, como se muestra en la figura



Al transcurrir 1/4 de período del MAS del resorte, éste se encuentra en su posición superior y está ejerciendo una fuerza sobre la siguiente partícula del medio debido a los enlaces elásticos que existen entre ellos. El resorte comienza ahora un movimiento hacia abajo, como se muestra enseguida



y al pasar 1/2 período de su MAS, la perturbación llegó hasta la tercera partícula del medio. Luego el proceso continúa, como se muestra enseguida



O sea cuando el resorte realiza una oscilación completa, al cabo de un período (T) de su MAS, la perturbación se ha propagado una distancia determinada. Observa que las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular (hacia arriba y abajo) a la dirección de propagación (hacia la derecha). En este caso, en que las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, se dice que tenemos una onda transversal. Es el caso de una cuerda que hacemos oscilar con nuestra mano, ver figura 10a. Es importante que se vea que las partículas del medio no se desplazan junto con la perturbación sino que oscilan, con un movimiento armónico simple, cerca de sus posiciones de equilibrio, o sea que no hay transporte de materia junto a la propagación de energía.

Podemos imaginar ahora el caso siguiente, en el cual el resorte va a oscilar en la misma dirección en que se propaga la perturbación

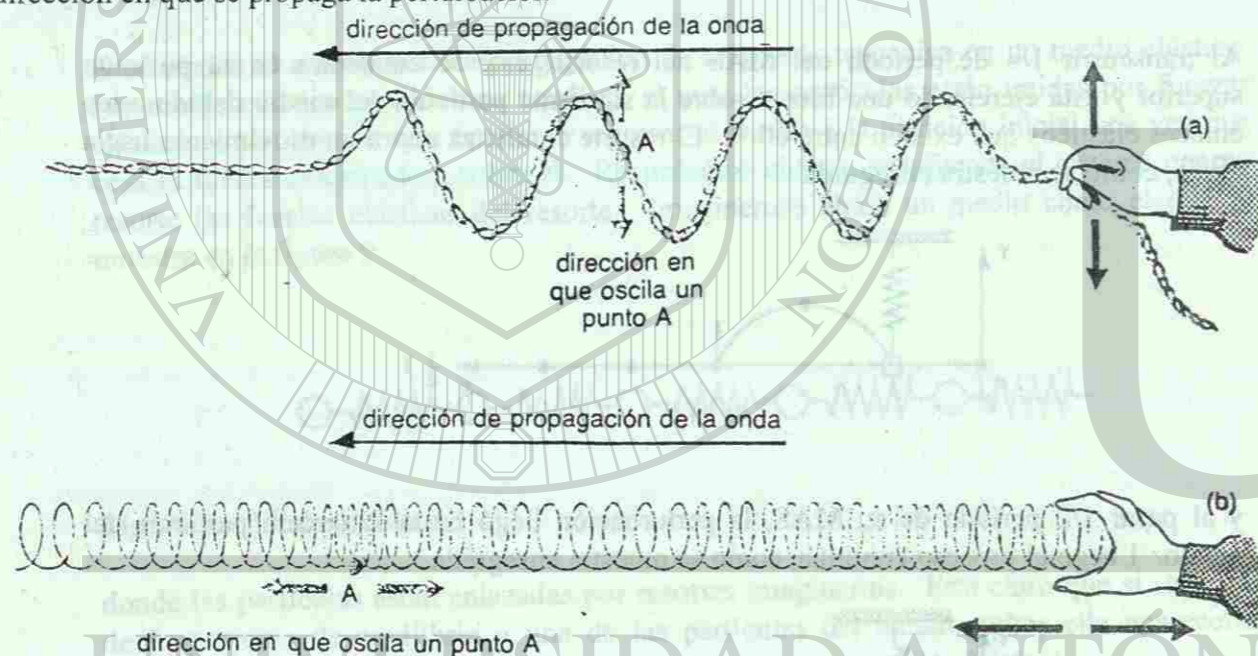


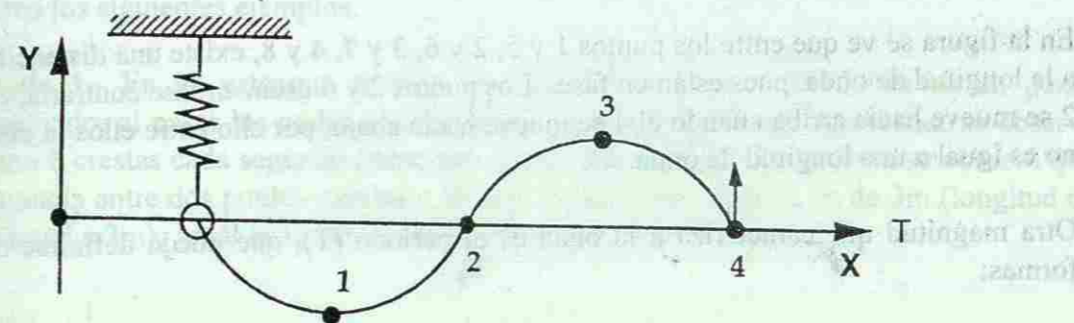
Figura 10. Tipos de onda: a) onda transversal b) onda longitudinal

Este caso, en que las partículas del medio oscilan en la misma dirección en que se propaga la perturbación (la onda) se denomina onda longitudinal. Observa que el carácter del movimiento es el mismo, cuando el resorte se comprime hacia la izquierda arrastra a la siguiente partícula del medio y cuando se estira hacia la derecha empuja a la partícula, provocando que el movimiento se propague aunque las partículas del medio sólo oscilan, con un movimiento armónico simple, cerca de sus posiciones de equilibrio. Las ondas de sonido, son ejemplo de onda mecánica longitudinal, ver figura 10b.

De este modo las ondas se clasifican, de acuerdo al tipo de movimiento que realizan las partículas del medio, en ondas transversales y ondas longitudinales.

### 3.- Magnitudes que caracterizan a las ondas

Analicemos de nuevo la figura, de la propagación de la perturbación en el espacio

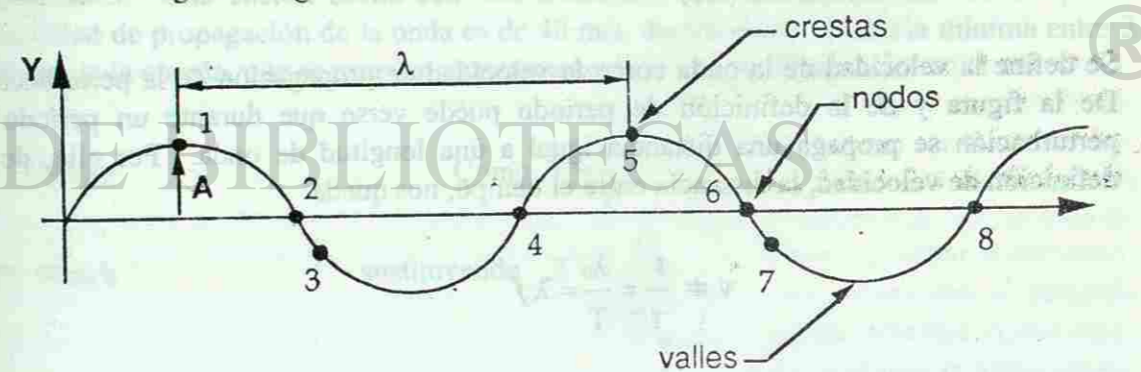


Observa que la partícula marcada con el número 4 va a realizar el mismo movimiento que la partícula del péndulo, pues comienza a moverse hacia arriba igual que el péndulo. Las partículas del medio que tienen, en todo momento del tiempo idéntico estado de movimiento se dice que están en fase. La fase es una magnitud, que depende del tiempo y de la posición, que caracteriza el estado de movimiento. Por eso, igual fase significa igual estado de movimiento.

Las partículas 1 y 3 tienen estados contrarios de movimiento, pues cuando la 1 está subiendo la 3 está bajando. En ese caso se dice que estas partículas están en oposición de fase, o que tienen fases contrarias.

Así podemos definir una magnitud que caracteriza a las ondas: la longitud de onda, designada generalmente con la letra griega  $\lambda$ . La longitud de onda se define como la distancia mínima entre dos puntos que tengan idéntico estado de movimiento, o sea que estén en fase. Recuerda que la longitud de onda es la distancia mínima, pues está claro que puntos que estén a distancias iguales a un número entero de longitudes de onda también tienen idéntico estado de movimiento. Por ello también se dice que para que dos puntos del medio estén en fase, entre ellos debe haber una distancia igual a un número entero de longitud de onda.

Veamos en la siguiente figura



que a las partes superiores de la onda se les llama crestas y a las partes inferiores valles. Los puntos que están en la posición de equilibrio, o sea cuyo desplazamiento es cero, se les llama nodos. La amplitud de la onda ( $A$ ) es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medido a partir de la posición de equilibrio.

En la figura se ve que entre los puntos 1 y 5, 2 y 6, 3 y 7, 4 y 8, existe una distancia igual a la longitud de onda, pues están en fase. Los puntos 2 y 4 están en fase contraria, pues el 2 se mueve hacia arriba cuando el 4 se mueve hacia abajo, por ello entre ellos la distancia no es igual a una longitud de onda.

Otra magnitud que caracteriza a la onda es el período ( $T$ ), que puede definirse de dos formas:

- 1) Es el período del movimiento armónico simple que realizan las partículas del medio donde se propaga la onda.
- 2) Es el tiempo necesario para que la perturbación se propague una distancia igual a una longitud de onda.

Así mismo, la frecuencia de la onda puede definirse como:

- 1) Es la frecuencia del movimiento armónico simple que realizan las partículas del medio.
- 2) Es el número de crestas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.

De igual manera que para el MAS, la frecuencia y el período están relacionados así:

$$f = \frac{1}{T}$$

La unidad de la frecuencia son ciclos por segundo que en el Sistema Internacional de Unidades se denomina Hertz (Hz).

Se define la velocidad de la onda como la velocidad de propagación de la perturbación. De la figura y de la definición de período puede verse que durante un período la perturbación se propaga una distancia igual a una longitud de onda. Por ello, de la definición de velocidad, la distancia entre el tiempo, nos queda

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

La velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades del medio. Así por ejemplo, en una cuerda, la velocidad de propagación depende de la tensión de la cuerda y de su densidad lineal de masa.

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 1.-** En un estanque se deja caer un objeto y se fija la vista en un punto determinado, al pasar las ondas por ese punto y contar el número de crestas, se observa que son 6 crestas cada segundo (tiene una frecuencia de 6 hertz); también se observa que la distancia entre dos puntos máximos de dos crestas consecutivas, es de 3m (longitud de onda igual a 3m), ¿cuál es la velocidad de propagación de la onda?

$$f = 6 \text{ Hz} = 6 \frac{1}{s}$$

$$v = \lambda f$$

$$\lambda = 3 \text{ m}$$

$$v = (3 \text{ m}) \left( 6 \frac{1}{s} \right)$$

$$v = 18 \text{ m/s}$$

**Ejemplo 2.** Si la velocidad del sonido es 340 m/s, ¿Cuál es la longitud de una onda sonora, cuya frecuencia es de 500 Hz?

$$v = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = \lambda f$$

$$f = 500 \text{ Hz} = 500 \frac{1}{s}$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{340 \text{ m/s}}{500 \text{ 1/s}}$$

$$\lambda = 0.68 \text{ m}$$

**Ejemplo 3.** Una cuerda oscila con una frecuencia de 100 Hz. Si se conoce que la velocidad de propagación de la onda es de 40 m/s, determina la distancia mínima entre 2 puntos de la cuerda, que se mueven exactamente de la misma forma.

$$f = 100 \text{ Hz}$$

$$\text{Como } T = \frac{1}{f}$$

$$v = 40 \text{ m/s}$$

$$\text{sustituyendo } T = \frac{1}{100 \frac{1}{s}}$$

$$T = 0.01s$$

$$\text{Como } v = \frac{\lambda}{T}$$

$$\text{despejando } \lambda = vT$$

$$\text{sustituyendo } \lambda = \left(40 \frac{m}{s}\right)(0.01s)$$

$$\lambda = 0.4m$$

**Ejemplo 4.** Una persona se coloca en el borde de un muelle y cuenta las ondas que golpean a cierto poste de dicho muelle en 30 s, contando 50 ondas. Si una cresta en particular viaja 8 m en 4 s. ¿Cuál es la longitud de onda de las ondas?

$$f = \frac{50 \text{ ondas}}{30 \text{ s}}$$

$$f = 1.6 \text{ Hz}$$

$$v = \frac{8 \text{ m}}{4 \text{ s}}$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{como } v = \lambda f$$

$$\text{despejando } \lambda = \frac{v}{f}$$

$$\text{sustituyendo } \lambda = \frac{2 \text{ m/s}}{1.61/s}$$

$$\lambda = 1.2 \text{ m}$$

#### 4.- FENÓMENOS ONDULATORIOS

Los fenómenos ondulatorios son aquéllos en los cuales participan las ondas, independientemente de su tipo, y los cuales caracterizan la interacción de las ondas con la materia.

Cada tipo de onda, luz, sonido, ondas mecánicas, etc., tiene características específicas en cuanto a los fenómenos que presenta. Pero siempre hay características generales, comunes a todas las ondas en cada fenómeno. A estas características generales irá dirigida la descripción que a continuación se presenta de los fenómenos ondulatorios, para luego describir un poco más detallado el comportamiento de tipos específicos de ondas como el sonido o la luz.

#### Reflexión

Comencemos por el fenómeno más frecuente que presentan las ondas. Ya sabemos que la velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades del medio por el cual se propaga. Es por esto que debemos preguntarnos que ocurre cuando la onda en su camino se encuentra con una frontera que separa dos medios de propiedades diferentes.

Cuando la onda llega a la frontera, una parte de la energía que transporta la onda, regresa al primer medio y otra parte penetra en el segundo medio. Si nos referimos a la energía que regresa al medio de donde viene la onda, estamos hablando del fenómeno de reflexión.

La reflexión siempre se presenta, cuando la onda llega a la superficie de separación entre dos medios de propiedades diferentes. Lo que varía de un caso a otro es la cantidad de energía que se refleja al primer medio. Se puede demostrar que mientras más diferentes sean las propiedades de los medios en contacto, mayor cantidad de energía se refleja.

Podemos comprobar la existencia del fenómeno cuando sujetamos una cuerda a una pared y desde el extremo contrario la hacemos oscilar, vemos que al llegar el pulso al extremo sujeto se refleja y regresa hacia nosotros. En este caso tenemos una onda que se desplaza en una sola dirección y por lo tanto la línea de propagación de la onda incidente y la onda reflejada es la misma.

En el caso de ondas, como por ejemplo las ondas en la superficie del agua, que se desplazan en dos dimensiones, se define el concepto de frente de onda como la superficie que une a los puntos a donde llega la perturbación al mismo tiempo. Los frentes de onda tienen las formas más diversas, pueden ser esféricos, o pueden ser planos, o de otra forma.

Asociado al concepto de frente de onda se define el concepto de rayo que es la dirección de propagación de la energía de la onda y es perpendicular al frente de onda, cuando el medio tiene las mismas propiedades en todos los puntos.

Así podemos enunciar la ley de reflexión de las ondas en la superficie de separación entre dos medios. Supongamos que el rayo llega a la superficie de separación entre dos medios ver figura 11, de tal manera que forma un ángulo  $\theta$  con la normal a la superficie, este ángulo se llama ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ). El rayo reflejado forma un ángulo  $\theta_r$  con la normal, que es el ángulo de reflexión. *La ley de reflexión señala que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.*

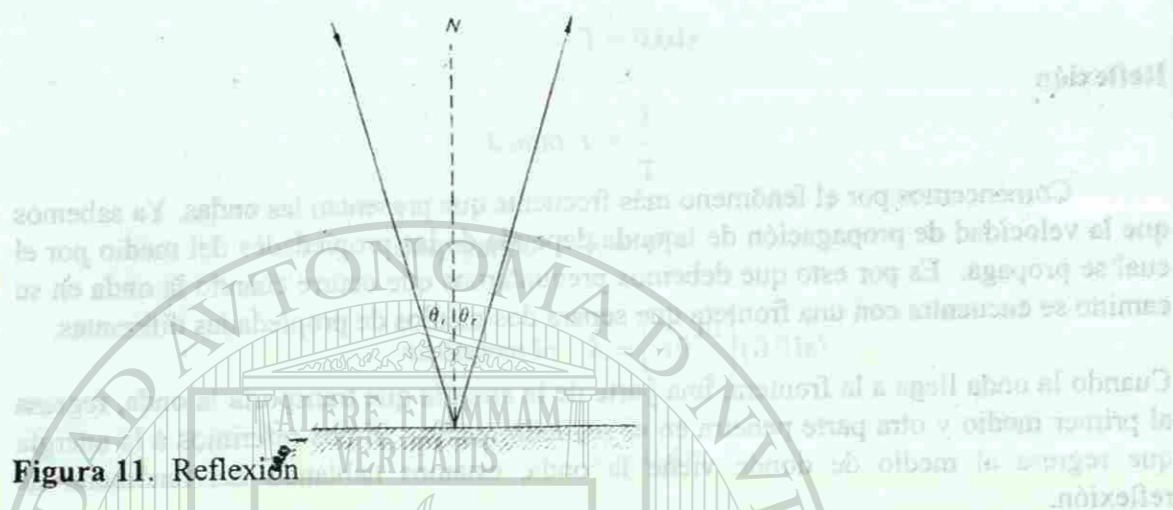


Figura 11. Reflexión

o sea

$$\theta_i = \theta_r$$

es la forma de escribir la ley de reflexión.

Debe señalarse que esta ley siempre se cumple, pero ocurre que si la superficie es muy irregular (rugosa) no se observa exactamente su cumplimiento pues el rayo reflejado sale de puntos de la superficie con diferente orientación.

### Refracción

La refracción es el fenómeno que se presenta cuando la onda pasa de un medio a otro de propiedades diferentes, o sea en este caso nos referimos a la parte de la energía que penetra al segundo medio.

Como los medios tienen diferentes propiedades, la velocidad de propagación de la onda será diferente en los dos medios. Así mismo será diferente también la longitud de onda, manteniendo constante la frecuencia. Debido al cambio en la velocidad ocurre una desviación en la dirección de propagación de la onda. Este cambio en la dirección de propagación viene determinado por la ley de la refracción.

Supongamos que un rayo de la onda llega a la superficie de separación entre dos medios con un ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ), ver la siguiente figura 12.

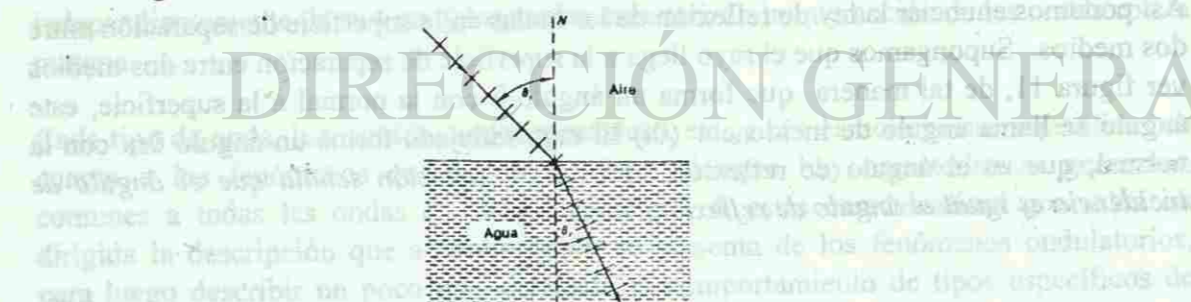


Figura 12. Refracción.

Al pasar al segundo medio, donde la onda se propaga con una velocidad ( $v_2$ ), el rayo se desvía con respecto a la dirección que tenía en el primer medio, formando un ángulo con la normal a la superficie igual a  $\theta_r$ , llamado ángulo de refracción.

Si la velocidad de propagación en el primer medio es de  $v_1$ , entonces la relación entre los ángulos será

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

y ésta es la expresión de la Ley de la refracción.

Como se ve el ángulo de refracción va a depender de las velocidades de propagación en los dos medios. Si  $v_1$  es mayor que  $v_2$  entonces, el ángulo de incidencia será mayor que el de refracción, que es el caso mostrado en la figura anterior.

Cuando estudiemos la Óptica Geométrica, haremos un estudio más detallado de esta ley.

### Superposición

En muchos casos ocurre que en un medio dado se están propagando al mismo tiempo más de una onda. Por ejemplo, que en un medio dado se estén propagando, al mismo tiempo dos ondas. En este caso se observa que las ondas, pasan una por el mismo lugar donde pasa la otra, sin cambiar sus características.

En este caso surge la pregunta de ¿cual será el efecto resultante debido a la acción sobre los puntos del medio de ambas ondas a la vez?. Por ejemplo, si en una cuerda se propagan al mismo tiempo dos ondas, ¿Cuál será el desplazamiento resultante de las partículas de la cuerda? A esta pregunta da respuesta el llamado *principio de superposición* que plantea:

*Cuando dos o más ondas se propagan a través del mismo medio, el desplazamiento resultante en cualquier punto es la suma algebraica de los desplazamientos producidos por cada onda por separado.*

Debe tenerse en cuenta que la suma de los desplazamientos es algebraica cuando los planos de oscilación de cada una de las ondas es el mismo.

El principio de superposición es el causante de que cuando la iluminación es baja en una habitación y encendemos otra lámpara, la iluminación resultante es mayor, ya que se

suman. Así mismo, cuando estamos escuchando la música que proviene de una bocina la intensidad será mayor si conectamos otra bocina.

### Interferencia

La interferencia es un caso de superposición, cuando las ondas que se superponen tienen las mismas características de frecuencia y longitud de onda.

En este caso puede ocurrir que si las ondas se superponen de forma tal que las crestas y los valles de ambas ondas coinciden, la onda resultante tiene mayor amplitud, pues se suman los dos desplazamientos. Las ondas se dice que están en fase. A este caso se le denomina interferencia constructiva, ver figura 13.

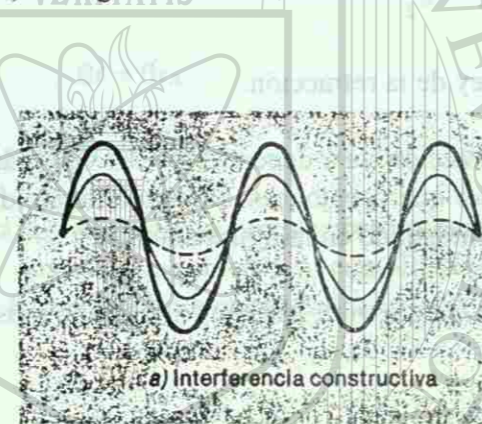


Figura 13. Interferencia constructiva.

Otro caso posible es que las crestas de una de las ondas coincidan con los valles de la otra y entonces, la onda resultante tiene una amplitud menor, pues los desplazamientos de cada onda se restan. Las dos ondas están en fases contrarias. A este caso se le denomina interferencia destructiva, ver figura 14.

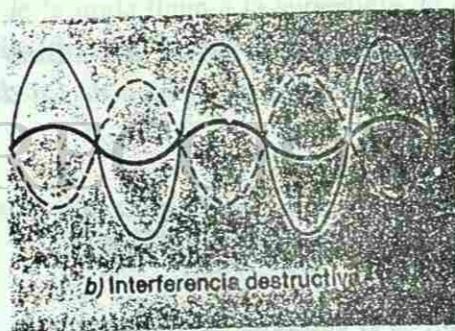


Figura 14. Interferencia destructiva.

La interferencia tiene mucha importancia para la aplicación práctica de las ondas, sobre todo en el caso de la interferencia de la luz, que se utiliza para mediciones de distancias, para construir filtros de colores, etc.

### Difracción

La difracción es el fenómeno que se presenta cuando una onda encuentra un obstáculo, que no puede atravesar, y lo contornea o lo bordea, de modo que existe perturbación detrás del obstáculo. De esta forma la onda deja de propagarse en forma rectilínea y toma trayectorias curvas. Por ejemplo, las ondas producidas en el agua al pasar por una abertura, contornea los bordes de la misma, de forma que puede existir movimiento ondulatorio en la parte trasera de los bordes, ver figura 15.



Figura 15. Difracción.

La difracción siempre ocurre pero se observa más claro sus efectos cuando las dimensiones del obstáculo son del mismo orden que la longitud de la onda. Esto puede comprobarse en el caso de las ondas sonoras que por tener longitud de onda del orden en metros puede apreciarse su difracción en puertas, ventanas, etc. Sin embargo las ondas luminosas sólo provocan difracción apreciable en obstáculos muy pequeños, ya que la longitud de onda es pequeña.

La difracción es un fenómeno típico de las ondas. Cuerpos materiales, que no tengan propiedades ondulatorias no pueden presentar difracción.

### 5. ONDAS ESTACIONARIAS

Vamos a analizar un caso particular de superposición de ondas, que es el caso de las ondas estacionarias.

Vamos a suponer que en un medio se propagan dos ondas de iguales características, (frecuencia, longitud de onda y amplitud), pero en sentido contrario. El medio puede ser por ejemplo una cuerda donde se propaguen dos ondas iguales, una hacia la derecha y otra hacia la izquierda.

En este caso ocurre que cada punto del medio va a tener una amplitud determinada, característica de cada punto. Así por ejemplo, existen puntos en los cuales el desplazamiento producido por una de las ondas es igual pero de signo contrario al producido por la otra, de forma tal que el desplazamiento resultante es cero. Entonces esos puntos no van a oscilar y se llaman nodos.

Existen puntos para los cuales el desplazamiento de ambas ondas tienen igual signo y por ello el desplazamiento resultante es máximo y se les llama antinodos, ver figura 16.

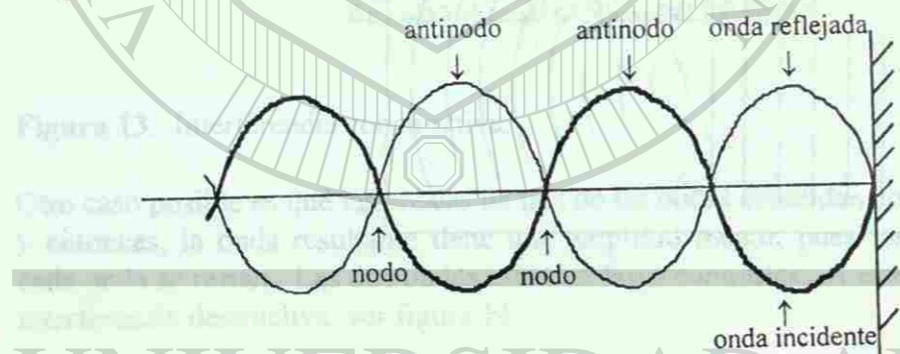


Figura 16. Onda estacionaria.

De esta forma que la onda estacionaria se produce al superponerse dos ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en sentido contrario.

A la onda se le llama estacionaria porque parece como si no se desplazara. Debe tenerse en cuenta que en el medio no hay transporte neto de energía, ya que cada una de las ondas que se superponen transporta la misma cantidad de energía (ya que tienen iguales características), pero en sentido contrario.

La onda estacionaria resulta ser un método muy útil para la determinación experimental de la velocidad de propagación de las ondas en los medios, ya que la distancia entre dos nodos consecutivos es igual a la mitad de la longitud de onda, que así puede ser medida, y midiendo la frecuencia de oscilación de la onda se puede determinar la velocidad de propagación por la fórmula

$$v = \lambda f$$

Un método para producir ondas estacionarias es por reflexión. Se hace incidir una onda en una frontera y se superpone la onda incidente y la reflejada, que tienen iguales características y por ello se produce una onda estacionaria.

Este es el caso de una cuerda que tenga su extremo fijo y en la cual se propague una onda hacia el extremo. Cuando la onda incidente llegue al extremo, se refleja y se superponen la onda incidente y la reflejada, produciéndose la onda estacionaria.

Las oscilaciones de la cuerda en este caso puede ser de diferentes formas o modos, según la frecuencia a la cual oscile. A estas formas de oscilar de la cuerda se les llama modos normales de oscilación, ver figura 17.

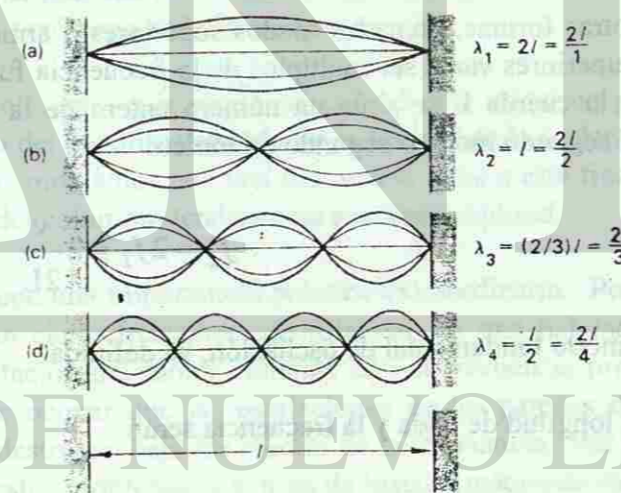


Figura 17. Modos de oscilación posibles para ondas estacionarias.



El modo fundamental de oscilación es aquél que tiene mayor amplitud y su longitud de onda es tal que en el largo de la cuerda  $L$ , está formada por una cresta o un valle (media longitud de onda)

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

La frecuencia de la onda siempre está relacionada con la longitud de onda por la fórmula:

$$v = \lambda f$$

despejando  $f = \frac{v}{\lambda}$

por lo que la frecuencia del modo fundamental de oscilación será

$$f = \frac{v}{2L}$$

La cuerda puede oscilar en otras formas, llamados modos superiores o armónicos. Las frecuencias de estos modos superiores van a ser múltiplos de la frecuencia fundamental y en cada caso en el largo de la cuerda  $L$  se sitúa un número entero de la mitad de la longitud de onda. Así para el segundo modo o segundo armónico:

$$L = 2 \frac{\lambda}{2} = \lambda$$

y

$$f_2 = 2f_1 = 2 \frac{v}{2L}$$

Donde  $f_1$  es la frecuencia del modo fundamental de oscilación, ya definida.

Para el modo de número  $n$ , la longitud de onda y la frecuencia serán

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

$$f_n = nf_1 = n \frac{v}{2L}$$

Este es el caso de las oscilaciones de las cuerdas de los instrumentos musicales. Recuerda que las cuerdas de una guitarra, por ejemplo, está fija en ambos extremos y oscila a determinadas frecuencias de acuerdo a la música que se interpreta. Para variar la frecuencia el guitarrista varía el largo efectivo de la cuerda con lo cual, de acuerdo a las fórmulas anteriores, cambia la frecuencia del modo de oscilación.

Las ondas estacionarias en cuerdas pueden utilizarse para la determinación de la velocidad de propagación de las ondas, midiendo la longitud de onda y la frecuencia de oscilación.

## 6. RESONANCIA

Todos cuando niños tuvimos la oportunidad de empujar un columpio y sabemos que para determinada frecuencia de los impulsos que demos al columpio, éste se moverá con mayor o menor amplitud. Para determinada frecuencia el columpio oscilará con la máxima amplitud. Este es el fenómeno conocido con el nombre de resonancia.

Hemos analizado el movimiento armónico simple, en el cual suponíamos que el sistema no presenta agentes disipativos. Pero sabemos que en la práctica todos los sistemas presentan agentes que disipan energía por lo cual si queremos que el sistema oscile durante mucho tiempo, tenemos que suministrarle energía periódicamente. Aquí ocurre que si la energía es suministrada al sistema con una determinada frecuencia, la respuesta del sistema depende no sólo de la cantidad de energía suministrada sino también de la frecuencia con que se suministre.

Si la frecuencia del agente externo, que suministra la energía, coincide con una frecuencia propia del sistema, llamada frecuencia de resonancia, el sistema oscila con una máxima amplitud. A este fenómeno se le llama resonancia.

En el caso del columpio, que puede ser considerado como un péndulo, sabemos que la frecuencia propia del péndulo depende de su largo y de la aceleración de la gravedad, por lo que cuando lo empujamos con una frecuencia igual a esta frecuencia propia, entonces, las oscilaciones del columpio tendrán una máxima amplitud.

La resonancia tiene una importancia práctica extraordinaria. Por ejemplo, un motor que va a trabajar con cierta frecuencia de rotación, en una habitación determinada. Si la frecuencia de rotación del motor coincide con la frecuencia propia, de resonancia de la habitación puede ocurrir que las oscilaciones de las paredes de la habitación sean tan grandes, que se destruyan bajo los efectos de la resonancia. Por ello los ingenieros deben tener en cuenta estos problemas a la hora de instalar máquinas en locales cerrados.

Así mismo en los aviones debe tenerse en cuenta que la frecuencia de giro de los motores no coincida con la frecuencia de resonancia de las otras partes del avión, pues de lo contrario lo destruiría.

Esto fue lo que ocurrió en el puente de Tacoma Narrows, en EE UU, en noviembre de 1940, un viento provocó que el puente comenzara a oscilar con una frecuencia de 36 Hz, el puente entró en resonancia con el viento, la amplitud de las oscilaciones se hizo muy grande y el puente se destruyó.

La resonancia también tiene efectos positivos. Por ejemplo, cuando sintonizamos una estación en nuestro radio o televisor, lo que estamos haciendo es hacer coincidir la frecuencia de resonancia de nuestro sistema (el radio) con la frecuencia del agente externo (la estación que queremos oír) y así logramos que la amplitud sea máxima o sea que se oiga bien. De hecho estamos provocando una resonancia del tipo eléctrica en este caso.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, en nuestro medio ambiente estamos rodeados por diferentes sonidos que percibimos o escuchamos, por ejemplo, el hablar o cantar, el golpear un diapasón, al tocar un instrumento musical, etc.

Si se coloca un dedo en el cuello al estar hablando, se sienten vibraciones de las cuerdas vocales; otro ejemplo es al golpear el diapasón, el cual vibra al sumergir uno de sus extremos en el agua, ver fig. 18, se observa que salpican gotas de agua en todas direcciones, mostrando una fuente sonora (diapasón). El sonido es producido por una fuente en vibración.

En el sonido, la energía se transfiere desde la fuente en forma de ondas sonoras longitudinales. Por lo tanto, *el sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico*. Para que se produzca una onda sonora se necesita: una fuente en vibración y un medio elástico a través del cual se pueda propagar la perturbación.

Un experimento sencillo que puede mostrar la necesidad de un medio elástico es cuando se coloca un reloj despertador en una campana de vacío y se pone a funcionar, extrayendo poco a poco el aire que hay dentro de la campana se observa que al accionar el timbre del reloj se va escuchando menos, conforme es menor la cantidad de aire, hasta que existe vacío y sólo se ve el reloj que está vibrando y no se escucha el timbre. Si se permite la entrada de aire, se vuelve a escuchar un poco el timbre del reloj y conforme se agrega más aire, se escuchará mejor, ver fig. 19. Por lo tanto el aire es el medio elástico que se necesita para transmitir el sonido.

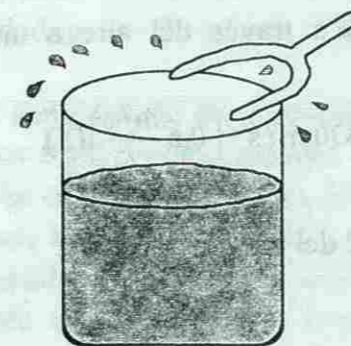


Figura 18. Salpicaduras del agua al introducir un diapasón vibrando.

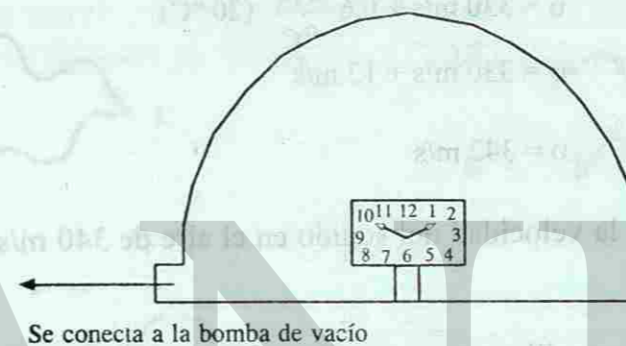


Figura 19. El timbre del reloj se escuchará cuando tenga aire la campana. El sonido no se propaga en el vacío.

El oído humano normal puede escuchar sonidos con frecuencia comprendida en el intervalo (audible) de 16 Hz a 20000 Hz. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia menor a 16 Hz se les denomina infrasónicas. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia mayor a 20000 Hz se denomina ultrasónicas.

## 2.- VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Cuando observamos el destello de un relámpago, oímos después el trueno; si se observa a una persona a lo lejos hacer un movimiento de golpear un objeto, se oirá después el sonido causado, debido a que la velocidad de la luz es mayor ( $3 \times 10^8$  m/s) que la velocidad del sonido (340 m/s en el aire).

La velocidad del sonido es mayor en los sólidos (alrededor de 5000 m por segundo en el hierro) es menor en los líquidos (alrededor de 1500m por segundo en el agua) y mucho menor en los gases. En el aire el sonido viaja a 330 m/s a  $T = 0^\circ\text{C}$ , al aumentar la temperatura del aire, también aumenta la velocidad del sonido, alrededor de 0.6 m por segundo cada  $^\circ\text{C}$ .

La resonancia también tiene efectos positivos. Por ejemplo, cuando sintonizamos una estación en nuestro radio o televisor, lo que estamos haciendo es hacer coincidir la frecuencia de resonancia de nuestro sistema (el radio) con la frecuencia del agente externo (la estación que queremos oír) y así logramos que la amplitud sea máxima o sea que se oiga bien. De hecho estamos provocando una resonancia del tipo eléctrica en este caso.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, en nuestro medio ambiente estamos rodeados por diferentes sonidos que percibimos o escuchamos, por ejemplo, el hablar o cantar, el golpear un diapasón, al tocar un instrumento musical, etc.

Si se coloca un dedo en el cuello al estar hablando, se sienten vibraciones de las cuerdas vocales; otro ejemplo es al golpear el diapasón, el cual vibra al sumergir uno de sus extremos en el agua, ver fig. 18, se observa que salpican gotas de agua en todas direcciones, mostrando una fuente sonora (diapasón). El sonido es producido por una fuente en vibración.

En el sonido, la energía se transfiere desde la fuente en forma de ondas sonoras longitudinales. Por lo tanto, *el sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico*. Para que se produzca una onda sonora se necesita: una fuente en vibración y un medio elástico a través del cual se pueda propagar la perturbación.

Un experimento sencillo que puede mostrar la necesidad de un medio elástico es cuando se coloca un reloj despertador en una campana de vacío y se pone a funcionar, extrayendo poco a poco el aire que hay dentro de la campana se observa que al accionar el timbre del reloj se va escuchando menos, conforme es menor la cantidad de aire, hasta que existe vacío y sólo se ve el reloj que está vibrando y no se escucha el timbre. Si se permite la entrada de aire, se vuelve a escuchar un poco el timbre del reloj y conforme se agrega más aire, se escuchará mejor, ver fig. 19. Por lo tanto el aire es el medio elástico que se necesita para transmitir el sonido.

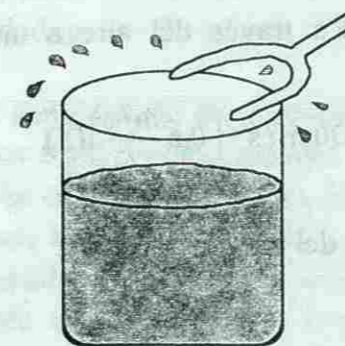


Figura 18. Salpicaduras del agua al introducir un diapasón vibrando.

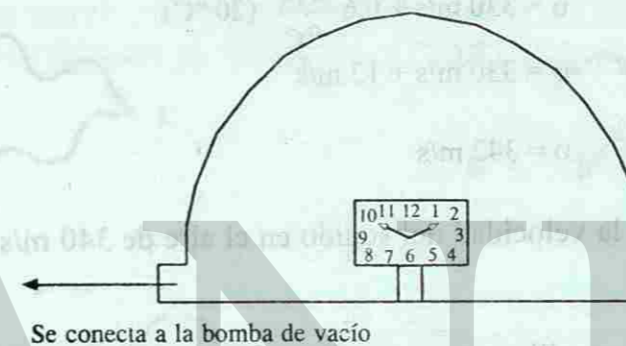


Figura 19. El timbre del reloj se escuchará cuando tenga aire la campana. El sonido no se propaga en el vacío.

El oído humano normal puede escuchar sonidos con frecuencia comprendida en el intervalo (audible) de 16 Hz a 20000 Hz. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia menor a 16 Hz se les denomina infrasónicas. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia mayor a 20000 Hz se denomina ultrasónicas.

## 2.- VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Cuando observamos el destello de un relámpago, oímos después el trueno; si se observa a una persona a lo lejos hacer un movimiento de golpear un objeto, se oirá después el sonido causado, debido a que la velocidad de la luz es mayor ( $3 \times 10^8$  m/s) que la velocidad del sonido (340 m/s en el aire).

La velocidad del sonido es mayor en los sólidos (alrededor de 5000 m por segundo en el hierro) es menor en los líquidos (alrededor de 1500m por segundo en el agua) y mucho menor en los gases. En el aire el sonido viaja a 330 m/s a  $T = 0^\circ\text{C}$ , al aumentar la temperatura del aire, también aumenta la velocidad del sonido, alrededor de 0.6 m por segundo cada  $^\circ\text{C}$ .

La velocidad del sonido a través del aire a una temperatura  $T$  puede calcularse a partir de

$$v = 330 \text{ m/s} + \left(0.6 \frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}}\right)(T)$$

donde  $T$  es la temperatura en  $^\circ\text{C}$  del aire.

Veamos el siguiente ejemplo

**Ejemplo 1.** Calcular la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

$$v = 330 \text{ m/s}$$

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$v = 330 \text{ m/s} + 0.6 \frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}} (20^\circ\text{C})$$

$$v = 330 \text{ m/s} + 12 \text{ m/s}$$

$$v = 342 \text{ m/s}$$

Consideraremos la velocidad del sonido en el aire de  $340 \text{ m/s}$  a condiciones normales.

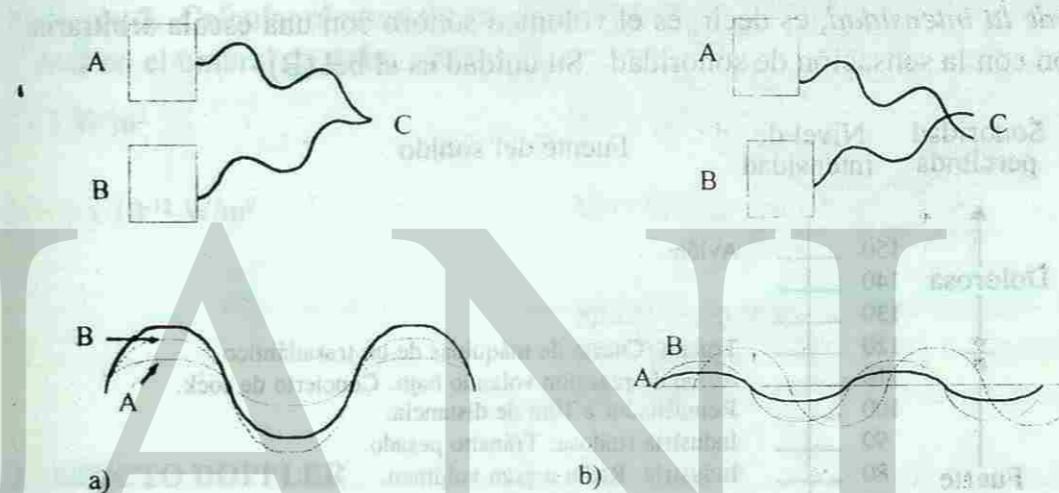
Un experimento sencillo que se puede realizar para medir la velocidad del sonido es colocándose una persona a  $1 \text{ Km}$  de distancia con una pistola (usada para las marcas de salida en pruebas atléticas) con cartuchos de salva para poder ver el fogonazo y medir el tiempo que tarda el sonido en llegar se repite el experimento 3 veces para obtener el tiempo promedio, con la fórmula de  $v = d/t$  se obtiene un valor muy aproximado al valor teórico de la velocidad del sonido. Se puede usar el sonido para calcular la profundidad de un desfiladero, si se mide el tiempo que tarda un sonido (aplaudir, gritar) en recorrer la distancia hasta el fondo y regresar.

Los barcos usan el aparato sonar para medir a que distancia se encuentran objetos abajo del agua, si se produce una señal sonora de frecuencia alta. A partir del tiempo entre la emisión de la señal y su regreso, se calcula la distancia al objeto. Cuando se utiliza para medir la profundidad, a menudo se le da el nombre de sonda acústica.

Los cohetes y aviones de propulsión a chorro tienen velocidades mayores que la velocidad del sonido. A veces su velocidad se mide en "número de mach". El número de mach de un objeto se obtiene al dividir su velocidad entre la

velocidad del sonido en el aire. Si su velocidad fuera mach 2, significa que el objeto viaja con una velocidad igual a 2 veces la velocidad del sonido en el aire.

Por su naturaleza el sonido tiene las propiedades de las ondas. Se reflejan las ondas sonoras en objetos rígidos como paredes de una habitación, llamándose eco al reflejo del sonido. Se difractan las ondas sonoras a través de una abertura pequeña (una ventana) de una habitación, esparciéndose el sonido. La interferencia de dos ondas de sonido puede ejemplificarse con dos bocinas colocadas como muestra la figura 20a, para una interferencia constructiva, se escuchará mejor. Para una interferencia destructiva, se escucha menor o no se escucha, ver figura 20b.



**Figura 20.** Las bocinas A y B interfieren en sus ondas sonoras, a) constructivamente b) destructivamente. La línea continua representa el sonido resultante.

El oído humano detecta las características de las ondas sonoras y se conocen como: tono, timbre y sonoridad.

*El tono es la frecuencia de la onda*, es decir a mayor frecuencia el sonido es más alto o agudo, a menor frecuencia el sonido es más bajo o grave.

*El timbre es la calidad de las ondas sonoras* (combinación de frecuencias) y es característico de cada instrumento o de cada persona.

*La sonoridad o intensidad describe la amplitud de la onda*, se mide en decibeles y determina si un sonido es fuerte o débil.

La intensidad ( $I$ ) de la onda es la relación de la potencia por unidad de área y expresa el flujo de transferencia de energía acústica a través de un área de sección transversal a la dirección de propagación. Sus unidades en el Sistema Internacional de la potencia son watts (W) y el área en metros cuadrados ( $m^2$ ).

El intervalo de intensidad audible por el oído humano es entre  $1 W/m^2$  y  $10^{-12} W/m^2$ , llamándose los extremos umbral de dolor y umbral audible, respectivamente. Si la intensidad es mayor a  $1 W/m^2$ , el oído tiene una sensación dolorosa en lugar de captar las ondas de sonido, ver figura 21. Es frecuente que en Acústica al umbral audible lo nombren el cero standard de la intensidad del sonido ( $I_0 = 10^{-12} W/m^2$  para una frecuencia de 1000 Hz). El nivel de intensidad (NI) es la medida de la intensidad del sonido en relación con el cero standard de la intensidad, es decir, es el volumen sonoro con una escala arbitraria en relación con la sensación de sonoridad. Su unidad es el bel (B).

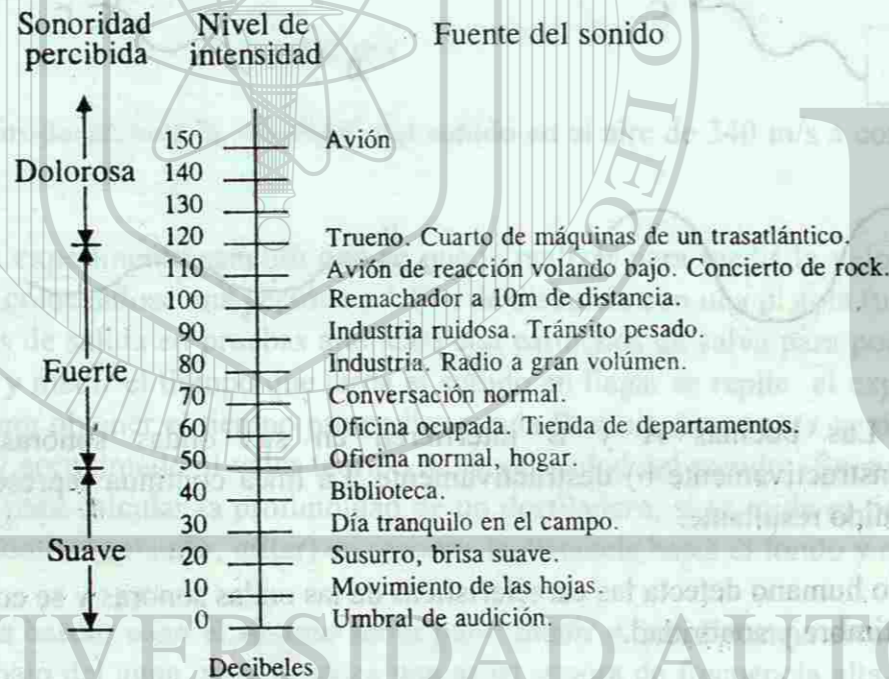


Figura 21. Niveles de intensidad de algunos sonidos.

Se representa el nivel de intensidad (NI) por la fórmula  $NI = \text{Log} \frac{I}{I_0}$  en bel.

Por ser el bel una unidad grande, la unidad decibel es la más usada y  $1 \text{ bel} = 10 \text{ decibeles (dB)}$ , quedando

$$NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0} \text{ en decibeles}$$

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 2.** Si un sonido tiene una intensidad de  $5 \times 10^{-8} W/m^2$ . ¿Cuál es el nivel de intensidad en dB?

$$I = 5 \times 10^{-8} W/m^2$$

$$NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 1 \times 10^{-12} W/m^2$$

$$NI = 10 \text{Log} \frac{(5 \times 10^{-8} W/m^2)}{(1 \times 10^{-12} W/m^2)}$$

$$NI = 10 \text{Log} (5 \times 10^4) = 10 (4 + \text{Log} 5)$$

$$NI = 10 (4 + 0.699) = 46.99 \text{ dB}$$

**Ejemplo 3.** Calcular el nivel de intensidad en decibeles un sonido, si su intensidad está en el umbral de dolor ( $1 W/m^2$ ).

$$I = 1 W/m^2$$

$$NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 1 \times 10^{-12} W/m^2$$

$$NI = 10 \text{Log} \frac{(1 W/m^2)}{(1 \times 10^{-12} W/m^2)}$$

$$NI = 10 \text{Log} 10^{12}$$

$$NI = 10 (12)$$

$$NI = 120 \text{ dB}$$

### 3.- EFECTO DOPPLER

Si una fuente sonora está inmóvil y un observador (receptor) inmóvil también está a una cierta distancia, la frecuencia con la que percibirá las ondas el observador será la misma con la que fueron emitidas por la fuente. Si tomamos como ejemplo una sirena de una ambulancia y un observador que están inmóviles, la frecuencia del sonido emitido por la sirena es igual a la percibida por el observador durante el tiempo que permanezcan sin moverse, ver figura 22.

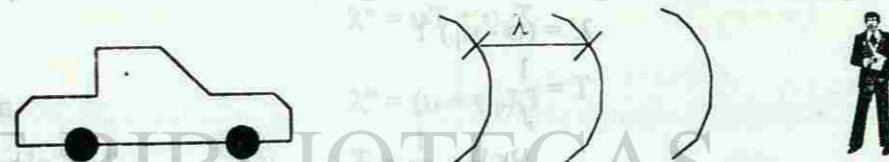


Figura 22. Primer caso. La fuente sonora y el receptor están inmóviles, la frecuencia de las ondas sonoras emitidas por la fuente es igual a la percibida por el observador.

En este caso la frecuencia ( $f$ ) percibida por el observador será la misma que la emitida por la fuente y está dada por  $f = \frac{v}{\lambda}$ , siendo " $v$ " la velocidad del sonido en el aire y " $\lambda$ " la longitud de onda de las ondas sonoras emitidas por la sirena.

Segundo Caso. Si la sirena se acerca al observador, el cual está inmóvil, la frecuencia con que éste percibirá a las ondas será mayor que la frecuencia con la cual son emitidas, esto se puede justificar ya que en el caso en el que la ambulancia se acerca al observador, las ondas sonoras se van aglomerando, teniendo por lo tanto una longitud de onda menor que la del primer caso, lo cual implica una frecuencia mayor, ver figura 23.

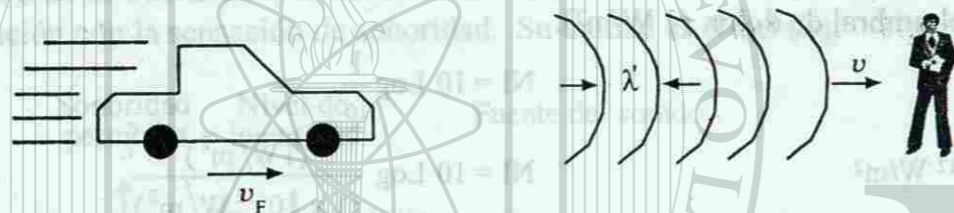


Figura 23. Segundo caso. El observador está inmóvil y la fuente se acerca, la longitud de onda es menor y la frecuencia aumenta, si la velocidad de propagación de la onda es constante e igual.

Como en el primer caso, la longitud de onda ( $\lambda$ ) es igual al producto de su velocidad de propagación de la onda (del sonido) por su período  $\lambda = vT$ , al acercarse la fuente al observador, la longitud de onda ( $\lambda'$ ) medida por éste, se verá disminuida una distancia igual al producto de la velocidad de la fuente ( $v_F$ ) por el período ( $T$ ), es decir

$$\lambda' = vT - v_F T$$

siendo " $v$ " la velocidad del sonido y  $v_F$  la velocidad de la fuente relativa al observador.

en donde

$$\lambda' = (v - v_F) T$$

como

$$T = \frac{1}{f}$$

sustituyendo

$$\lambda' = \frac{v - v_F}{f}$$

Vamos los siguientes ejemplos

Como la frecuencia ( $f'$ ) percibida por el observador está dada por

$$f' = \frac{v}{\lambda'}$$

sustituyendo

$$\lambda' = \frac{v - v_F}{f}$$

$$f' = \frac{vf}{v - v_F}$$

$$f' = \frac{v}{v - v_F} (f)$$

Tercer Caso. Si consideramos ahora que la ambulancia se aleja del observador, el cual está inmóvil, las ondas estarán más separadas que en el primer caso, es decir, su longitud de onda, será mayor, por lo cual la frecuencia percibida por el observador será menor, ver figura 24.

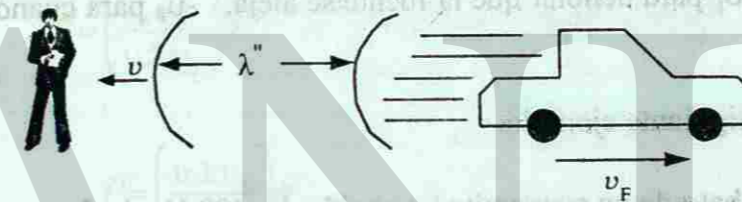


Figura 24. Tercer caso. El observador está parado y la fuente se aleja, las ondas sonoras tienen mayor longitud de onda al ser percibidas y menor frecuencia, si la velocidad de propagación es constante e igual en ambos casos.

Cuando la ambulancia (la fuente) se aleja, la longitud de onda ( $\lambda''$ ) medida por el observador se aumenta una distancia igual al producto de la velocidad de la fuente ( $v_F$ ) por el período, es decir

$$\lambda'' = vT + v_F T$$

o también

$$\lambda'' = (v + v_F) T$$

sustituyendo

$$T = \frac{1}{f}$$

$$\lambda'' = \frac{v + v_F}{f}$$

Como la frecuencia ( $f'$ ) percibida por el observador está dada por

$$f' = \frac{v}{\lambda}$$

sustituyendo

$$\lambda'' = \frac{v + v_F}{f}$$

reacomodando

$$f' = \left( \frac{v}{v + v_F} \right) f$$

Las dos ecuaciones anteriores de la frecuencia ( $f'$ ) percibida por el observador cuando la fuente sonora se acerca y cuando se aleja, se reordenan de la siguiente manera, quedando

$$f' = \left( \frac{v}{v \pm v_F} \right) f$$

en donde se usa  $+v_F$  para denotar que la fuente se aleja,  $-v_F$  para cuando la fuente se acerca.

Veamos el siguiente ejemplo.

**Ejemplo 4** El silbato de un tren emite un sonido de 400 Hz de frecuencia.

- a) ¿Cuál es el tono del sonido que se escucha cuando el tren se mueve hacia un observador inmóvil, con una velocidad de 20 m/s ?
- b) ¿Cuál es el tono que se escucha cuando el tren se aleja del observador a la misma velocidad? Considerando la velocidad del sonido de 340 m/s.

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$v_F = 20 \text{ m/s}$$

$$f = 400 \text{ Hz} = 400 \frac{1}{s}$$

$$a) \quad f' = \left( \frac{v}{v - v_F} \right) f$$

$$f' = \left( \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}} \right) \left( 400 \frac{1}{s} \right)$$

$$f' = 425 \frac{1}{s} = 425 \text{ Hz}$$

$$b) \quad f' = \left( \frac{v}{v + v_F} \right) f$$

$$f' = \left( \frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}} \right) \left( 400 \frac{1}{s} \right)$$

$$f' = 378 \frac{1}{s} = 378 \text{ Hz.}$$

Quando la fuente está en reposo y el observador es el que se mueve, la frecuencia captada debido a la velocidad de él, está dada por

$$f' = \left( \frac{v \pm v_o}{v} \right) f$$

en donde  $+v_o$  se usa cuando el observador se acerca a la fuente,  $-v_o$  cuando se aleja de la fuente.

En el caso en donde tanto el observador como la fuente se mueven, la frecuencia percibida está dada por la combinación de las ecuaciones

$$f' = \left( \frac{v}{v \pm v_F} \right) f$$

$$f' = \left( \frac{v \pm v_o}{v} \right) f$$

$$\text{en donde} \quad f' = \left( \frac{v \pm v_o}{v \pm v_F} \right) f$$

en donde la convención de signos es la misma que la usada anteriormente. Nótese que la ecuación se reduce a la primera si el observador está inmóvil ( $v_o = 0$ ).

*Este fenómeno que se presenta al percibir el observador una frecuencia diferente a la emitida por una fuente sonora, es llamado el efecto Doppler del sonido.*

*El efecto Doppler se puede observar en todo movimiento ondulatorio mecánico o electromagnético.*

Una de las aplicaciones del efecto Doppler es para detectar la velocidad de un objeto en movimiento por medio del sonar (ondas ultrasónicas en el agua) y del radar (ondas de radio en el aire).

**Ejemplo 5.** El silbato de una fábrica tiene una frecuencia de 800 Hz un día en que la velocidad del sonido es 340 m/s. ¿Qué frecuencia percibirá una persona que se aleja de la fuente con una velocidad de 30 m/s?

$$v_o = 30 \text{ m/s}$$

$$f' = \left( \frac{v - v_o}{v} \right) f$$

$$f_f = 800 \text{ Hz}$$

$$f' = \left( \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) (800 \text{ Hz})$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$f' = 729 \text{ Hz.}$$

#### 4.- RUIDO

Cuando una persona percibe un sonido indeseable, podemos decir que está escuchando ruido, siendo éste una superposición de ondas con diferentes frecuencias.

En el medio ambiente existen ruidos de tipo natural y los producidos por el hombre. Entre los ruidos naturales tenemos los generados por descargas eléctricas por los terremotos, los sonidos producidos por los animales (ladrar, rugir, etc.) y el ser humano produce ruido, como consecuencia del avance tecnológico para mejorar su nivel de vida.

El ruido puede causar a una persona además de la sordera, úlceras, disfunciones del sistema nervioso central, problemas psicológicos como insomnio, ansiedad, irritabilidad, dependiendo del nivel de ruido y el tiempo de exposición. Con base en esto, la industria establece para proteger a su personal como medida de prevención de riesgos por ruido, la rotación del personal de acuerdo al nivel de ruido, al tiempo de exposición en diferentes áreas de trabajo, así como uso de diferentes dispositivos protectores de los oídos, dependiendo de su intensidad y frecuencia del sonido.

## D.- ÓPTICA

### 1.- INTRODUCCIÓN

La óptica es la rama de la Física que estudia la luz y los fenómenos que produce.

Todos necesitamos de la luz para poder ver a nuestro alrededor, por ejemplo, para leer se necesita de una buena iluminación; para manejar en la oscuridad hacemos uso de los faros delanteros del automóvil; para trabajar en las minas se acopla en la cabeza de los obreros un faro en la frente para poder ver, etc.

La luz es percibida por el ojo humano, así como el sonido es percibido por el oído. El sonido se estudió anteriormente como una perturbación, ya que presenta los fenómenos de una onda (difracción, reflexión y refracción). La luz también la estudiaremos tomando en cuenta los fenómenos de reflexión, refracción y difracción, sólo que inicialmente consideraremos que bajo ciertas condiciones la luz se propaga en línea recta y para su estudio la representaremos mediante rayos rectos; el análisis de este modelo es lo que se denomina ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Posteriormente, tomaremos en cuenta que alrededor de un obstáculo la luz se desvía, esto es debido al fenómeno de difracción; el análisis de la luz tomando esta consideración es lo que se conoce como ÓPTICA FÍSICA.

Podríamos decir que en la Óptica Geométrica estamos asignándole a la luz un comportamiento de rayo, en la Óptica Física la interpretación que le daremos a la luz es que se comporta como una onda, y en la Óptica Cuántica se considera a la luz como corpúsculos. Actualmente sabemos que ambas teorías son correctas, ya que la luz, como cualquier radiación electromagnética, presenta esa dualidad en su comportamiento, como más tarde se verá en detalle.

Se estudia la luz como una perturbación que tiene las características de una onda, sólo que se propaga en el vacío ya que la luz nos llega del Sol que está a gran distancia, existiendo vacío, entre la Tierra y el Sol, por lo que la luz se considera una perturbación que no necesita de un medio para su propagación.

Se analiza la naturaleza de la luz, la cual puede ser ondulatoria o corpuscular, de acuerdo a sus características principales que son: Propagación en línea recta, reflexión y refracción.



**Ejemplo 5.** El silbato de una fábrica tiene una frecuencia de 800 Hz un día en que la velocidad del sonido es 340 m/s. ¿Qué frecuencia percibirá una persona que se aleja de la fuente con una velocidad de 30 m/s?

$$v_o = 30 \text{ m/s}$$

$$f' = \left( \frac{v - v_o}{v} \right) f$$

$$f_f = 800 \text{ Hz}$$

$$f' = \left( \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) (800 \text{ Hz})$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$f' = 729 \text{ Hz.}$$

#### 4.- RUIDO

Cuando una persona percibe un sonido indeseable, podemos decir que está escuchando ruido, siendo éste una superposición de ondas con diferentes frecuencias.

En el medio ambiente existen ruidos de tipo natural y los producidos por el hombre. Entre los ruidos naturales tenemos los generados por descargas eléctricas por los terremotos, los sonidos producidos por los animales (ladrar, rugir, etc.) y el ser humano produce ruido, como consecuencia del avance tecnológico para mejorar su nivel de vida.

El ruido puede causar a una persona además de la sordera, úlceras, disfunciones del sistema nervioso central, problemas psicológicos como insomnio, ansiedad, irritabilidad, dependiendo del nivel de ruido y el tiempo de exposición. Con base en esto, la industria establece para proteger a su personal como medida de prevención de riesgos por ruido, la rotación del personal de acuerdo al nivel de ruido, al tiempo de exposición en diferentes áreas de trabajo, así como uso de diferentes dispositivos protectores de los oídos, dependiendo de su intensidad y frecuencia del sonido.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

$$f' = \left( \frac{v - v_o}{v} \right) f$$

$$f' = \left( \frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) (800 \text{ Hz})$$

## D.- ÓPTICA

### 1.- INTRODUCCIÓN

La óptica es la rama de la Física que estudia la luz y los fenómenos que produce.

Todos necesitamos de la luz para poder ver a nuestro alrededor, por ejemplo, para leer se necesita de una buena iluminación; para manejar en la oscuridad hacemos uso de los faros delanteros del automóvil; para trabajar en las minas se acopla en la cabeza de los obreros un faro en la frente para poder ver, etc.

La luz es percibida por el ojo humano, así como el sonido es percibido por el oído. El sonido se estudió anteriormente como una perturbación, ya que presenta los fenómenos de una onda (difracción, reflexión y refracción). La luz también la estudiaremos tomando en cuenta los fenómenos de reflexión, refracción y difracción, sólo que inicialmente consideraremos que bajo ciertas condiciones la luz se propaga en línea recta y para su estudio la representaremos mediante rayos rectos; el análisis de este modelo es lo que se denomina ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Posteriormente, tomaremos en cuenta que alrededor de un obstáculo la luz se desvía, esto es debido al fenómeno de difracción; el análisis de la luz tomando esta consideración es lo que se conoce como ÓPTICA FÍSICA.

Podríamos decir que en la Óptica Geométrica estamos asignándole a la luz un comportamiento de rayo, en la Óptica Física la interpretación que le daremos a la luz es que se comporta como una onda, y en la Óptica Cuántica se considera a la luz como corpúsculos. Actualmente sabemos que ambas teorías son correctas, ya que la luz, como cualquier radiación electromagnética, presenta esa dualidad en su comportamiento, como más tarde se verá en detalle.

Se estudia la luz como una perturbación que tiene las características de una onda, sólo que se propaga en el vacío ya que la luz nos llega del Sol que está a gran distancia, existiendo vacío, entre la Tierra y el Sol, por lo que la luz se considera una perturbación que no necesita de un medio para su propagación.

Se analiza la naturaleza de la luz, la cual puede ser ondulatoria o corpuscular, de acuerdo a sus características principales que son: Propagación en línea recta, reflexión y refracción.

## 2.- NATURALEZA DE LA LUZ

Algunas observaciones sencillas sobre el comportamiento de la luz son tan antiguas como la raza humana. Se interpretaba a la luz como lo opuesto a la oscuridad. Las primeras ideas que se conocen sobre la naturaleza de la luz son las de los atomistas de la línea de Demócrito (s.V a J.C.) los cuales creían que la luz era una gran cantidad de partículas despedidas por los cuerpos visibles.

Pitágoras (580-500 a J.C.) señalaba que la luz emana de los cuerpos luminosos en todas direcciones, choca contra los objetos, rebota y penetra en los ojos, produciendo la sensación de ver dichos cuerpos. Para Aristóteles (384-322 a J.C.) todo espacio estaba lleno de éter y un objeto se percibía por su movimiento, en sí consideraba a la luz como una especie de pulso en el mar etéreo.

Epicuro de Samos (341-270 a J.C.) pensaba que la luz era emitida en forma de rayos, los cuales al entrar al ojo, estimulaban el sentido de la vista.

Leonardo da Vinci (1452-1517) fue el primero en relacionar a la luz, al sonido y al agua con las ondas. Escribió que las ondas de luz se iban separando de un cuerpo, propagándose en círculos y llenando el espacio a su alrededor.

Descartes (1596-1650) consideraba que la luz era como una presión que se propagaba en un universo denso lleno de partículas, y que era percibida a través de vibraciones.

Posteriormente, en 1665 Isaac Newton (1642-1727) demostró que mediante la teoría corpuscular de la luz era posible explicar los fenómenos relacionados con la reflexión y la refracción. Un contemporáneo de Newton, Christian Huygens (1629-1695) formalizó la teoría ondulatoria de la luz y con ella demostró también las leyes de reflexión y de refracción. A pesar de que la teoría ondulatoria fue experimentalmente comprobada por Francesco Grimaldi (1618-1663) al detectar que la luz presentaba efectos de difracción, la mayor parte de los científicos rechazaban esta teoría y adoptaban la teoría corpuscular de Newton; esta situación prevaleció hasta principios del siglo XIX. En 1801 Thomas Young (1773-1829) realizó la primera demostración convincente acerca de la naturaleza ondulatoria de la luz, al descubrir que bajo ciertas condiciones, la luz presentaba características de superposición (INTERFERENCIA). Otro personaje importante que apoyó la

teoría ondulatoria fue Augustin Fresnel (1788-1829) quien realizó diversos experimentos en los cuales se detectaban fenómenos de interferencia y de difracción. Jean Foucault (1791-1868) en el año de 1850 también contribuyó a la aceptación de la teoría ondulatoria, al demostrar que la rapidez de la luz a través de sólidos o de líquidos era menor que en el aire.

El trabajo más relevante en el siglo XIX sobre el comportamiento y la naturaleza de la luz, fue realizado por James Clerk Maxwell (1831-1879) quien demostró en 1873 que la luz es una onda electromagnética de alta frecuencia que se desplaza en el vacío con una rapidez de  $3 \times 10^8$  m/s, y que se puede considerar como una combinación de campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí y a la vez perpendiculares a la velocidad de propagación de la onda, ver fig. 25. Ocho años después del fallecimiento de Maxwell, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) comprobó que la luz al igual que las ondas electromagnéticas, presentaba fenómenos de reflexión, refracción y difracción.

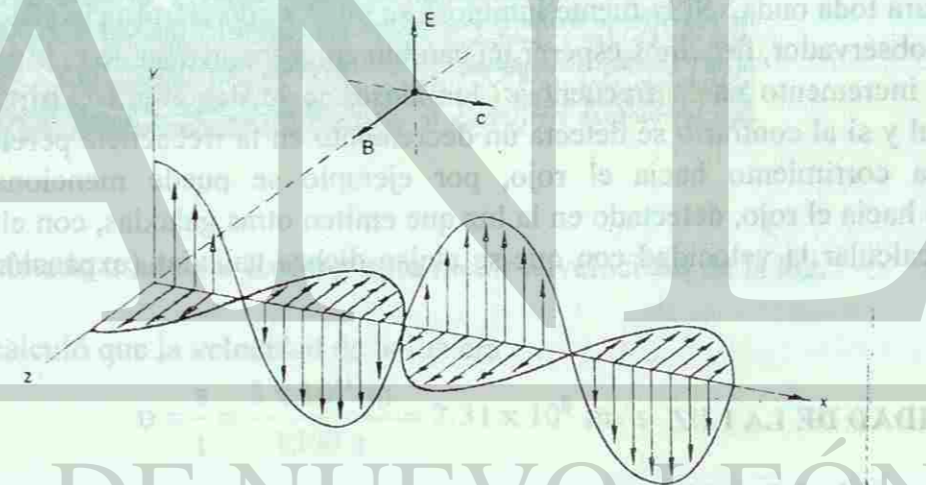


Figura 25.- El vector del campo eléctrico (E) y el vector del campo magnético (B) son perpendiculares entre sí y a la dirección de la propagación de la velocidad de la luz (c).

La teoría ondulatoria de la luz estuvo vigente todo el siglo XIX y hasta principios del siglo actual, cuando en 1900 Max Planck (1858-1947) regresa a la interpretación corpuscular de la luz para explicar la radiación que es emitida por un "cuerpo negro", dando inicio con ello la Mecánica Cuántica; en este modelo Planck propuso que la energía térmica emitida por un cuerpo se presenta en paquetes discretos llamados "cuantos", los cuales en el caso particular de energía luminosa son llamados "fotones".

Finalmente, en 1905 Albert Einstein (1879-1955) explicó el "efecto fotoeléctrico" mediante la teoría cuántica de Planck; este fenómeno se explica en la siguiente unidad.

En conclusión, podemos decir que la luz tiene una naturaleza dual, ya que para explicar algunos de sus efectos, por ejemplo la manera como se propaga y su interferencia, se considera como una onda; y para explicar el efecto fotoeléctrico o algún otro al interaccionar la luz con la materia, se supone que está formada por partículas.

Como se mencionó en el efecto Doppler del sonido, dicho efecto es válido para la luz como para toda onda. Si la fuente luminosa se mueve con cierta velocidad con respecto al observador, debemos esperar un cambio en la frecuencia de la luz, si se percibe un incremento en la frecuencia luminosa, se le denomina corrimiento hacia el azul y si al contrario se detecta un decremento en la frecuencia percibida, se le llama corrimiento hacia el rojo, por ejemplo se puede mencionar el corrimiento hacia el rojo, detectado en la luz que emiten otras galaxias, con el cual es posible calcular la velocidad con que se alejan dichas galaxias (expansión del Universo).

### 3.- VELOCIDAD DE LA LUZ

Hasta finales del siglo XVII se aceptaba que la luz se transmitía de manera instantánea.

Galileo (1564-1642) hizo los primeros intentos para medir experimentalmente la velocidad de la luz considerando para ello la distancia conocida entre dos torres, en cada una de las cuales había un observador que enviaba señales luminosas de noche mediante linternas. Galileo sólo logró reafirmar que la luz se transmitía instantáneamente.

Posteriormente en 1675, Olaus Roemer (1644-1710) fue el primero en estimar la rapidez de la luz, cuando estudiaba una de las lunas de Júpiter, se basó en las irregularidades de los eclipses que se predecían para dichas lunas. Midió el intervalo de tiempo entre eclipses sucesivos durante varios años y advirtió una variación de 1300 s cuando la Tierra estaba más alejada de Júpiter, entonces relacionó que ese tiempo necesita la luz que proviene de la luna de Júpiter para recorrer el diámetro de la órbita terrestre ( $3 \times 10^{11}$  m), ver fig. 26.

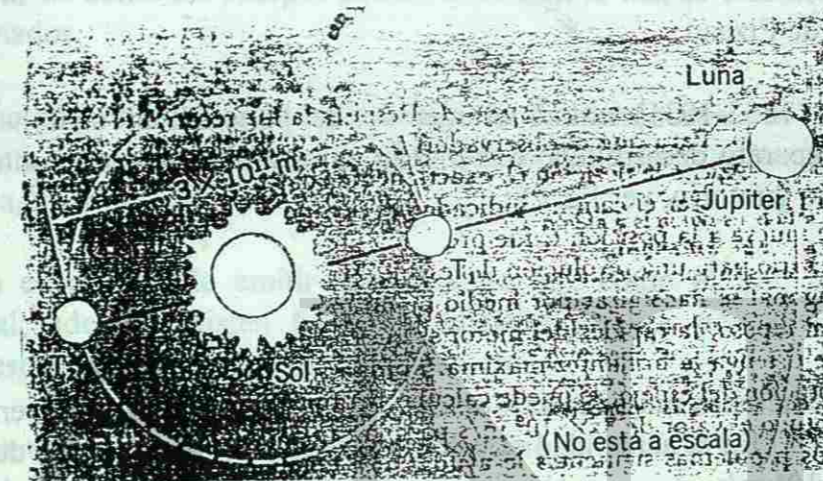


Figura 26.- Método usado por Roemer para medir la velocidad de la luz.

Así Roemer calculó que la velocidad de la luz era

$$v = \frac{s}{t} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{1300 \text{ s}} = 2.31 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La primera medición confiable de la velocidad de la luz la realizó en 1849 A.H.L. Fizeau (1819-1896), con un experimento sencillo en el cual utilizaba una rueda giratoria dentada, un espejo plano, un vidrio semiplatado y una fuente luminosa. Al pasar la luz por la abertura entre dos de los dientes de la rueda, sigue su trayectoria hacia el espejo y regresa pasando por otra abertura; si se conoce la distancia entre la rueda y el espejo, el número de dientes de la rueda y su velocidad angular, se puede determinar la velocidad de la luz. La velocidad calculada por Fizeau fue de  $3.13 \times 10^8$  m/s, ver fig. 27.

Figura 27. Una fuente puntual forma una sombra...

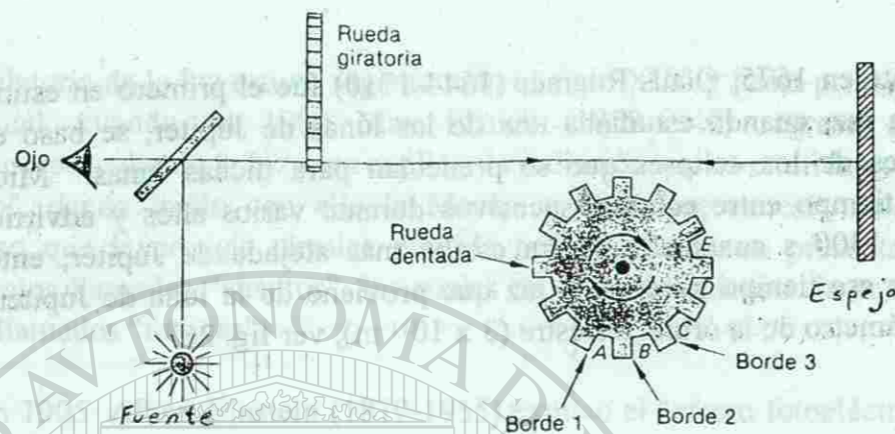


Figura 27.- Aparato de Fizeau.

Albert A. Michelson (1852-1931) utilizó el método de Foucault el cual había refinado en 1850 el aparato desarrollado por Fizeau, al sustituir la rueda dentada giratoria por un espejo giratorio, ver fig. 28.

Michelson obtuvo mediciones muy exactas, determinó la velocidad de la luz en el aire de  $2.997 \times 10^8$  m/s. En la actualidad el valor aceptado para la velocidad de la luz es de  $2.997925 \times 10^8$  m/s.



Figura 28.- Aparato de Michelson.

#### 4.- FOTOMETRIA

La fotometría es la parte de la óptica que se encarga de medir la intensidad de las fuentes luminosas y la iluminación de las superficies.

Para realizar alguna actividad en el hogar, en la escuela, en un área de trabajo, etc., generalmente requerimos de una buena iluminación a nuestro alrededor.

A partir de cómo los cuerpos emiten o reflejan la luz, se clasifican en luminosos o iluminados.

Un cuerpo luminoso es aquél que emite ondas luminosas, por ejemplo el Sol, una vela, etc. Un cuerpo iluminado es el que refleja las ondas luminosas, por ejemplo la luna, un árbol, etc.

Si un cuerpo puede emitir naturalmente luz, como el Sol, se le llama fuente natural; además existen fuentes artificiales de luz, por ejemplo las lámparas fluorescentes, lámparas incandescentes, etc.

Los materiales se clasifican de acuerdo como se trasmite la luz a través de ellos; un material transparente es aquél a través del cual se puede ver claramente los objetos, por ejemplo el aire, el vidrio, etc; un material translúcido es el que transmite parcialmente la luz, por ejemplo el vidrio esmerilado, el acrílico, etc. Un material opaco es el que absorbe o refleja toda la luz que recibe, por ejemplo una piedra, una mesa, etc. Debido a que no puede pasar la luz a través de un material opaco, se produce una sombra detrás de él, es decir, la sombra o umbra es la región donde no entra la luz, ver fig. 29.

La formación de las sombras bien limitadas es una evidencia más de como se propaga la luz en línea recta.

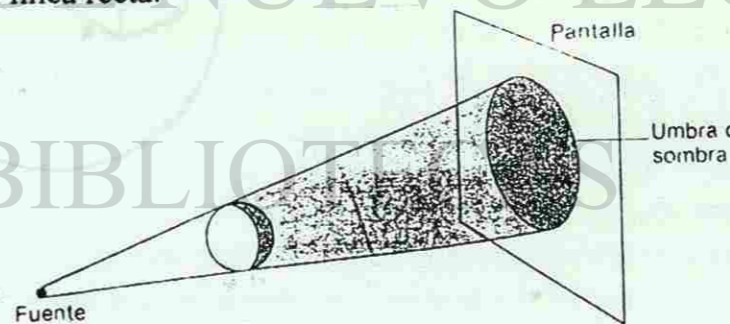


Figura. 29. Una fuente puntual forma una sombra o umbra.

Consideraremos una fuente puntual de luz, como aquella cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con las distancias en cuestión.

Cuando en lugar de una fuente puntual de luz se tiene una fuente extendida, la sombra en sí constará de dos regiones; la región interna llamada sombra o umbrá y la región externa, a la cual se le llama penumbra, ver fig. 30.

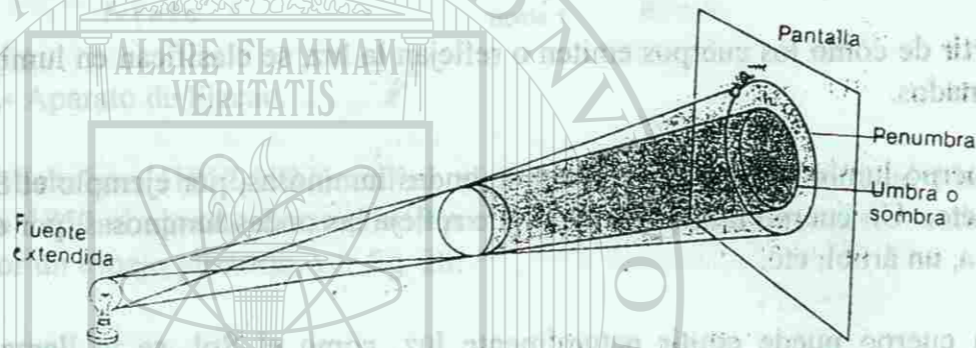


Figura 30.- Una fuente extendida de luz forma dos regiones: la sombra y la penumbra.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

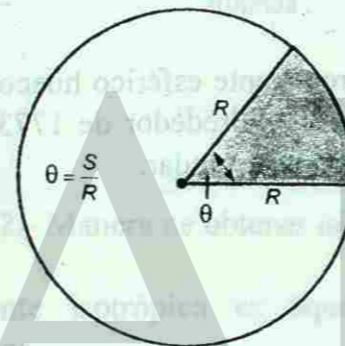
Figura 28. Aparato de Michelson para medir la velocidad de la luz.

**Flujo luminoso.**

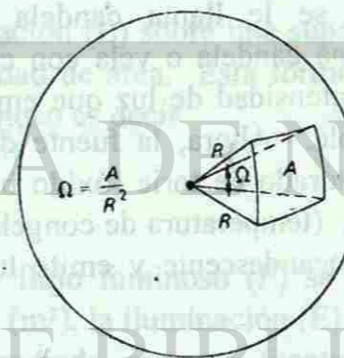
El flujo luminoso ( $F$ ) es la cantidad de energía luminosa que llega a una superficie perpendicular (normal) a los rayos de luz, en la unidad de tiempo. Se considera solamente la energía luminosa emitida en el rango de la luz visible que es de 400 nm a 700 nm.

La unidad en el S.I. del flujo luminoso es el lumen (lm) que se determina por comparación con una fuente estándar. Se necesita el concepto de ángulo sólido para establecer la unidad lumen.

Un ángulo sólido ( $\Omega$ ) tiene unidades de estereorradianes (sr) y se define de una manera análoga a la de un ángulo plano, cuya unidad es el radián, ver fig. 31



$\theta = \frac{S}{R}$  radián  
 en donde  
 S es la longitud del arco  
 R es el radio  
 $\theta$  es el desplazamiento angular



$\Omega = \frac{A}{R^2}$  sr  
 en donde  
 A es el área de la superficie esférica  
 $\Omega$  es el ángulo sólido

Figura 31. Analogía entre la definición de un a) radián b) estereorradián

Para visualizar lo que representa un estereorradián, consideremos una esfera hueca de radio (R), en cuyo centro se coloca una fuente puntual que emite luz uniformemente en todas direcciones. Si cuatro radios a partir de la fuente puntual determinan sobre la superficie de la esfera una área igual a  $R^2$ , el ángulo definido por los cuatro radios es una unidad de ángulo sólido, es decir un estereorradián.

Estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área (A) sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio.

El estereorradián es una cantidad física adimensional, igual que el radián.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso emitido por una fuente estándar a través de una abertura de  $\frac{1}{60}$  cm<sup>2</sup> realizada en un ángulo sólido de un estereorradián.

Lo que se considera como una fuente estándar es un recipiente esférico hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino, alrededor de 1773 °C. El lumen en sí mide el brillo por comparación con la fuente estándar.

#### Intensidad luminosa

La intensidad luminosa (I) es la razón del flujo luminoso a la unidad del ángulo sólido. En el Sistema Internacional la unidad de intensidad luminosa es el lumen sobre estereorradián, a esta razón de unidades se le llama candela (cd). Inicialmente se estableció esta unidad a partir de una candela o vela con ciertas especificaciones, las cuales no eran estables en la intensidad de luz que emitían, por lo que no fue un patrón de referencia confiable. Ahora, la fuente de luz considerada es un sexagésimo de un centímetro cuadrado de toria (óxido blanco del elemento torio) fusionado y mantenido a 2045°K (temperatura de congelación del platino), a esta temperatura la toria se torna incandescente y emite luz de manera constante y confiable, ver fig. 32.



Figura 32.- Manera de obtener una unidad candela de intensidad luminosa.

Una fuente isotrópica es aquella que emite uniformemente luz en todas direcciones.

#### Iluminación

La iluminación (E) sobre una superficie (A) se define como el flujo luminoso (F) en la unidad de área. Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso es decir

$$E = \frac{F}{A}$$

cuando el flujo luminoso (F) se mide en lumen (lm) y el área (A) en metros cuadrados (m<sup>2</sup>), la iluminación (E) tiene unidades de lm/m<sup>2</sup> o lux (lx).

La luz irradiada por una fuente puntual es emitida en todas direcciones, al aumentar la distancia, la luz se dispersa y una superficie alejada recibe menos iluminación, por lo tanto la cantidad de iluminación que recibe una superficie es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a la fuente.

La iluminación se puede expresar en términos de la intensidad luminosa y de la distancia respecto a la fuente, es decir

$$E = \frac{F}{A}$$

y como

$$F = I \Omega$$

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

Al sustituir en la ecuación anterior, resulta

$$E = \frac{IA}{AR^2}$$

eliminando A se tiene

$$E = \frac{I}{R^2}$$

Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso.

Observa que las unidades de intensidad (cd) y las unidades de flujo (lm) son dimensionalmente las mismas. Esto es cierto, ya que el ángulo sólido en estereorradianes es adimensional.

El brillo fotométrico o luminancia es la intensidad luminosa de una superficie en una dirección dada, por unidad de área proyectada de la misma. El ojo capta brillo, no iluminación de los objetos visibles.

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 1.-** Una superficie de escritorio está 2 m abajo de una lámpara de 160 candelas. Calcular la iluminación en la superficie.

$$I = 160 \text{ cd} \quad \text{Como} \quad E = \frac{I}{R^2}$$

$$R = 2 \text{ m} \quad \text{sustituyendo} \quad E = \frac{160 \text{ cd} \left( \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{(2 \text{ m})^2}$$

$$E = 40 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

$$E = 40 \text{ lx}$$

**Ejemplo 2.-** Si una lámpara eléctrica de 300 candelas está a 3 m de altura. Calcular la iluminación en el suelo.

$$I = 300 \text{ cd} \quad \text{Como} \quad E = \frac{I}{R^2}$$

$$R = 3 \text{ m} \quad \text{sustituyendo}$$

$$E = \frac{300 \text{ cd} \left( \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{(3 \text{ m})^2}$$

$$E = 33.33 \text{ lx}$$

**Ejemplo 3.** Una lámpara de alumbrado público produce 3.8 lux de iluminación a una distancia de 10 m. Calcular la intensidad luminosa de la lámpara.

$$E = 3.8 \text{ lx} \quad \text{Como} \quad E = \frac{I}{R^2}$$

$$R = 10 \text{ m}$$

despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left( 3.8 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \left( \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ lm}} \right) (10 \text{ m})^2$$

$$I = 380 \text{ cd}$$

**Ejemplo 4.** Calcular la distancia a la que debe colocarse una lámpara eléctrica de 300 candelas para que produzca sobre la superficie de una mesa una iluminación de 60 lux.

$$I = 300 \text{ cd} \quad \text{Como} \quad E = \frac{I}{R^2}$$

$$E = 60 \text{ lx}$$

despejando

$$R^2 = \frac{I}{E}$$

$$R = \sqrt{\frac{I}{E}}$$

sustituyendo

$$R = \sqrt{\frac{300 \text{ cd} \left( \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{60 \text{ lm/m}^2}}$$

$$R = 2.24 \text{ m.}$$

**Ejemplo 5.** Una lámpara ubicada a 1.5 m de una superficie produce una iluminación de 225 lux sobre esta superficie. Calcular la intensidad de la fuente.

R = 1.5 m  
E = 225 lx

Como  $E = \frac{I}{R^2}$   
despejando

$I = ER^2$   
sustituyendo

$$I = \left( 225 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) (1.5 \text{ m})^2$$

$$I = 506.25 \text{ lm} \left( \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ lm}} \right)$$

$$I = 506.25 \text{ cd}$$

**Ejemplo 6.** Se suspende una luz a 9 m por encima del piso de la calle y proporciona una iluminación de 36 lux en un punto directamente debajo de ella. Determinar la intensidad luminosa.

R = 9m  
E = 36 lx

Como  $E = \frac{I}{R^2}$   
despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left( 36 \frac{\text{lm} (1 \text{ cd} / 1 \text{ lm})}{\text{m}^2} \right) (9\text{m})^2$$

$$I = 2,916 \text{ cd.}$$

### 5.- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTRO VISIBLE

El espectro electromagnético lo constituyen las diferentes clases de radiación electromagnética que existen, todas ellas son ondas electromagnéticas que poseen un campo eléctrico y un campo magnético, son ondas transversales, su diferencia básica de cada clase es su frecuencia y su longitud de onda. La velocidad de propagación de todas las radiaciones electromagnéticas es de 300,000 km/s en el vacío, Maxwell fue el primero en proponer y comprobar lo anterior.

En el espectro se puede visualizar cómo la longitud de onda decrece de manera progresiva y se empieza con las ondas largas de radio, ondas cortas de radio, infrarrojo, región de luz visible, ultravioleta, rayos X, rayos gamma, ver fig. 33.

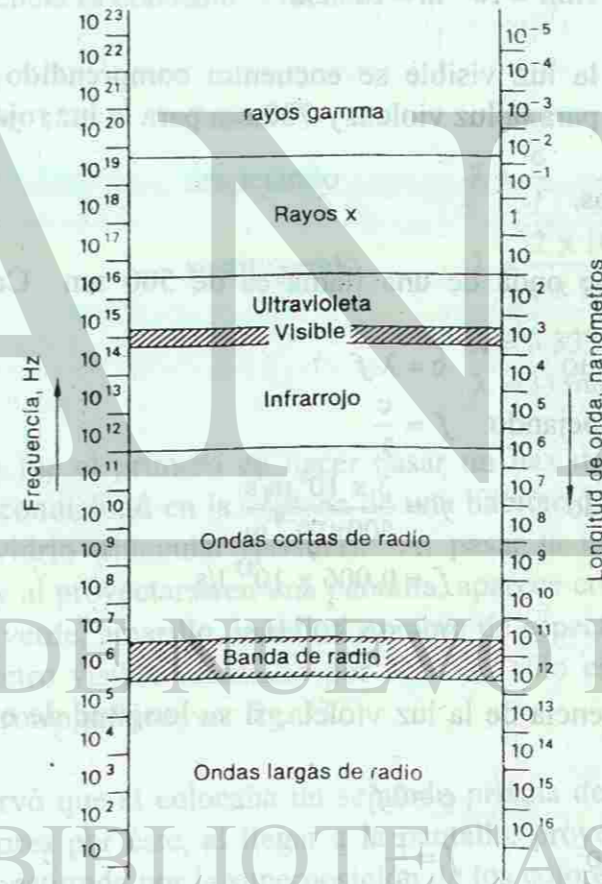


Figura 33. Espectro electromagnético.



Las regiones del espectro se superponen un poco entre sí, cada región tiene sus propias características, sin embargo, todas las regiones corresponden a radiación electromagnética.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia ( $f$ ) por la ecuación general

$$c = \lambda f$$

En donde  $c$  es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s) en el vacío.

La región de luz visible del espectro electromagnético está comprendida en longitudes de onda entre 0.00004 cm y 0.00007 cm, como son muy pequeñas, dichas longitudes se expresan en función del nanómetro en el Sistema Internacional.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$$

Por lo tanto, el espectro de la luz visible se encuentra comprendido entre las longitudes de onda de 400 nm para la luz violeta y 700 nm para la luz roja.

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 7.-** Si la longitud de onda de una llama es de 500 nm. Calcular su frecuencia.

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como  $c = \lambda f$

despejando  $f = \frac{c}{\lambda}$

sustituyendo  $f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}}$

$$f = 0.006 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

**Ejemplo 8.-** Calcular la frecuencia de la luz violeta, si su longitud de onda es de 410 nm.

$$\lambda = 410 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como  $c = \lambda f$

despejando  $f = \frac{c}{\lambda}$

sustituyendo  $f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{410 \times 10^{-9} \text{ m}}$

$$f = 0.0073 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 7.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

**Ejemplo 9.-** Cuando una luz de longitud de onda de 500 nm pasa del aire a una placa de vidrio delgada y de nuevo hacia el aire, la frecuencia permanece constante, pero la velocidad de la luz en el vidrio se reduce a  $2 \times 10^8$  m/s. Calcular su longitud de onda dentro del vidrio.

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

despejando

sustituyendo

$$c = \lambda f$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f = 0.006 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

como la frecuencia es constante, entonces

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ 1/s}$$

$$c = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

despejando

sustituyendo

$$c = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{2 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^{14} \text{ 1/s}}$$

$$\lambda = 0.333 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\lambda = 333 \text{ nm}$$

Isaac Newton fué el primero en hacer pasar un haz de luz solar a través de un orificio que acondicionó en la ventana de una habitación oscura y lo dirigió hacia un pequeño vidrio triangular (prisma). Al pasar la luz a través del prisma se descompone y al proyectarse en una pantalla, aparece como una banda de colores: violeta, azul, verde, amarillo, le dió el nombre de espectro a dicha banda, ver fig. 6. Este espectro visible estudiado por Newton sólo es una pequeña región del espectro electromagnético, ver fig. 33.

Newton observó que si colocaba un segundo prisma de tal manera que pasara la banda de colores por éste, al llegar a la pantalla, proyectaba luz blanca. La luz blanca está constituida por la superposición de los colores del iris, los cuales pasan imperceptiblemente de uno a otro, desde el rojo hasta el violeta. La descomposición o dispersión de la luz es el fenómeno mediante el cual se obtienen los colores del iris, ver fig. 34.

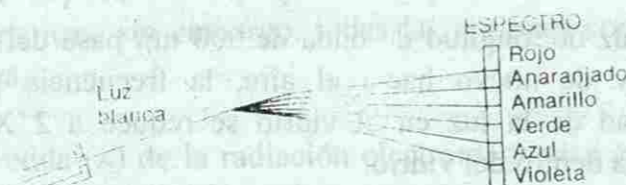


Figura 34. Descomposición o dispersión de la luz blanca usando un prisma.

El espectro de los colores que forman la luz blanca, en el aire o en el vacío, tienen la misma velocidad de la luz, se distingue un color de otro por su frecuencia. La frecuencia del rojo es aproximadamente  $3 \times 10^{14}$  Hz y del violeta es  $8 \times 10^{14}$  Hz. A partir de la ecuación  $c = \lambda f$  se tiene que la longitud de onda es mayor para el rojo que para el violeta, ver fig. 35. A partir de la figura se observa que la longitud de onda del espectro visible es de  $7000 \text{ \AA}$  para el rojo y  $4000 \text{ \AA}$  para el color violeta, en donde  $1 \text{ angstrom (A}^\circ) = 10^{-10} \text{ m}$ .

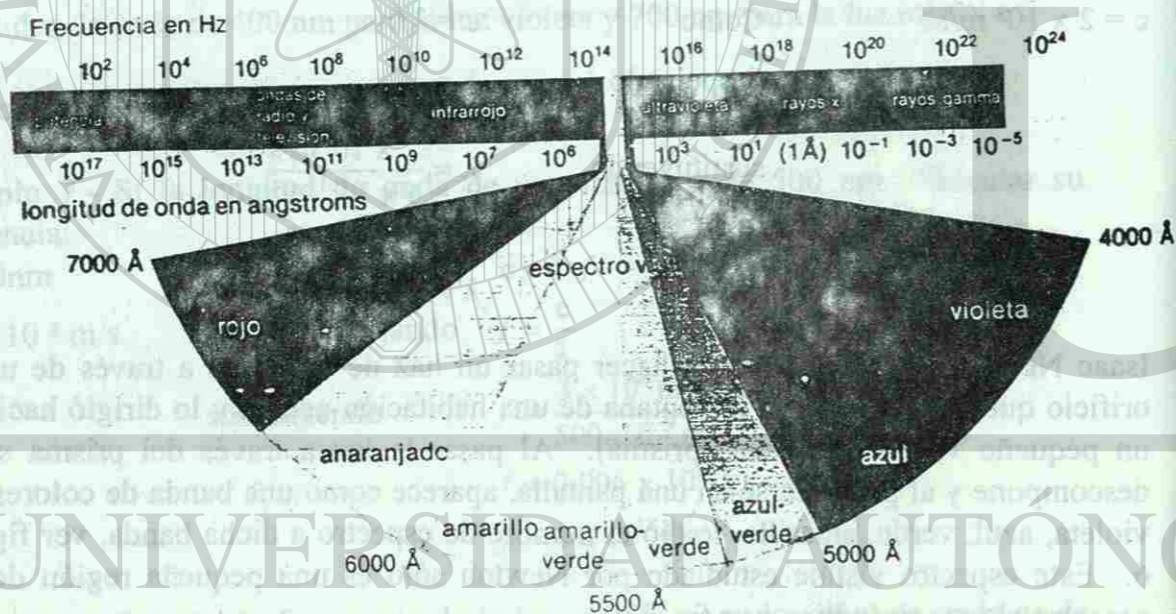


FIGURA 35 Espectro electromagnético.

La descomposición de la luz por un prisma de vidrio es debida a que cada uno de los colores tiene diferente índice de refracción, siendo el más refractado el violeta y el menos refractado el rojo, debido a que cada color tiene diferente velocidad a través del prisma, siendo el rojo el que se desvía menos por ser su velocidad mayor que la del color violeta, el cual se desvía más.

Por lo tanto Newton demostró que la luz está formada de diversos colores (desde el rojo hasta el violeta en la descomposición de la luz blanca), considerando los colores primarios de la luz el rojo, verde y azul, en tanto que el amarillo (combinación de la luz roja y azul), turquesa (verde y azul), magenta (rojo con azul) se llaman colores secundarios de la luz. Por ejemplo una pantalla de un televisor de color se pinta con 700000 puntos distribuidos en grupos de tres: uno que emite luz azul, otro verde, y otro rojo. De la parte posterior del tubo de T.V. provienen 3 haces de electrones. Las variaciones de colores se logran variando las intensidades de los haces.

Un objeto se ve de un color particular por la luz del color que refleja y absorbe los demás colores, por ejemplo una camisa roja se ve de este color porque refleja la luz roja, debido a que al incidir la luz blanca sobre la camisa, los pigmentos en el tinte absorben la luz de los colores restantes que la componen. Al hacer incidir luz azul, los pigmentos en el tinte absorberán toda la luz azul y no se reflejará ninguna luz y la camisa roja con luz azul que le incide se verá negra.

### 6.- REFLEXIÓN DE LA LUZ

La mayor parte de la luz que se ve a nuestro alrededor es el resultado de la luz reflejada. La reflexión es un fenómeno que describe cómo la luz regresa a su medio original como resultado de incidir sobre una superficie. Al llegar la luz a la superficie de un cuerpo, se refleja total o parcialmente en todas direcciones. Al ser la superficie lisa, los rayos son reflejados o rechazados en una sola dirección. La superficie lisa que refleja los rayos de luz recibida es llamada espejo, por ejemplo, el agua en una alberca, espejos de cristal, etc.

El rayo de luz que llega al espejo se llama incidente y al rayo rechazado se le denomina reflejado. El rayo de luz que llega a una superficie con un ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) se refleja con un ángulo igual de reflexión ( $\theta_r$ ) a esto se le conoce como Ley de reflexión. Los ángulos de incidencia y de reflexión se miden a partir de una línea perpendicular (normal) a la superficie en el punto de incidencia. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal quedan en el mismo plano, ver fig. 36a. La ley de reflexión señala que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie irregular, ver fig.36b), el rayo de luz reflejado no queda bien definido y se dispersa la luz en todas direcciones.

Este fenómeno de la luz se llama reflexión difusa o difusión de la luz por una superficie áspera. Una superficie irregular o áspera dispersará la luz incidente, dando como resultado que se ilumine dicha superficie. Por ejemplo reflexión de la luz en la hoja de papel, el ladrillo, el mueble, es ejemplo de reflexión difusa.

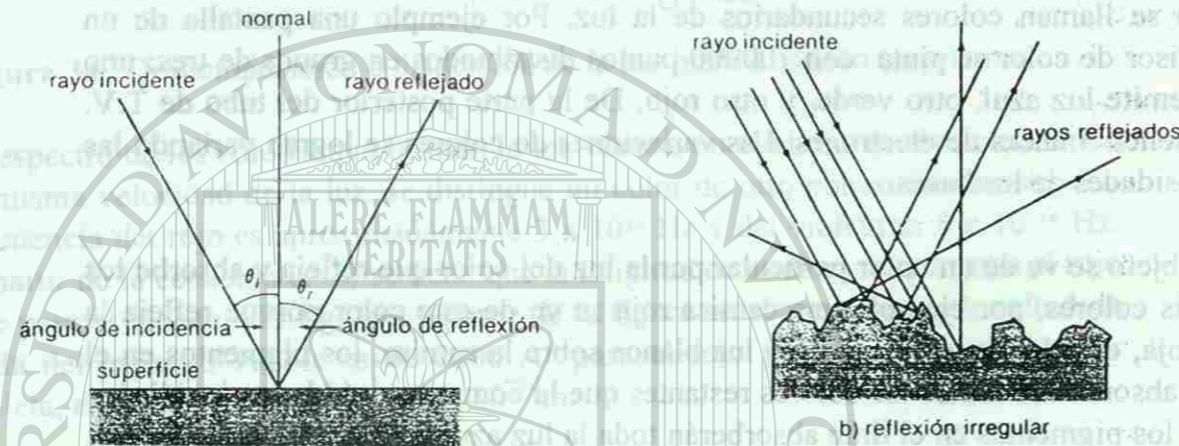


Figura 36.- a) reflexión en superficie lisa. b) Reflexión difusa en superficie irregular.

## 7.- ESPEJOS PLANOS.

Como ya se dijo, un espejo es toda superficie lisa que refleja los rayos de luz que recibe. Los tipos más comunes de espejos son los planos y esféricos.

En un espejo plano la superficie reflectora es de forma plana. En un espejo es derecho al conservar la misma posición; se forma una imagen virtual porque se ve como si estuviera dentro del espejo y es simétrica porque la imagen real y virtual están a la misma distancia del espejo, ver fig. 37.

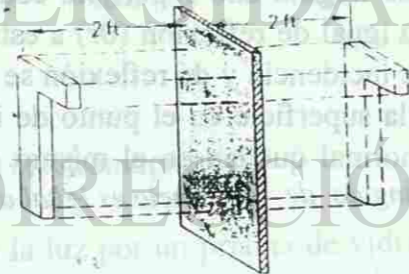


Figura 37.- En los espejos planos las imágenes están invertidas derecha-izquierda.

Para un espejo plano, la distancia del espejo al objeto es siempre de igual magnitud que la distancia a la imagen de dicho objeto. Se observa que las imágenes formadas por un espejo plano son realmente reflexiones de objetos reales. Las imágenes formadas no son reales puesto que la luz no pasa a través de ellas, es decir, una imagen real se forma por rayos de luz verdaderos que pasan por ella; se pueden proyectar en una pantalla dichas imágenes reales. Una imagen virtual es la que parece formarse por luz proveniente de la imagen, aunque en realidad los rayos de luz no pasan por ella, o sea no se pueden proyectar en una pantalla, ver fig. 38.

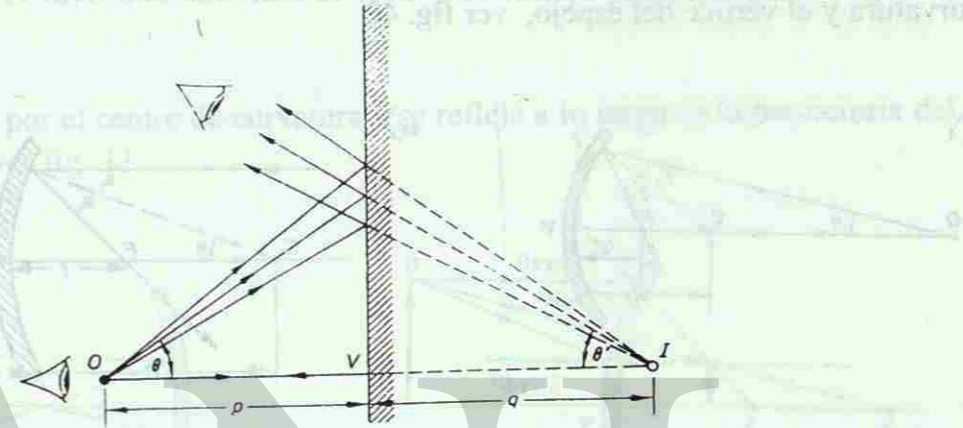


Figura 38.- Construcción de la imagen de un objeto puntual, por un espejo plano.

## 8.- ESPEJO ESFÉRICO

Un espejo esférico es aquél formado por una sección de una esfera reflejante. Un espejo cóncavo es la superficie reflejante de la parte interna de una esfera reflejante.

Un espejo convexo es la superficie reflejante de la parte externa de una esfera esférica, ver fig. 39.

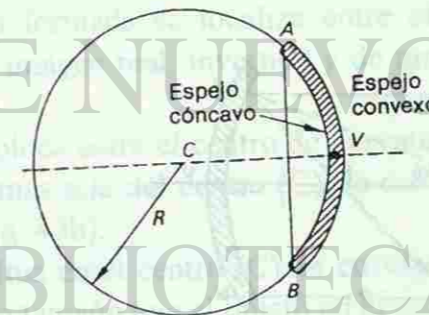
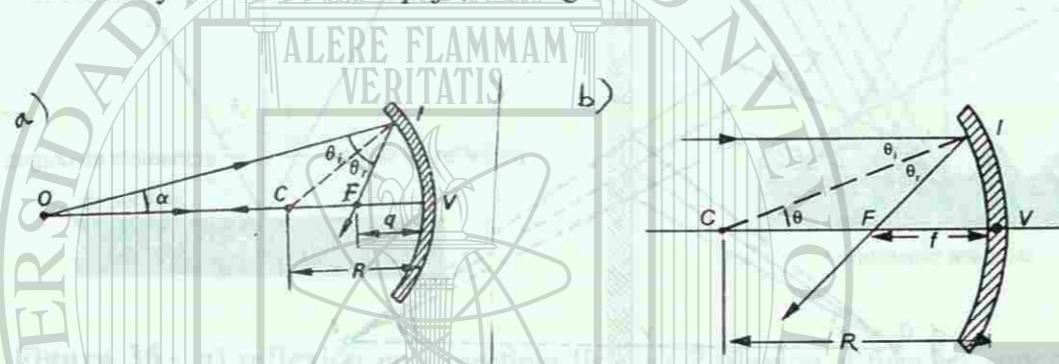


Figura 39.- Espejo esférico, el cual puede ser espejo convexo o espejo cóncavo.

En dichas figuras, el espejo esférico tiene un radio (R) de curvatura, un centro (C) de curvatura, un vértice (V) del espejo, una abertura lineal del espejo (segmento AB) y un eje del mismo que pasa por el centro de curvatura y por el vértice.

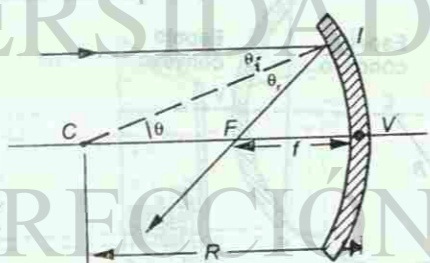
Al considerar sobre el eje de un espejo cóncavo un rayo de luz que incide en dirección del eje sobre su superficie, se reflejará sobre sí mismo; y un rayo paralelo a su eje se reflejará de tal manera que sus ángulos de incidencia y de reflexión serán iguales, y el rayo reflejado pasará por el punto medio entre el centro de curvatura y el vértice del espejo, ver fig. 40.



**Figura 40.-** Reflexión en un espejo cóncavo: a) si el rayo pasa por el centro, se reflejará sobre las misma línea b) si el rayo es paralelo al eje, se reflejará pasando por el foco.

El foco o punto focal (F) en que coinciden los rayos reflejados, es el punto medio del radio de curvatura, ver fig. 41. A partir de lo anterior, al espejo cóncavo se le llama espejo de convergencia.

$$\overline{FV} = f = \frac{R}{2}$$



**Figura 41.-** La longitud focal (f) de un espejo cóncavo es igual a la mitad de su radio (R) de curvatura.

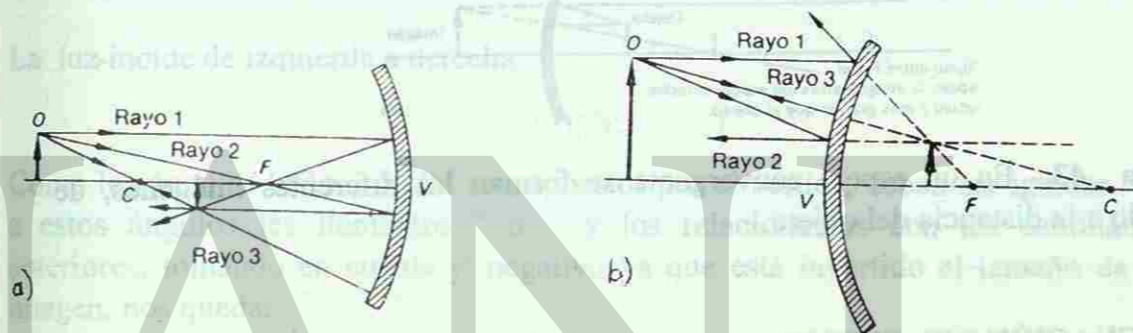
**9.- RAYOS PRINCIPALES EN ESPEJOS. OBTENCIÓN DE IMÁGENES**

Las imágenes formadas en los espejos esféricos se determinan a partir de dos o tres rayos particulares. Los rayos principales considerados son:

Rayo paralelo al eje del espejo es el rayo que se refleja y pasa por el foco de un espejo cóncavo o proviene del foco de un espejo convexo.

Rayo focal es el rayo que atraviesa el foco y se refleja paralelamente al eje del espejo.

Rayo que pasa por el centro de curvatura y se refleja a lo largo de la trayectoria del rayo original, ver fig. 42.



**Figura 42.-** Los rayos que ayudan a formar las imágenes en los espejos esféricos son: 1.rayo paralelo, 2.rayo focal, 3.rayo principal.

De acuerdo a la distancia del objeto con respecto al centro de curvatura o al foco, se producen las diferentes imágenes. Si el objeto (O) se sitúa afuera del centro de curvatura, la imagen formada se localiza entre el foco (F) y el centro (C) de curvatura y será una imagen real, invertida y de menor tamaño que el objeto, ver fig. 43 a).

Si el objeto (O) se coloca entre el centro de curvatura (C) y el foco (F), la imagen formada se localiza más allá del centro (C) de curvatura y es real, invertida y de mayor tamaño, ver fig. 43b).

Si el objeto (O) se sitúa en el centro (C) de curvatura, la imagen formada es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto en el centro de curvatura, ver fig. 43c).

Si el objeto (O) se coloca en el foco (F), no se formará imagen, ver fig. 43).

Si el objeto (O) se coloca entre el foco y el vértice (V), la imagen aparece detrás del espejo, la imagen formada es virtual, derecha y de mayor tamaño, ver fig. 43 d)

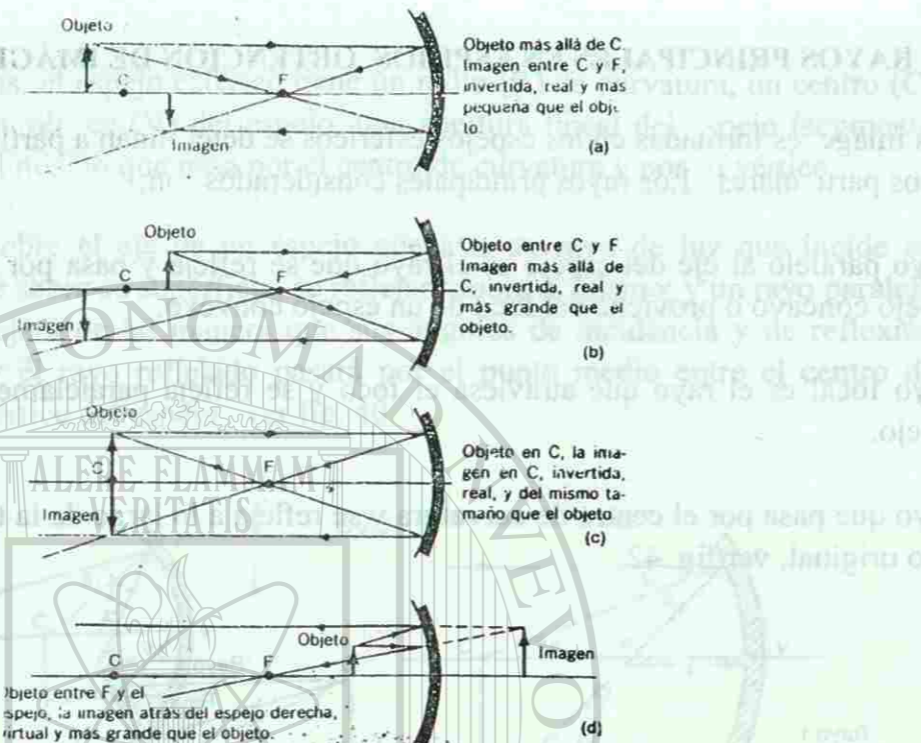


Figura 43.- En un espejo convergente se forman las diferentes imágenes, de acuerdo a la distancia del objeto.

10.- ECUACIÓN DEL ESPEJO

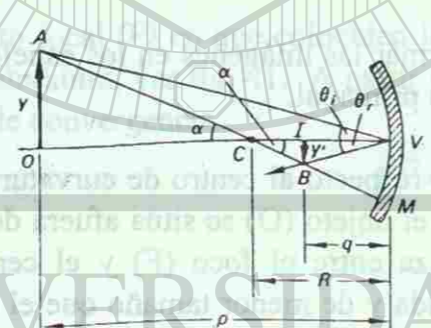


Figura 44.- Deducción de la ecuación del espejo.

A partir de la figura 44, se tiene que p es la distancia del espejo al objeto, e igual al segmento OV.

q es la distancia del espejo a la imagen formada e igual al segmento IV.

R es el radio de curvatura e igual al segmento CV.

y es el tamaño del objeto e igual al segmento OA  
y es el tamaño de la imagen e igual al segmento IB.

en donde la convención de signos es

- 1) La distancia al objeto (p) es positiva para objetos reales y negativa para objetos virtuales.
- 2) La distancia a la imagen (q) es positiva para imágenes reales y negativa para imágenes virtuales.
- 3) El radio de curvatura (R) y la longitud focal (f) son positivos para espejos convergentes (cóncavos) y negativos para espejos divergentes (convexos).

La luz incide de izquierda a derecha.

Como los ángulos OCA y VCM son opuestos por el vértice, deben ser iguales. Si a estos ángulos los llamamos "α" y los relacionamos con las cantidades anteriores, tomando en cuenta y' negativo ya que está invertido el tamaño de la imagen, nos queda:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{y}{p-R} = \frac{-y'}{R-q}$$

por lo cual

$$\frac{-y'}{y} = \frac{R-q}{p-R} \quad \text{ecuación (1)}$$

Como los ángulos de incidencia (θi) y de reflexión (θr) son iguales, sus tangentes también lo son, es decir

$$\text{Tan } \theta_i = \text{Tan } \theta_r$$

sustituyendo  $\frac{y}{p} = \frac{-y'}{q}$

o también  $\frac{-y'}{y} = \frac{q}{p} \quad \text{ecuación (2)}$

igualando las ecuaciones (1) y (2), resulta

$$\frac{q}{p} = \frac{R-q}{p-R}$$

reordenando términos

$$q(p-R) = p(R-q)$$

$$qp - Rq = pR - pq$$

$$qp + pq = pR + Rq$$

$$2pq = R(p + q)$$

$$\frac{2}{R} = \frac{p+q}{pq}$$

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{q} + \frac{1}{p}$$

Ecuación del espejo

Si el foco está a la mitad del radio de curvatura, entonces,  $f = R/2$ , y al sustituir en la ecuación del espejo queda:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

al despejar cada variable ( $p$ ,  $q$  y  $f$ ), se tienen las fórmulas siguientes:

$$p = \frac{qf}{q-f} \quad q = \frac{pf}{p-f} \quad f = \frac{pq}{p+q}$$

Veamos los siguientes ejemplos

**Ejemplo 10.-** Encontrar la longitud focal de un espejo convergente, cuyo radio de curvatura es de 20 cm.

$$R = +20 \text{ cm} \quad \text{Como } f = \frac{R}{2}$$

$$\text{sustituyendo } f = \frac{+20\text{cm}}{2}$$

$$f = +10\text{cm}$$

**Ejemplo 11.-** Calcular el tipo de imagen formada y su colocación con respecto a un espejo cóncavo, si el foco está a 15 cm y el objeto se coloca a 20 cm del vértice de dicho espejo.

$$f = +15 \text{ cm} \quad \text{Como } q = \frac{pf}{p-f}$$

$$p = +20 \text{ cm} \quad q = \frac{pf}{p-f}$$

$$\text{sustituyendo } q = \frac{(20\text{cm})(15\text{cm})}{(20\text{cm}) - (15\text{cm})} = +60\text{cm}$$

Ya que  $q$  es positiva, entonces, la imagen es real y se encuentra a 60cm del espejo y al trazar los rayos, la imagen será invertida.

**Ejemplo 12.-** Encontrar la posición de la imagen, si el objeto se localiza a 4cm de un espejo convexo, cuya longitud focal es 6cm.

$$p = 4\text{cm} \quad \text{Como } q = \frac{pf}{p-f}$$

$$f = -6\text{cm} \quad q = \frac{pf}{p-f}$$

$$\text{sustituyendo } q = \frac{(4\text{cm})(-6\text{cm})}{4\text{cm} - (-6\text{cm})}$$

$$q = \frac{-24\text{cm}^2}{10\text{cm}}$$

$$q = -2.4\text{cm}$$

por el signo negativo de  $q$ , la imagen es negativa, o sea virtual.

El aumento o la amplificación lateral ( $M$ ) del espejo es la razón del tamaño de la imagen al tamaño del objeto.

$$\text{Aumento (M)} = \frac{\text{tamaño de la imagen (y')}}{\text{tamaño del objeto (y)}}$$

$$\text{o sea } M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

siendo el aumento negativo, si la imagen es invertida con respecto al objeto y positiva si la imagen es derecha.

**Ejemplo 13.-** Un objeto de 6 cm se encuentra a 50 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 20 cm. Encontrar la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$y = 6 \text{ cm} \quad \text{Como } q = \frac{pf}{p-f}$$

$$p = 50 \text{ cm} \quad \text{sustituyendo } q = \frac{(50\text{cm})(20\text{cm})}{50\text{cm} - 20\text{cm}}$$

$$f = 20 \text{ cm} \quad q = +33.3\text{cm}$$

ya que  $q$  es positiva, la imagen es real

$$\text{como } M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

$$\text{despejando } y' = \frac{-qy}{p}$$

$$\text{sustituyendo } y' = \frac{(33.3\text{cm})(6\text{cm})}{50\text{cm}}$$

$$y' = -4\text{cm}$$

ya que  $y'$  es negativa, la imagen está invertida

$$M = \frac{33.3\text{cm}}{50\text{cm}} = \frac{-4\text{cm}}{6\text{cm}} = \frac{-2}{3}$$

### 11.- REFRACCIÓN DE LA LUZ.

La luz viaja a diferente velocidad en diferentes medios, si la luz **incide en una superficie de separación entre dos medios de diferente densidad, los rayos luminosos se desvían. Los rayos que llegan a la superficie son llamados incidentes y a los rayos que se desvían al pasar la superficie se les llama refractados, ver fig. 45.** Si los rayos inciden perpendicularmente a la superficie de separación, no se refractan.

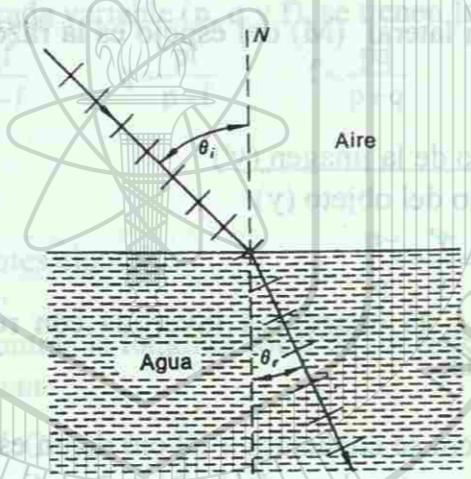


Figura 45.- La luz se refracta hacia la normal cuando entra a un medio más denso.

El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran siempre en el mismo plano. La trayectoria de un rayo refractado en la superficie de separación de dos medios es exactamente reversible, ver fig. 46.

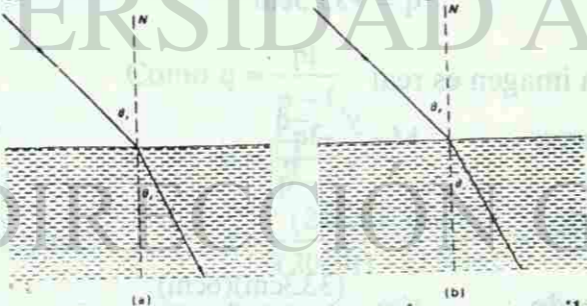


Figura 46.- La trayectoria de un rayo refractado es reversible

Para cada par de medios transparentes, la razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, tiene un valor constante que recibe el nombre de índice de refracción ( $n$ ), es decir

$$n = \frac{\text{Sen}\theta_i}{\text{Sen}\theta_r}$$

Fue descubierta por Willebrord Snell (1591-1626) y se llama en su honor Ley de Snell. Descubrió que el índice de refracción se calcula por el cociente de las velocidades del primero y segundo medios, es decir

$$n = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

donde  $v_1$  es la velocidad del primer medio en km/s  
 $v_2$  es la velocidad del segundo medio en km/s.

La razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en un medio particular, recibe el nombre de índice de refracción del medio.

Una manera opcional de expresar esta ley es a partir de los índices de refracción de los medios siendo

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

en donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío despejando  $v_1$  y  $v_2$  en las anteriores expresiones, tenemos

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

al sustituir  $v_1$  y  $v_2$  en la ecuación

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

nos queda

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

entonces

$$n_1 \text{ Sen}\theta_1 = n_2 \text{ Sen}\theta_2$$

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 14.-** Si el índice de refracción del medio del agua es  $n_{H_2O} = 1.33$ . Calcular la velocidad de la luz en el agua.

$$n_{H_2O} = 1.33 \quad \text{Como } n = \frac{c}{v_{H_2O}}$$

despejando  $v_{H_2O} = \frac{c}{n_{H_2O}}$

sustituyendo  $v_{H_2O} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.33}$

$$v_{H_2O} = 2.66 \times 10^8 \text{ m/s}$$

**Ejemplo 15.-** Un haz de luz incide en el agua de un recipiente formando un ángulo incidente de  $30^\circ$  con respecto a la normal. Calcular el ángulo de refracción en el agua, si  $n_{H_2O} = 1.33$

$$n_{H_2O} = 1.33 \quad \text{como } n_{H_2O} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r}$$

despejando  $\text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } \theta_i}{n_{H_2O}}$

sustituyendo  $\text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } 30^\circ}{1.33}$

$$\text{sen } \theta_r = \frac{0.500}{1.33}$$

$$\text{sen } \theta_r = 0.375$$

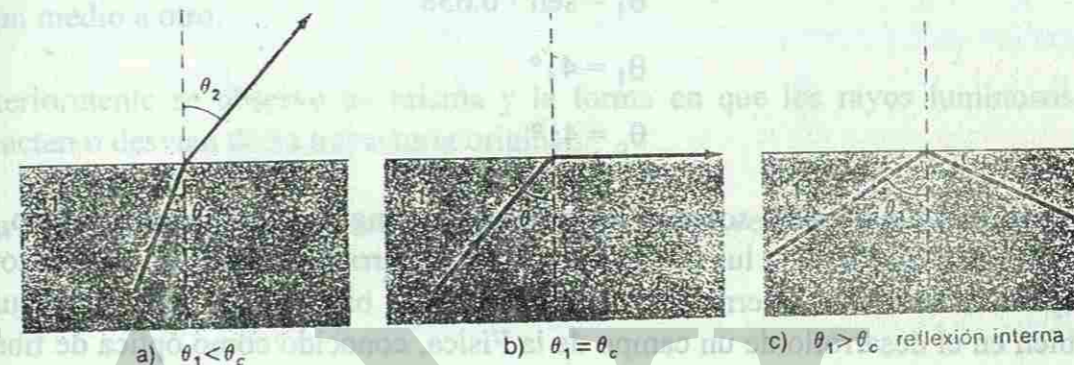
$$\theta_r = \text{sen}^{-1} 0.375$$

$$\theta_r = 22^\circ$$

La refracción la observamos por ejemplo cuando introducimos un lápiz en un vaso transparente con agua, nos da la idea de que el lápiz está cortado o quebrado a partir de la superficie del líquido. Otro ejemplo del efecto de la refracción lo notamos en el espejismo en la carretera en un día demasiado caluroso, dando la idea de que el pavimento está mojado, lo que sucede en realidad es que la capa de aire cercana al pavimento se calienta más y la capa de aire superior o ambiente está menos caliente, por lo que se forman dos capas de aire de diferente densidad, produciendo que la luz se refracte o se desvíen las ondas luminosas al pasar de una capa a otra.

**12.- REFLEXIÓN INTERNA TOTAL.**

Cuando un rayo de luz pasa desde un medio ópticamente denso hacia un medio menos denso, se refracta alejándose de la normal. En otras palabras, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Si el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande, el de refracción puede alcanzar los  $90^\circ$  y el rayo refractado desaparecerá. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total, ver fig. 47



**Figura 47.-** a) El rayo se refracta al pasar desde un medio denso hacia uno menos denso. b) El rayo se refracta a lo largo del límite entre los dos medios, para un ángulo de incidencia igual al ángulo crítico. c) Para un ángulo de incidencia mayor que el crítico, el rayo sufre una reflexión interna total.

El rayo incide a un ángulo tan grande ( $i_c$ ) que el rayo refractado queda a lo largo de la superficie del agua. El ángulo de refracción es de  $90^\circ$ . Si se aplica la ley de Snell en esta situación, se obtiene

$$(n_{H_2O}) (\text{sen } \theta_1) = (n_{\text{aire}}) \text{sen } \theta_2$$

$$(1.33) (\text{sen } \theta_1) = (1.00) \text{sen } 90^\circ$$

despejando  $\text{sen } \theta_1$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{(1.00) \text{sen } 90^\circ}{1.33}$$

$$\text{sen } \theta_1 = 0.75$$

$$\theta_1 = 48.6^\circ$$

en este caso  $\theta_1 = \theta_c$

El ángulo de incidencia al cual ocurre la reflexión interna total es característico de cada sustancia y se conoce como el ángulo crítico ( $\theta_c$ ) de la sustancia.



**Ejemplo 16.-** Calcula el ángulo crítico del vidrio si  $n = 1.52$  del vidrio y  $n = 1.00$  del aire.

$n = 1.52$  (vidrio) Como  $\theta_1 = \theta_c$

$n = 1.00$  (aire)  $n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$   
 $\text{sen } \theta_1 = \frac{n_2 \text{ sen } \theta_2}{n_1}$

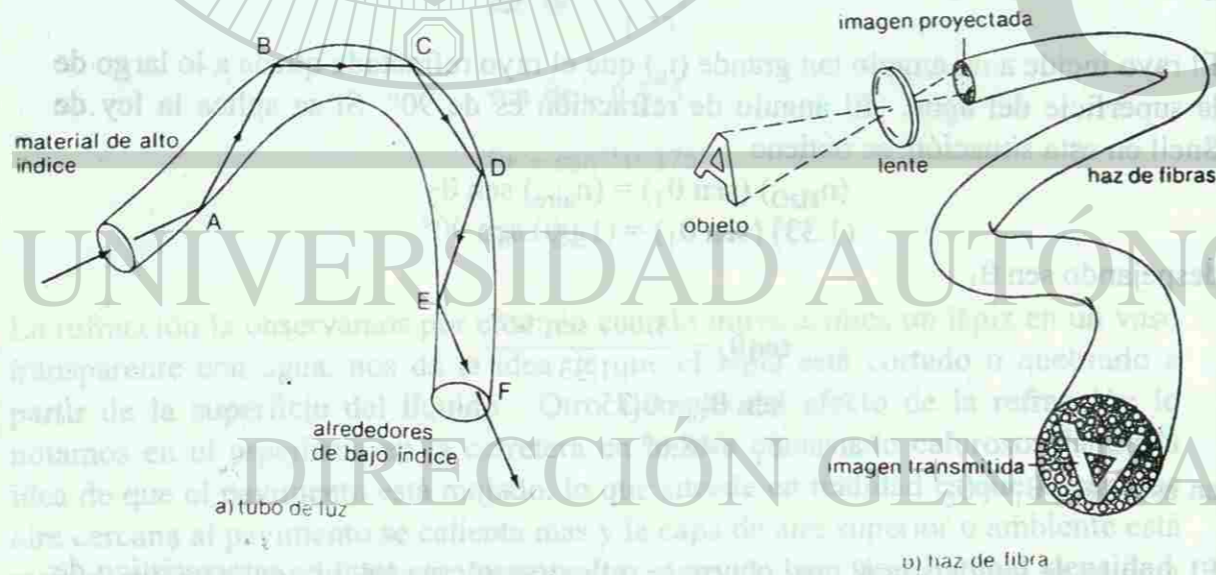
sustituyendo  $\text{sen } \theta_1 = \frac{1.00 (\text{sen } 90^\circ)}{1.52}$

$\theta_1 = \text{sen}^{-1} 0.658$

$\theta_1 = 41^\circ$

$\theta_c = 41^\circ$

Cualquier rayo que incida sobre la superficie, a un ángulo mayor que el crítico, no podrá refractarse. Toda la luz se reflejará. Habrá ocurrido la reflexión interna total. Se aplica la reflexión interna total en el diseño de binoculares y ha contribuido también en el desarrollo de un campo de la Física, conocido como óptica de fibras. Las fibras ópticas son un ejemplo de una aplicación práctica de la reflexión interna total, ver fig. 48, se usan en medicina en el fibroscopio, permitiendo visualizar las porciones del cuerpo humano, como el estómago, las válvulas del corazón; se utilizan también en las comunicaciones telefónicas mediante señales luminosas.



**Figura 48.-** Fibras ópticas.

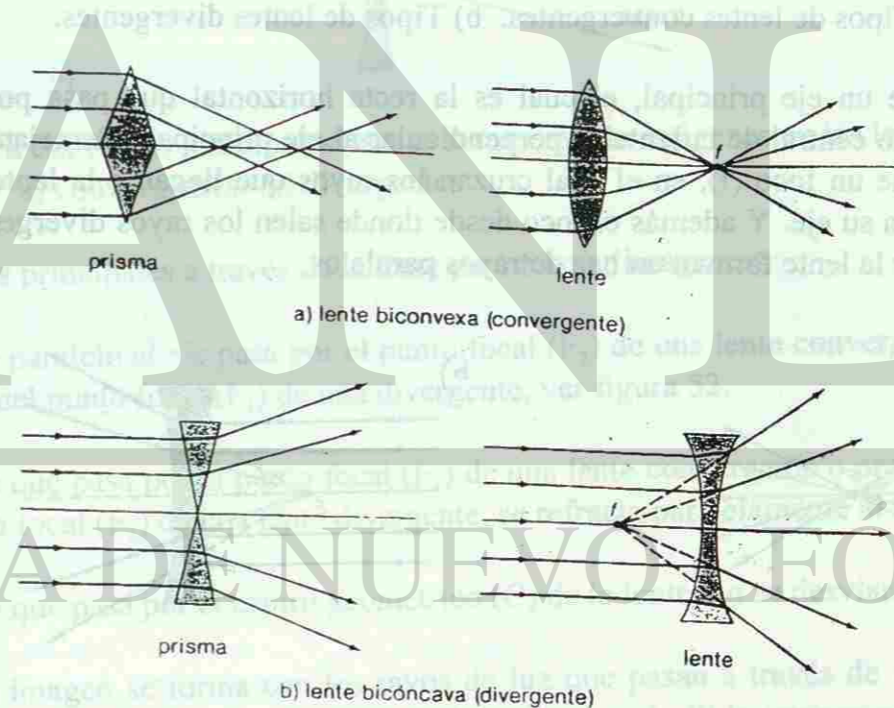
**3.- Lentes**

Las lentes son cuerpos transparentes que se pueden construir de vidrio cristalino o de plástico transparente y están limitados por dos superficies, una esférica y una plana o por dos esféricas. Su uso es esencial en la construcción de telescopios, microscopios, cámaras fotográficas y otros instrumentos ópticos.

Las lentes refractan la luz, al alterar la forma de un frente de ondas cuando pasen de un medio a otro.

Anteriormente se observó un prisma y la forma en que los rayos luminosos se refractan o desvían de su trayectoria original.

Una lente puede concebirse como un juego de prismas, ver fig. 49.



**Figura 49.-** a) Si se colocan dos prismas de manera que coincidan base con base, esto hace la función aproximada de una lente biconvexa (convergente) y los rayos luminosos convergen en el foco (F). b) Si se colocan dos prismas vértice con vértice, esto hace la función aproximadamente de una lente bicóncava (divergente), y los rayos luminosos divergen.

Los dos tipos principales de lentes son los convergentes y los divergentes. Una lente convergente es aquella que refracta y converge la luz paralela en un punto focal ( $F$ ) más allá de la lente; regularmente son lentes cuyo espesor es mayor en el centro y disminuye en sus extremos, ver fig. 50 a). Se usan para amplificar la imagen, por ejemplo en las cámaras fotográficas, microscopios, etc.

Una lente divergente es aquella que refracta y diverge luz paralela de un punto focal ( $F$ ) localizado enfrente de la lente; regularmente son lentes que tienen menor espesor en su centro que en sus extremos, ver fig. 50b). Este tipo de lentes por ejemplo, los usan las personas que padecen miopía.

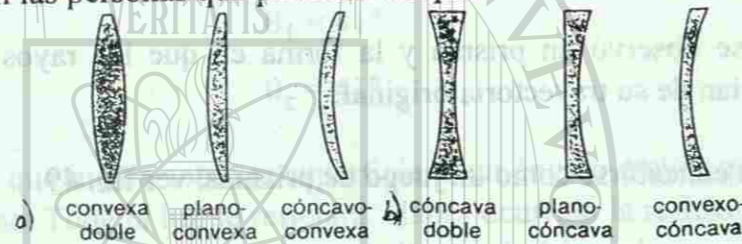


Figura 50. a) Tipos de lentes convergentes. b) Tipos de lentes divergentes.

Una lente tiene un eje principal, el cual es la recta horizontal que pasa por el centro. El plano central de la lente es perpendicular al eje principal. Semejante a los espejos tiene un foco ( $f$ ), en el cual cruzan los rayos que llegan a la lente en forma paralela a su eje. Y además el foco desde donde salen los rayos divergentes que al atravesar la lente forman un haz de rayos paralelos.

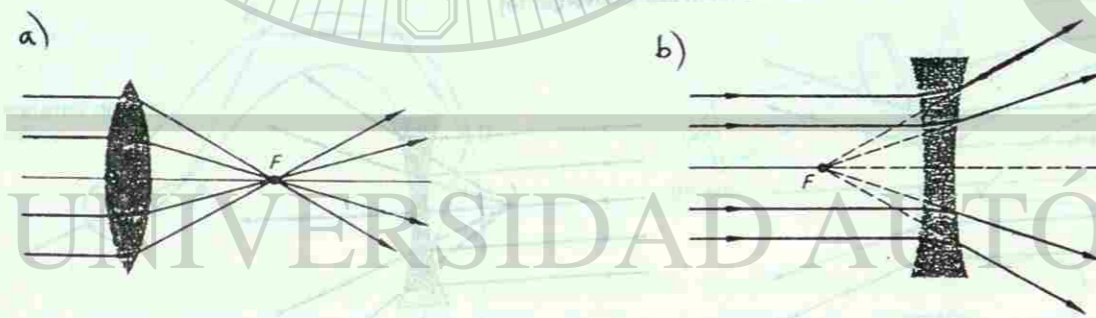


Figura 51.- Los rayos llegan a la lente en forma paralela a su eje. a) Lentes convergentes. b) Lentes divergentes.

La distancia focal ( $f$ ) de una lente convergente depende de dos factores: la forma de la lente y el índice de refracción del material del que está construida la lente y del índice de refracción del medio que rodea a la lente.

14.- RAYOS PRINCIPALES EN LENTES. OBTENCIÓN DE IMÁGENES.

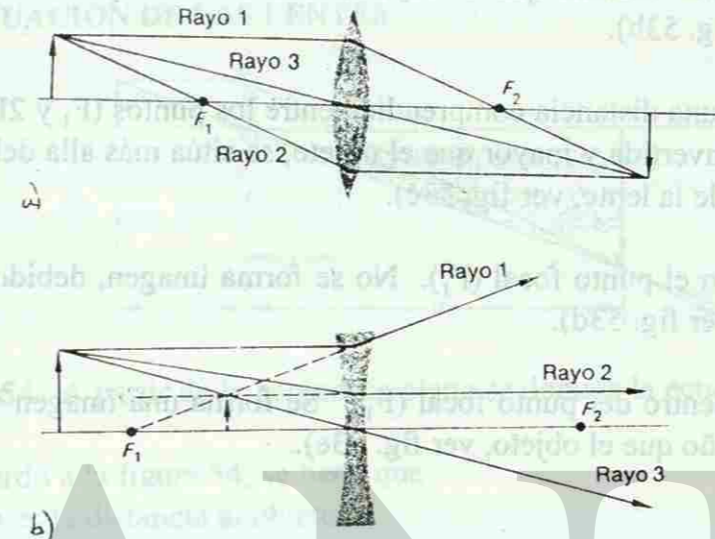


Figura 52. Rayos principales para la formación de imágenes en las lentes: a) convergentes b) divergentes.

Rayos principales a través de la lente para formar imágenes:

Rayo paralelo al eje pasa por el punto focal ( $F_2$ ) de una lente convergente o parece salir del punto focal ( $F_1$ ) de una divergente, ver figura 52.

Rayo que pasa por el punto focal ( $F_1$ ) de una lente convergente o prosigue hacia el punto focal ( $F_2$ ) de una lente divergente, se refracta paralelamente al eje de la lente.

Rayo que pasa por el centro geométrico ( $C$ ) de la lente, no se desviará.

Si la imagen se forma con los rayos de luz que pasan a través de ella y del otro lado de la lente opuesta al objeto, la imagen es real. Si la imagen parece estar del mismo lado de la lente que el objeto, la imagen es virtual.

De acuerdo a la distancia del objeto ( $O$ ) con respecto al punto focal ( $F$ ).

Si el objeto (O) se localiza a una distancia más allá del punto ( $2F_1$ ). Se forma una imagen (I) real, invertida y menor, entre  $F_1$  y  $2F_2$ , sobre el lado opuesto de la lente, ver fig. 53a).

Si el objeto se localiza a una distancia igual al punto ( $2F_1$ ). Se forma una imagen real, invertida, del mismo tamaño que el objeto, se sitúa en  $2F_2$  sobre el lado opuesto de la lente, ver fig. 53b).

Si el objeto se localiza a una distancia comprendida entre los puntos ( $F_1$  y  $2F_1$ ). Se forma una imagen real, invertida y mayor que el objeto, se sitúa más allá del punto ( $2F_2$ ) en el lado opuesto de la lente, ver fig. 53c).

Si el objeto se localiza en el punto focal ( $F_1$ ). No se forma imagen, debido a que los rayos son paralelos, ver fig. 53d).

Si el objeto se localiza dentro del punto focal ( $F_1$ ). Se forma una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto, ver fig. 53e).

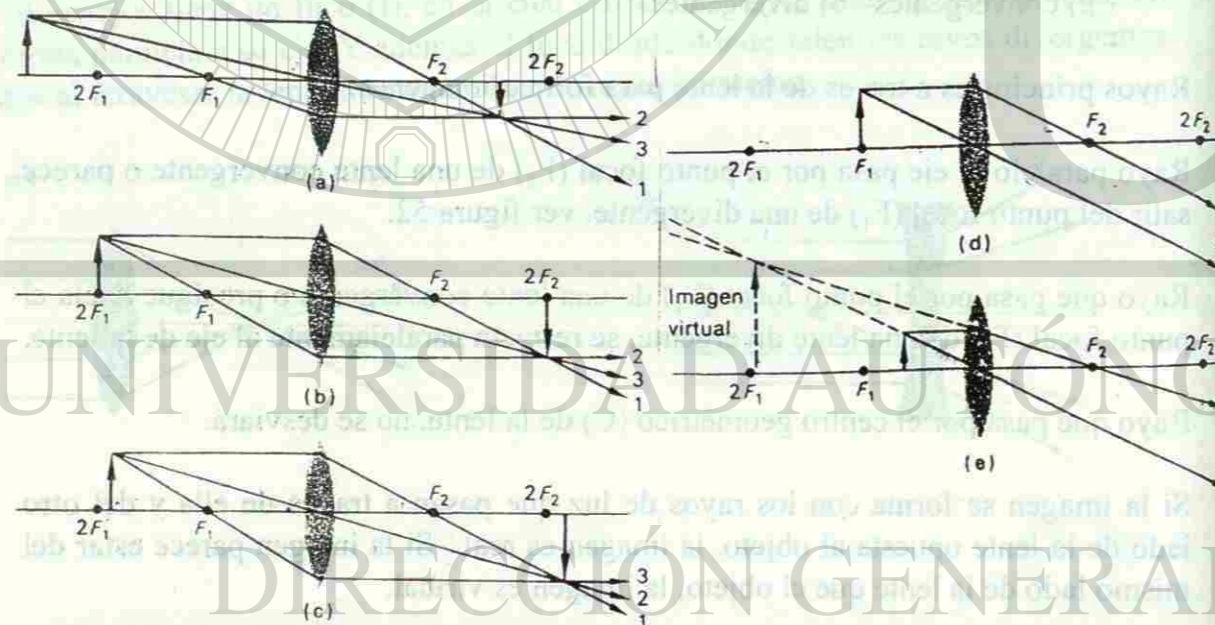


FIGURA 53. Construcción de imágenes de acuerdo a donde se localice el objeto con respecto al punto focal.

Se puede observar que las imágenes formadas por los espejos cóncavos son similares a las formadas por las lentes convergentes (convexas) de la misma manera, las lentes cóncavas y los espejos convexos.

15.- ECUACIÓN DE LAS LENTES

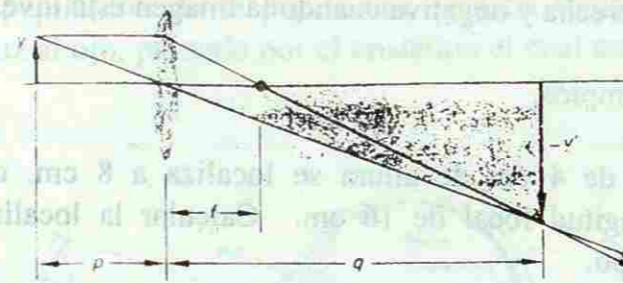


Figura 54. A partir de la geometría plana se deduce la ecuación de las lentes.

De acuerdo a la figura 54, se tiene que

- p es la distancia al objeto
- q es la distancia de la imagen
- f es la longitud focal de la lente
- y es el tamaño del objeto
- y' es el tamaño de la imagen.

En donde la convención de signos es

- 1) Las distancias p y q se consideran positivas para objetos e imágenes reales y negativas para objetos e imágenes virtuales.
- 2) La longitud focal (f) se considera positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.

De tal manera que la ecuación de las lentes es

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

despejando cada variable, nos queda

$$p = \frac{fq}{q - f} \quad q = \frac{fp}{p - f} \quad f = \frac{qp}{p + q}$$

El aumento lateral ( $M$ ) es la razón del tamaño de la imagen ( $y'$ ) al tamaño del objeto ( $y$ ), o sea

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

quedando de manera similar que para los espejos. Una ampliación lateral positiva indica que la imagen es derecha y negativa cuando la imagen está invertida.

Veamos los siguientes ejemplos.

**Ejemplo 17.** Un objeto de 4 cm de altura se localiza a 8 cm. de una lente convergente con una longitud focal de 16 cm. Calcular la localización de la imagen, su tamaño y su tipo.

Como

$$q = \frac{pf}{p-f}$$

sustituyendo

$$q = \frac{(8 \text{ cm})(16 \text{ cm})}{(8 \text{ cm} - 16 \text{ cm})}$$

$$q = -16 \text{ cm.}$$

El signo negativo indica que la imagen es virtual.

Para calcular el tamaño de la imagen, tenemos que

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

despejando

$$y' = -\frac{qy}{p}$$

sustituyendo

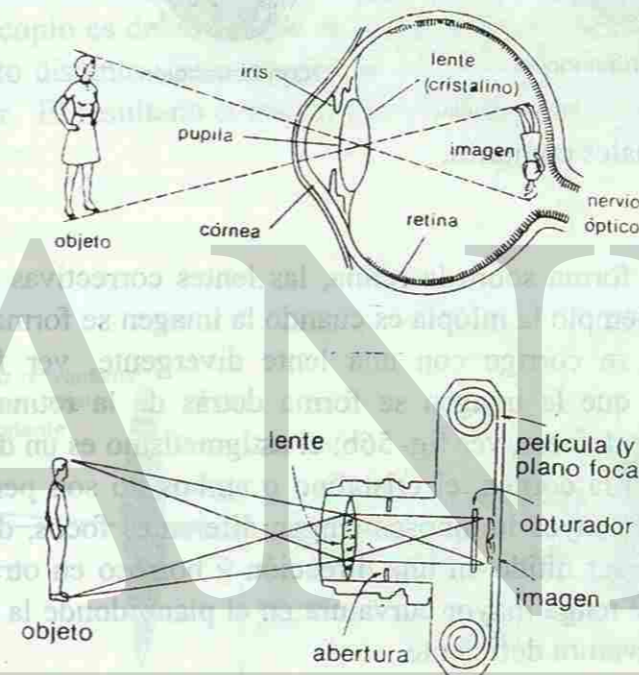
$$y' = -\frac{(-16 \text{ cm})(4 \text{ cm})}{8 \text{ cm}}$$

$$y' = +8 \text{ cm.}$$

El signo positivo indica que la imagen es derecha.

## 16.- DISPOSITIVOS ÓPTICOS

**El ojo humano.** Un instrumento óptico excelente es el ojo, el cual es un globo ocular casi esférico cubierto por una membrana externa de color blanco llamada esclerótica. La luz llega al ojo a través de un tejido transparente llamado córnea. Detrás de la córnea se encuentra el iris, músculo con forma de anillo que cambia el tamaño de la pupila, siendo la pupila una ventana transparente que permite la entrada de la luz al ojo, pasando por el cristalino el cual actúa como una lente, ver fig. 55.



**Figura 55.** El funcionamiento de una cámara simple es similar al ojo.

El funcionamiento del ojo es similar en varios aspectos al de una cámara simple. Ambos poseen una lente, en el ojo la lente es el cristalino, el cual tiene la capacidad de cambiar de forma de curvatura (acomodación) para enfocar las imágenes de objetos a diferentes distancias del ojo. La imagen se forma en la retina, la cual actúa como pantalla, es una imagen real disminuida e invertida; la pupila se comporta como un diafragma, se envía la impresión por el nervio óptico al cerebro produciendo la sensación de visión, ver fig. 55.

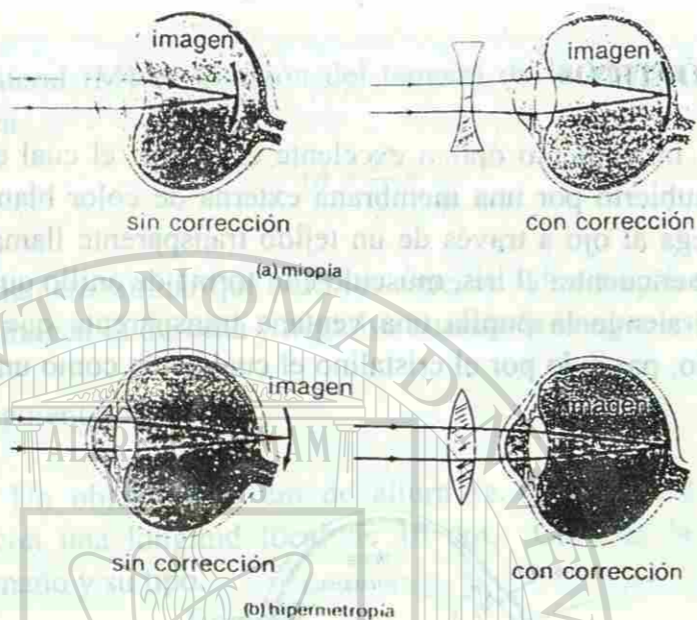


Figura 56. Defectos visuales comunes.

Cuando la imagen no se forma sobre la retina, las lentes correctivas sirven para enfocar los objetos, por ejemplo la miopía es cuando la imagen se forma delante de la retina y este defecto se corrige con una lente divergente, ver fig. 56a; la hipermetropía se debe a que la imagen se forma detrás de la retina, una lente convergente corregirá este defecto, ver fig. 56b; el astigmatismo es un defecto común que ocurre cuando la córnea, el cristalino o ambos no son perfectamente esféricos, haciendo que los rayos luminosos tengan diferentes focos, de tal forma que el objeto visto puede ser nítido en una dirección y borroso en otra, se puede corregir con una lente que tenga mayor curvatura en el plano donde la córnea o el cristalino muestre una curvatura deficiente.

**Microscopio.** El microscopio se basa en dos lentes convergentes. El objeto se coloca muy cerca de la lente inferior (lente objetivo), esta lente forma una imagen real, la cual queda colocada entre la segunda lente (lente ocular) y su punto focal, produciendo una imagen virtual muy aumentada en comparación con la imagen real, ver figura 57.

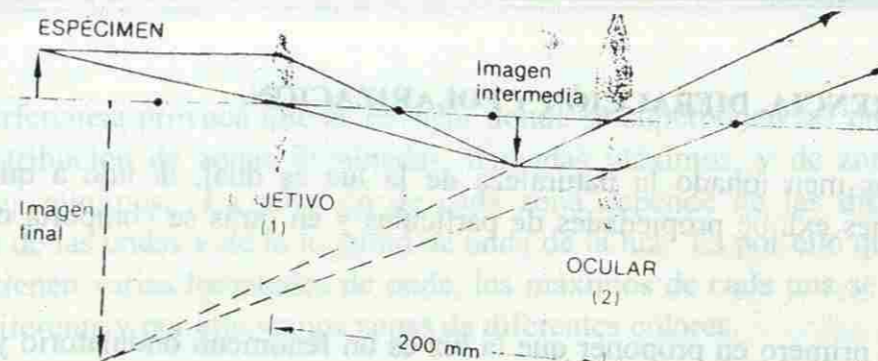


Figura 57. Microscopio. Manera en que se forma la imagen real por el lente objetivo y la imagen virtual que se forma a partir del lente ocular.

El telescopio también usa dos lentes convergentes. La lente objetivo tiene una distancia focal mucho mayor que la del microscopio. La formación de imágenes de un telescopio es debido a que la lente objetivo forma la imagen real e invertida de un objeto distante. Esta imagen se localiza entre el punto focal del ocular y la lente ocular. El resultado es una imagen virtual, aumentada e invertida, ver fig. 58.

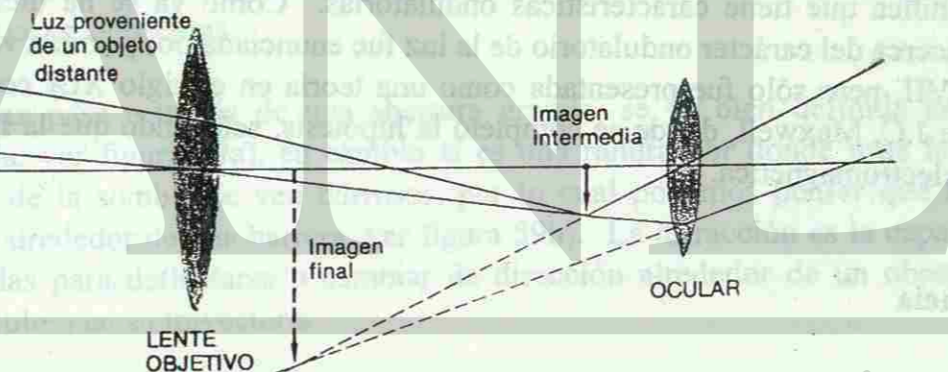


Figura 58. Sistema de lentes de un telescopio.

## 17.- INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN Y POLARIZACIÓN.

Como habíamos mencionado la naturaleza de la luz es dual, debido a que en algunas ocasiones exhibe propiedades de partículas y en otras se comporta como onda.

Huygens fue el primero en proponer que la luz es un fenómeno ondulatorio y por ende, se propaga como un frente de onda, en el cual, cada punto de una onda debe considerarse como una nueva fuente puntual de ondas. Comprobó que la luz tiene naturaleza ondulatoria mediante los fenómenos de interferencia y difracción. Posteriormente, en 1809, E. L. Malus (1775-1812), por primera vez detectó el fenómeno de polarización en la luz reflejada, lo cual apoyó la teoría ondulatoria y comprobó con ello que la luz es una onda transversal, contrario a lo supuesto hasta entonces.

Ahora estudiaremos los fenómenos en los cuales la luz se comporta como una onda. Estos son los fenómenos de interferencia, difracción y polarización.

El hecho, demostrado experimentalmente, de que la luz presenta fenómenos de este tipo indica que tiene características ondulatorias. Como ya se ha dicho la hipótesis acerca del carácter ondulatorio de la luz fue enunciada por primera vez en el siglo XVII, pero sólo fue presentada como una teoría en el siglo XIX con los trabajos de J.C. Maxwell, donde se completó la hipótesis, señalando que la luz es una onda electromagnética.

### Interferencia

Ya se ha señalado que la interferencia es un fenómeno ondulatorio, que consiste en la superposición de ondas de iguales características: frecuencia, longitud de onda y fase. En el caso de la luz estas ondas son llamadas ondas coherentes, de manera que la interferencia de la luz en ocasiones se define como la superposición de ondas coherentes.

Todos hemos tenido la oportunidad de observar la interferencia de la luz, que es el fenómeno que provoca la coloración de las películas (capas delgadas) de aceite en el piso o la coloración en las alas de algunos insectos.

La interferencia provoca que en el lugar donde se superponen las ondas aparezca una distribución de zonas iluminadas, llamadas máximos, y de zonas oscuras, llamadas mínimos. La posición de cada zona depende de las distancias a las fuentes de las ondas y de la longitud de onda de la luz. Es por ello que cuando las ondas tienen varias longitudes de onda, los máximos de cada una se sitúan en un lugar diferente y por ello vemos zonas de diferentes colores.

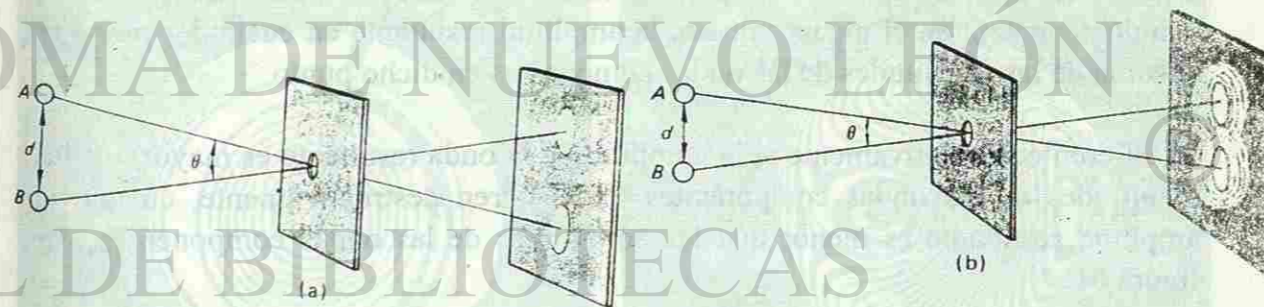
La interferencia tiene gran aplicación práctica. Por ejemplo, si se observa la lente de una cámara fotográfica de buena calidad se verá que tiene una coloración violeta. Esto se debe a que tiene una cubierta, para evitar la reflexión, con ayuda del fenómeno de interferencia.

Se utiliza la interferencia para medir distancias en forma muy exacta, con ayuda de equipos llamados interferómetros.

### Difracción

El otro fenómeno ondulatorio que vamos a estudiar es la difracción de la luz. Como ya se ha dicho la difracción consiste en la desviación de la propagación rectilínea de la luz en las cercanías de un objeto opaco, provocando la aparición de zonas claras y oscuras.

Si la luz pasa a través de una abertura grande, se ve bien definida la sombra formada, ver figura 59a), en cambio si es una ranura por donde pasa la luz, los bordes de la sombra se ven borrosos, por lo cual podemos pensar que la luz se desvía alrededor de una barrera, ver figura 59b). La difracción es la capacidad de las ondas para deflectarse o cambiar de dirección alrededor de un objeto opaco (obstáculos) en su trayectoria.



**Figura 59.** Difracción. a) Mínima (tiene sus fronteras de sombra y luz bien definidas). b) Pronunciada (no tiene bordes delimitados, la zona brillante o de luz se desvanece hacia la oscuridad).

La difracción no es exclusiva de las ranuras angostas o de las aberturas en general, se observa en todas las sombras. La difracción de la luz siempre ocurre, pero su observación no siempre es posible, ya que para que el efecto se observe bien las dimensiones del objeto deben ser del orden de la longitud de onda de la luz, y sabemos que ésta es muy pequeña.

La primera observación sobre la difracción de la luz la realizó Thomas Young en 1801, ver fig. 60.

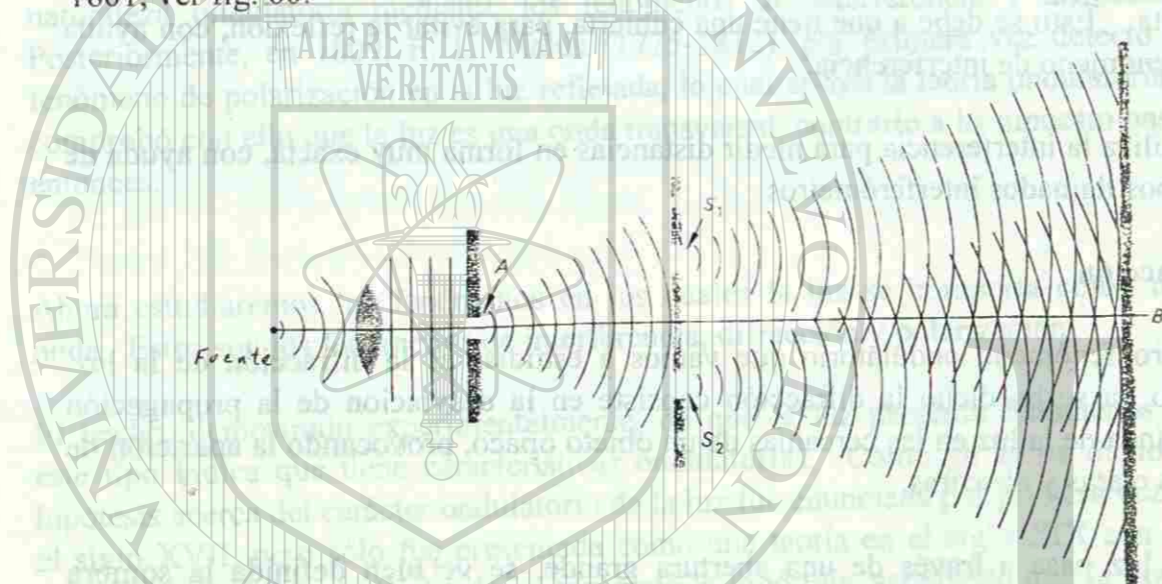


Figura 60. Experimento de Thomas Young.

Observó que la pantalla se iluminó con bandas o franjas brillantes y oscuras alternadas, este fenómeno se debe al comportamiento ondulatorio de la luz. Su origen es el principio de superposición: Si dos o más ondas existen simultáneamente en el mismo medio, la amplitud resultante en cualquier punto es la suma de las amplitudes de las ondas compuestas en dicho punto.

Interfieren constructivamente si la amplitud de la onda resultante es mayor que las amplitudes de las ondas componentes. Interfieren destructivamente, cuando la amplitud resultante es menor que las amplitudes de las ondas componentes, ver figura 61.

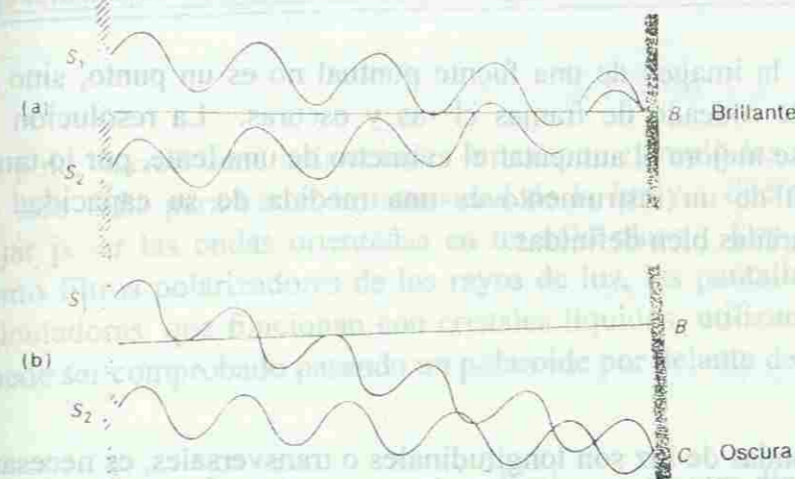


Figura 61. Interferencia a) constructiva b) destructiva

La difracción es muy importante en ampliaciones posibles de un instrumento óptico, ya que establece el límite final. Además, en todo instrumento óptico existe interacción de la luz con objetos opacos, como son diafragmas, monturas de lentes, rendijas, etc. Es por ello que para el diseño correcto de cualquier equipo óptico deben tenerse en cuenta los efectos de la difracción.

Newton observó que se producen bandas de interferencia al colocar una placa de vidrio y una lente e iluminó ésta desde arriba con luz monocromática (por ejemplo una lámpara de vapor de sodio) ver figura 62. Se producen una serie de anillos luminosos y oscuros, los cuales se conocen como anillos de Newton, son similares a las bandas de interferencia observadas en superficies planas. Este técnica de los anillos de Newton es muy útil para pulir lentes de precisión y examinar lo plano de las superficies de dichas lentes. Si producen bandas uniformes son ópticamente planas.

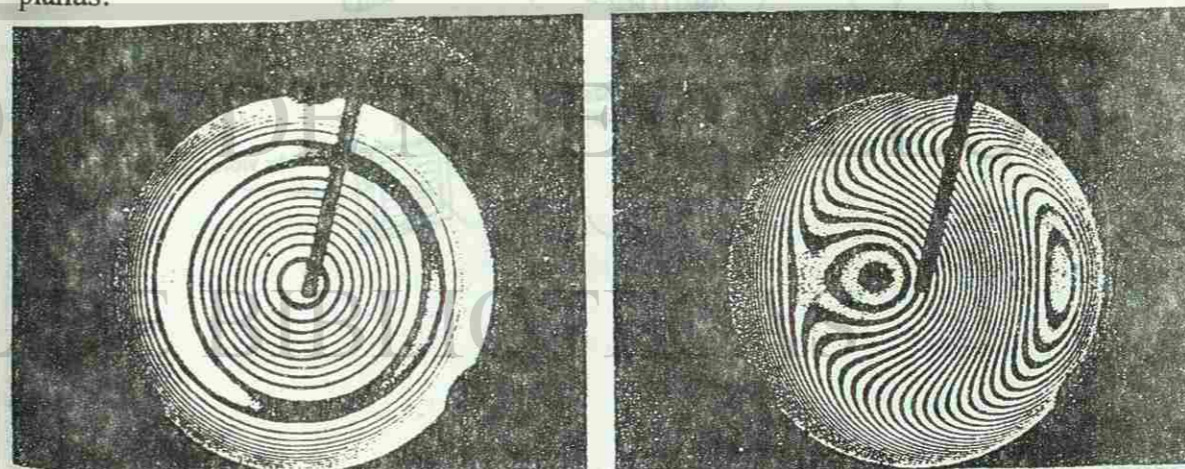


Figura 62. Aplicación de los anillos de Newton en el pulido de las lentes de precisión.

Al construir una lente, la imagen de una fuente puntual no es un pequeño punto brillante rodeado de franjas claras y oscuras. La resolución (la imagen bien definida) se mejora al aumentar el diámetro de una lente, por lo tanto, el poder de resolución de un instrumento es una medida de su capacidad de producir imágenes separadas bien definidas.

### Polarización.

Para determinar si las ondas de luz son longitudinales o transversales, es necesario introducir una propiedad de la luz que se interpreta sólo en términos de ondas transversales y se llama polarización. Polarización es el proceso por el cual las oscilaciones transversales de un movimiento ondulatorio están orientadas a un modelo definido. El hecho de que la luz se polarice es debido a su comportamiento ondulatorio. Las ondas luminosas son transversales. A continuación se considera un ejemplo mecánico de ondas transversales en una cuerda vibrante, de tal manera que al ser enviadas y pasar por una rendija, ver fig. 63, se dice que las ondas están polarizadas en un plano particular.

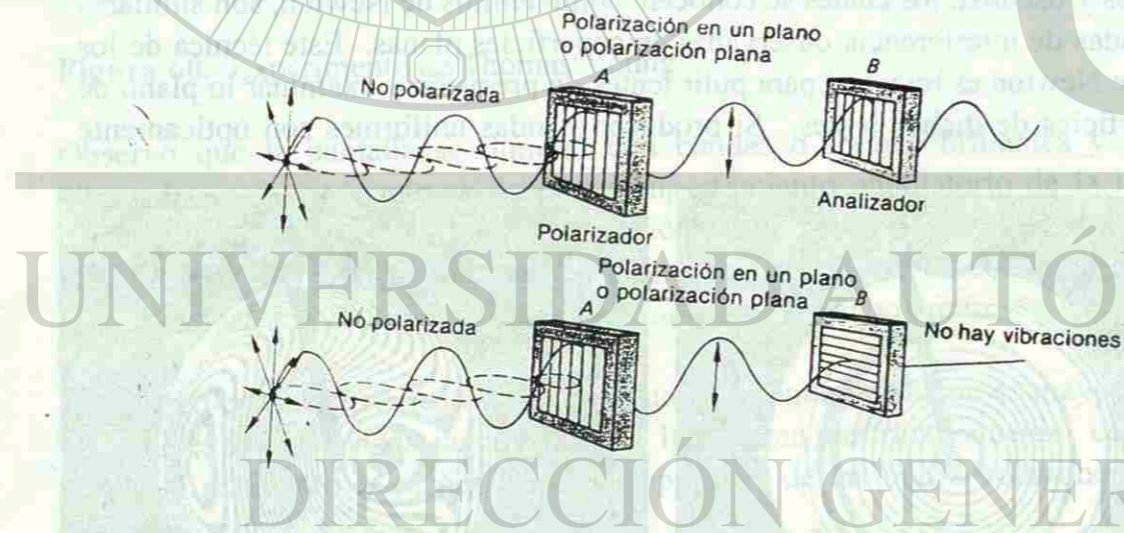


Figura 63.- las ondas que están orientadas en un plano particular tienen polarización plana.

La polarización tiene aplicaciones útiles, por ejemplo las placas Polaroid se usan en fotografía para variar la intensidad de la luz y reducir el reflejo de la luz, al dejar pasar las ondas orientadas en un solo plano. Los lentes polaroid se usan como filtros polarizadores de los rayos de luz, las pantallas de relojes digitales y calculadoras, que funcionan con cristales líquidos, utilizan luz polarizada, lo cual puede ser comprobado pasando un polaroide por delante de la pantalla y rotándolo.

La polarización permite proyectar películas en tercera dimensión para lo cual los espectadores utilizan espejuelos polarizadores. También se utilizan espejuelos polarizadores para evitar la reflexión de la luz, reflejada por ejemplo, en las carreteras cuando la luz reflejada puede ser muy molesta para los conductores.

Se puede determinar las tensiones a que están sometidos objetos de plástico o vidrio pasándolos entre dos polaroides, que se pueden tomar de los espejuelos. Si se pasa una regla plástica entre dos polaroides se observarán una serie de colores, que indica que la regla está sometida a esfuerzos de tensión o compresión, y para objetos más grandes esto puede indicar el lugar más probable de rotura, por lo cual los ingenieros utilizan esta técnica para comprobar la calidad de piezas de vidrio o plástico.



## AUTOEVALUACIÓN

Al terminar la unidad, contesta lo siguiente.

I.- Lee detenidamente cada enunciado y escribe en el paréntesis de la izquierda la letra correspondiente a la respuesta correcta.

- 1.- ( ) Es cuando el cuerpo va de una posición extrema a otra y regresa a la posición inicial
- Onda electromagnética
  - Un ciclo
  - Interferencia
  - Un valle
  - Un nodo
- 2.- ( ) Es un péndulo que oscila, actúa la fuerza de fricción, es el caso real, disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento
- Longitudinal
  - Acelerado
  - Amortiguado
  - Circular
  - Forzado
- 3.- ( ) En un péndulo su movimiento es uniforme, cuando un agente externo suministra energía, se le llama a este movimiento
- Longitudinal
  - Acelerado
  - Amortiguado
  - Circular
  - Forzado
- 4.- ( ) Es el tipo de movimiento en el cual el sistema repite sus condiciones de movimiento, al cabo de cierto intervalo de tiempo
- En fase contraria
  - Efecto Doppler
  - Electromagnético
  - Periódico
  - Período

- 5.- ( ) Es el movimiento periódico, en el cual el cuerpo repite su trayectoria
- Movimiento periódico
  - Movimiento oscilatorio
  - Movimiento uniformemente acelerado
  - Efecto Doppler
  - Período
- 6.- ( ) Es la propagación de una perturbación en el espacio sin que exista transporte de materia
- Una onda
  - Un valle
  - Un nodo
  - Un antinodo
- 7.- ( ) De acuerdo al tipo de movimiento que realizan las partículas del medio, se clasifican en
- Mecánica y longitudinales
  - Transversales y longitudinales
  - Mecánicas y transversales
  - Mecánicas y electromagnéticas
  - Longitudinales y electromagnéticas
- 8.- ( ) Es el tipo de onda en la cual las partículas del medio oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda.
- Longitudinal
  - Estacionaria
  - Tren de onda
  - Transversal
  - Movimiento ondulatorio
- 9.- ( ) Se clasifican las ondas de acuerdo al medio por donde se propagan.
- Transversales y longitudinales
  - Mecánicas y transversales
  - Mecánicas y electromagnéticas
  - Mecánicas y longitudinales
  - Longitudinales y electromagnéticas

10.- ( ) Es el tipo de onda que necesita un medio mecánico elástico material para poder propagarse

- c) Electromagnético
- b) Mecánica
- c) Longitudinal
- d) Transversal
- e) Estacionaria

11.- ( ) Se les llama a los pulsos superiores de una onda transversal.

- a) Valles
- b) Crestas
- c) Amplitud
- d) Longitud de onda
- e) Frecuencia

12.- ( ) Son los puntos que están en la posición de equilibrio o su desplazamiento es cero

- a) Antinodos
- b) Longitud de onda
- c) Amplitud
- d) Nodos
- e) Frecuencia

13.- ( ) Es la distancia mínima entre dos puntos que tengan idéntico estado de movimiento

- a) Frecuencia
- b) Longitud de onda
- c) Amplitud
- d) Valles
- e) Crestas

14.- ( ) Es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medido a partir de la línea de equilibrio

- a) Longitud de onda
- b) Frecuencia
- c) Estacionaria
- d) Amplitud
- e) Nodos

15.- ( ) Es el número de crestas completas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.

- a) Frecuencia
- b) Período
- c) Amplitud
- d) Longitud de onda
- e) Nodos

16.- ( ) Es el tiempo necesario para que la perturbación se propague una distancia igual a longitud de onda,

- a) Frecuencia
- b) Amplitud
- c) Período
- d) Longitud de onda
- e) Nodos

17.- ( ) Si entre dos puntos de una onda existe una separación de un número entero de longitud de onda, se dice que

- a) Están desfasados
- b) Están en fase
- c) Forman una onda estacionaria
- d) Forman interferencia
- e) Forman difracción

18.- ( ) Cuando dos o más ondas se propagan a través del mismo medio, el desplazamiento resultante en cualquier punto es la suma algebraica de los desplazamientos producidos por cada onda por separado

- a) El período
- b) Principio de superposición
- c) La velocidad de propagación de la luz
- d) La longitud de onda
- e) La amplitud de la onda

19.- ( ) Es un caso de superposición cuando las ondas que se superponen tienen las mismas características de frecuencia y longitud de onda se propagan a través del mismo medio, al mismo tiempo y se superponen

- a) Reflexión
- b) Refracción
- c) Interferencia de ondas
- d) Difracción
- e) Efecto Doppler

20.- ( ) Si se superponen las ondas de tal manera que las crestas y los valles de ambas ondas coinciden la onda resultante tiene mayor amplitud

- a) La interferencia es destructiva
- b) La onda resultante tiene mayor longitud de onda
- c) La onda resultante tiene igual amplitud
- d) La onda resultante tiene menor amplitud
- e) La onda resultante tiene mayor amplitud

21.- ( ) En la interferencia destructiva los trenes de onda que se superponen están.

- a) En fase
- b) En fase contraria
- c) Coinciden sus crestas
- d) Coinciden sus valles
- e) Coinciden sus crestas y sus valles

22.- ( ) Se presenta cuando una onda encuentra un obstáculo, lo puede rodear, de modo que existe perturbación detrás del obstáculo.

- a) Interferencia
- b) Difracción
- c) Coinciden sus crestas
- d) Coinciden sus valles
- e) Coinciden sus crestas y sus valles

23.- ( ) Se produce cuando interfieren dos movimientos ondulatorios de la misma frecuencia y amplitud que se propagan en sentido contrario.

- a) Onda transversal
- b) Onda estacionaria
- c) Frecuencia
- d) Onda longitudinal
- e) Longitud de onda

24.- ( ) Se presenta cuando una onda pasa de un medio a otro de propiedades diferentes

- a) Interferencia constructiva
- b) Difracción
- c) Reflexión
- d) Refracción
- e) Efecto Doppler

25.- ( ) El movimiento de un péndulo que oscila a lo largo de un plano único en un arco pequeño, es un ejemplo de movimiento

- a) Longitudinal
- b) Circular
- c) Circular uniforme
- d) Armónico simple
- e) Acelerado

26.- ( ) La energía se transfiere desde la fuente, en forma de ondas sonoras longitudinales en

- a) La luz
- b) El sonido
- c) El movimiento armónico
- d) La polarización
- e) El movimiento oscilatorio

27.- ( ) Se observa la variación de frecuencia de la onda cuando existe un movimiento relativo entre la fuente y el observador en todo movimiento ondulatorio mecánico o electromagnético

- a) Efecto Doppler
- b) Movimiento periódico
- c) Ley de Hooke
- d) Sonoridad
- e) Ruido

28.- ( ) Es la superposición de ondas sonoras de diferentes frecuencias, resultando indeseable al percibirlo

- a) Efecto Doppler
- b) Movimiento periódico
- c) Ley de Hooke
- d) Sonoridad
- e) Ruido

29.- ( ) El análisis de la luz considerando la difracción se le conoce como

- a) Óptica
- b) Óptica geométrica
- c) Óptica física
- d) Iluminación
- e) Intensidad

## II.- Completa las siguientes aseveraciones

- 1.- \_\_\_\_\_ tiene la característica que las partículas están unidas por fuerzas elásticas.
- 2.- \_\_\_\_\_ es aquella onda en la cual las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación.
- 3.- \_\_\_\_\_ es el tipo de onda que no necesita de un medio para propagarse.
- 4.- \_\_\_\_\_ es el pulso inferior de una onda transversal.
- 5.- \_\_\_\_\_ es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medidos a partir de la posición de equilibrio.
- 6.- \_\_\_\_\_ es el número de crestas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.
- 7.- \_\_\_\_\_ es el tiempo necesario para que la perturbación propague una distancia igual a una longitud de onda.
- 8.- \_\_\_\_\_ son los que caracterizan la interacción de las ondas con la materia.
- 9.- \_\_\_\_\_ es la ciencia que estudia el sonido.
- 10.- \_\_\_\_\_ describe la amplitud de la onda sonora.
- 11.- \_\_\_\_\_ son las características de las ondas sonoras que detecta el oído humano.
- 12.- \_\_\_\_\_ es la medida de la intensidad del sonido en relación con el cero standard de la intensidad.
- 13.- \_\_\_\_\_ define: la fuerza de restitución que actúa para que un cuerpo recupere su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del cuerpo, y de sentido contrario.

- 14.- \_\_\_\_\_ es el punto de la onda estacionaria en el cual el desplazamiento resultante es máximo.
- 15.- \_\_\_\_\_ es la rama de la Física que estudia la luz y los fenómenos que produce.
- 16.- \_\_\_\_\_ considera que la luz tiene un comportamiento corpuscular.
- 17.- \_\_\_\_\_ son las características principales de la luz para analizar su naturaleza ondulatoria o corpuscular.
- 18.- \_\_\_\_\_ es la cantidad de energía luminosa que atraviesa una superficie perpendicular a los rayos de luz, en la unidad de tiempo.
- 19.- \_\_\_\_\_ es la razón del flujo luminoso a la unidad del ángulo sólido.
- 20.- \_\_\_\_\_ es el flujo luminoso en la unidad de área.
- 21.- \_\_\_\_\_ son la diferencia básica de las clases de radiaciones electromagnéticas que existen en el espectro electromagnético.
- 22.- \_\_\_\_\_ es el fenómeno mediante el cual se obtienen los colores del iris.
- 23.- \_\_\_\_\_ es el proceso por el cual las oscilaciones transversales de un movimiento ondulatorio están orientadas a un modelo definido.
- 24.- \_\_\_\_\_ es toda superficie lisa que refleja los rayos de luz que recibe.
- 25.- \_\_\_\_\_ son cuerpos transparentes que se pueden construir de vidrio cristalino o de plástico transparente, refractan la luz y se usan en la construcción de instrumentos ópticos.

## III.- Resuelve los siguientes problemas.

1.- Una persona puede oír sonidos comprendidos en un intervalo de frecuencia de aproximadamente 16 Hz a 20000 Hz. Determina la longitud de onda en estos límites, si la velocidad del sonido es de 340 m/s.

$$R = 21.25\text{m}$$

2.- La estación de radio EAR transmite a 750 kHz. La velocidad de la onda de radio es de  $3 \times 10^8$  m/s. ¿cuál es la longitud de onda?

$$R = 400\text{m.}$$

3.- Las ondas de un radar con una longitud de onda de 3.3. cm se emiten en un transmisor. Su velocidad es de  $3 \times 10^8$  m/s ¿Cuál es su frecuencia?

$$R = 9.09 \times 10^9 \text{Hz}$$

4.- Cuando se hace vibrar una cuerda a 120 Hz, se producen ondas transversales en la cuerda de 33 cm de longitud de onda. ¿Cuál es la rapidez de las ondas sobre la cuerda?

$$R = 39.6\text{m/s}$$

5.- Un hombre se sienta en el borde de un muelle para pasear y cuenta las ondas de agua que golpean un poste de soporte del muelle; en un minuto cuenta 90 ondas. Si una cresta en particular viaja 10 m en 4 s, ¿cuál es la longitud de onda de las ondas

$$R = 1.67\text{m}$$

6.- Un péndulo simple de un geólogo tiene 30 cm de longitud y 0.911 Hz de frecuencia en determinado lugar de la Tierra. ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en ese lugar?

$$R = 9.95\text{m/s}$$

7.- Calcula la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de a)  $10^\circ\text{C}$  b)  $30^\circ\text{C}$  c)  $35^\circ\text{C}$

$$R = 336 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 348 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 351 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

8.- Calcula el nivel de intensidad del sonido cuando la intensidad es  $2 \times 10^{-6}$  W/cm<sup>2</sup>.

$$R = 103\text{dB}$$

9.- Si un sonido tiene una intensidad de  $10^{-10} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  ¿Cuál es el nivel de intensidad en dB?

$$R = 20\text{dB}$$

10.- Una ambulancia lleva una velocidad de 70 Km/h y su sirena suena con una frecuencia de 600 Hz. ¿Qué frecuencia aparente escucha un observador que está parado, cuando

a) La ambulancia se acerca a él

b) La ambulancia se aleja de él. Considera la velocidad del sonido en el aire de 340 m/s.

$$R = 636.39\text{Hz}, 567.54\text{Hz.}$$

11.- Un carro de la policía federal de caminos se mueve a 110 km/h, haciendo sonar su sirena con una frecuencia de 800 Hz. Encuentra la frecuencia aparente escuchada por un observador en reposo, cuando

a) El carro se acerca a él.

b) El carro se aleja de él.

$$R = 878.97\text{Hz}, 734.04\text{Hz.}$$

12.- Un automovilista que viaja a una velocidad de 80 km/h escucha el silbato de una fábrica cuya frecuencia es de 1000 Hz. Calcula la frecuencia aparente escuchada por el automovilista cuando

a) Se acerca a la fuente

b) Se aleja de la fuente

$$R = 934.64\text{Hz}, 1065.35\text{Hz.}$$

13.- Determina la iluminación producida por una lámpara eléctrica de 500 candelas a una distancia de 6 m.

$$R = 13.89\text{lx}$$

14.- Una superficie de una mesa está 3 m abajo de una lámpara de 180 candelas. Calcula la iluminación en la superficie.

$$R = 20\text{lx}$$

15.- Una lámpara de alumbrado público produce 6 lux de iluminación a una distancia de 5 m. Calcula la intensidad luminosa de la lámpara.

$$R = 150\text{cd}$$

16.- Calcula la distancia a la que debe colocarse una lámpara eléctrica de 200 candelas para que produzca sobre la superficie de una mesa una iluminación de 20 lux.

$$R = 3.16\text{m}$$

17.- Un radiador de microondas que se emplea para medir la velocidad de los automóviles emite radiación de frecuencia  $1.2 \times 10^9$  Hz. ¿Cuál es la longitud de onda en nanómetros?

$$R=25 \times 10^7 \text{ nm}$$

18.- Cuando la luz de longitud de onda de 600 nm pasa del aire a una placa de vidrio delgada y de nuevo hacia el aire, la frecuencia permanece constante, pero la velocidad en el vidrio se reduce a  $2.6 \times 10^8$  m/s. ¿Cuál es la longitud de onda dentro del vidrio?

$$R=520 \text{ nm}$$

19.- Si la velocidad de la luz en un medio determinado es  $2.1 \times 10^8$  m/s y la velocidad de la luz en el vacío es  $3 \times 10^8$  m/s. ¿Cuál es el índice de refracción de dicho medio?

$$R=1.43$$

20.- Si un rayo entra con un ángulo de incidencia de  $50^\circ$  a un pedazo de vidrio con un índice de refracción de 1.52. ¿Cuál es el ángulo de refracción?

$$R=30.26^\circ$$

21.- Calcula la longitud focal de un espejo convergente, cuyo radio de curvatura es de 16 cm.

$$R=+8 \text{ cm}$$

22.- Calcula el tipo de imagen formada y su colocación con respecto a un espejo cóncavo, si el foco está a 10 cm y el objeto se coloca a 15 cm. del vértice de dicho espejo.

$$R=+30 \text{ (imagen real e invertida)}$$

23.- Encuentra la posición de la imagen, si el objeto se localiza a 7 cm de un espejo convexo, cuya longitud focal es 9 cm.

$$R=-3.94 \text{ (imagen virtual)}$$

24.- Un objeto de 10 cm se localiza a 20 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 15 cm. Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$R=+60 \text{ cm (imagen real), } -30 \text{ cm (imagen invertida) } -3 \text{ (aumento)}$$

25.- Un objeto de 45 cm se localiza a 60 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 20 cm. Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$R=+30 \text{ cm, } -22.5 \text{ cm, } \frac{1}{2} \text{ aumento de la imagen real invertida}$$

26.- Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen de un objeto que mide 40 cm y se localiza a 60 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 30 cm.

$$R=+60 \text{ cm, } -40 \text{ cm, } -1 \text{ aumento de la imagen real invertida}$$

27.- Un objeto de 6 cm de altura se localiza a 10 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 20 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

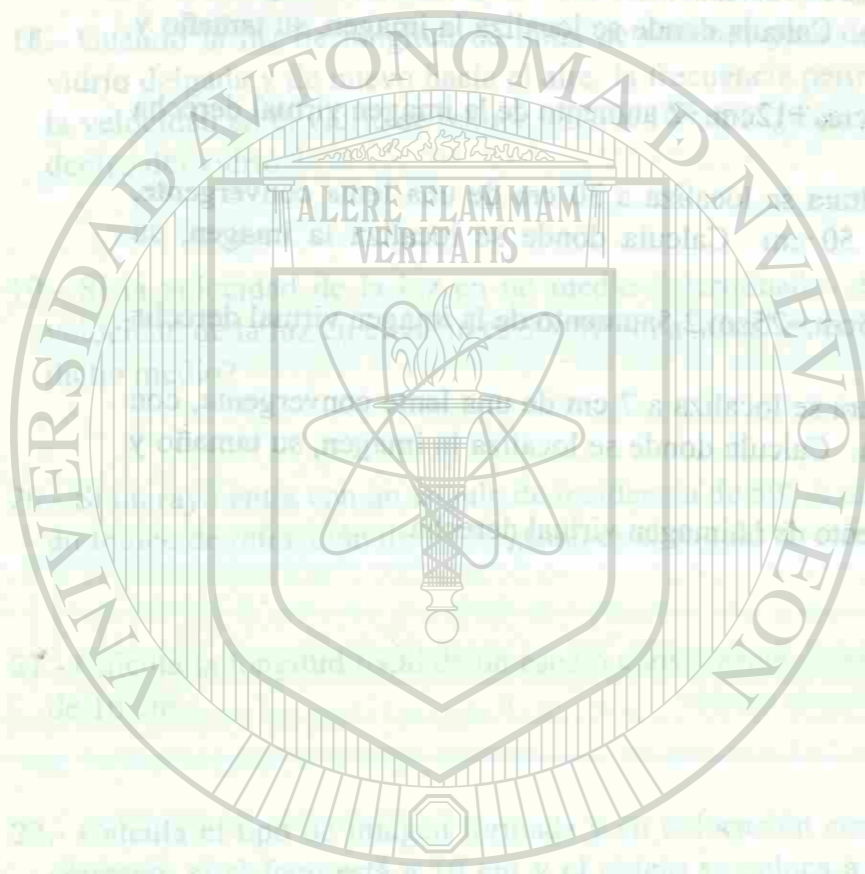
$$R=-20 \text{ cm, } +12 \text{ cm, } +2 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$

28.- Un objeto de 10 cm. de altura se localiza a 30 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 50 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

$$R=-75 \text{ cm, } +25 \text{ cm, } 2.5 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$

29.- Un objeto de 3 cm de altura se localiza a 7 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 12 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

$$R=-16.8 \text{ cm, } +7.2 \text{ cm, } 2.4 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



### OBJETIVO GENERAL:

El alumno comprenderá las bases que sustentan la Teoría Especial de la Relatividad, así como algunos conceptos de la Física Cuántica, Física Atómica y Física Nuclear. Además conocerá la aplicación de la Física como recurso tecnológico.

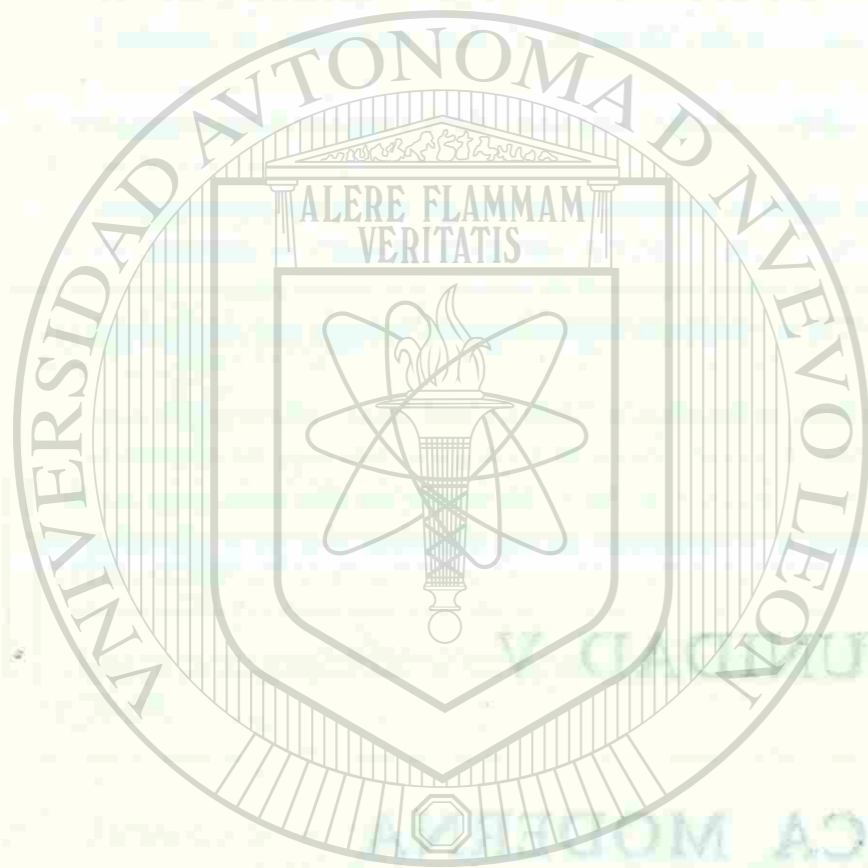
### OBJETIVOS:

- Describir la relación de la Teoría Especial de la Relatividad con la Teoría Clásica a partir de Max Planck.
- Describir la relación de la Teoría Especial de la Relatividad con la Teoría Clásica a partir de Max Planck.
- Describir la relación de la Teoría Especial de la Relatividad con la Teoría Clásica a partir de Max Planck.

## UNIDAD V FISICA MODERNA

### METAS:

- Resolver como mínimo tres problemas donde se calcule la energía de un tren en movimiento.
- Resolver como mínimo tres problemas donde se calcule la energía de un tren en movimiento.
- Resolver como mínimo tres problemas donde se calcule la energía de un tren en movimiento.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

### OBJETIVO GENERAL:

El alumno comprenderá las bases que sustentan la Teoría Especial de la Relatividad, así como algunos conceptos de la Física Cuántica, Física Atómica y Física Nuclear. Además conocerá la aplicación de la Fisión como recurso energético

### OBJETIVOS:

Al término de la unidad el alumno:

- Será capaz de describir las consecuencias de la Teoría Especial de la Relatividad.
- Describirá los orígenes de la Teoría Cuántica a partir de Max Planck.
- Caracterizará el Efecto Fotoeléctrico.
- Describirá el comportamiento onda - partícula de la luz, y el concepto de fotón.
- Describirá la dualidad partícula - onda, y formulará la relación de De Broglie.
- Describirá los modelos atómicos de Thomson, Rutherford y Bohr.
- Describirá la emisión y absorción de la radiación mediante el diagrama de niveles de energía.
- Describirá la estructura del núcleo atómico.
- Formulará la ecuación de la energía de enlace nuclear.
- Describirá el fenómeno de la radiactividad.
- Definirá la fisión nuclear.
- Describirá el funcionamiento del reactor nuclear.

### METAS:

- Resolverá como mínimo tres problemas donde se apliquen los conceptos de la Teoría Especial de la Relatividad.
- Resolverá como mínimo tres problemas donde se calcule la energía de un fotón emitido.
- Resolverá como mínimo tres problemas donde se calcule la energía de enlace nuclear.
- Balancear como mínimo tres ecuaciones de reacciones nucleares.



## CONTENIDO

## INTRODUCCION

## A. TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

1. INTRODUCCION
2. POSTULADOS DE EINSTEIN
3. CONSECUENCIAS DE LOS POSTULADOS
  - A. 3. 1- DILATACION DEL TIEMPO
  - A. 3. 2- LA CONTRACCION DE LA LONGITUD
  - A. 3. 3 -VARIACION DE LA MASA Y RELACION MASA - ENERGIA

## B. FISICA CUANTICA

1. INTRODUCCION
2. RADICION TERMICA
3. EFECTO FOTOELECTRICO
4. DUALIDAD ONDA - PARTICULA DE LA LUZ.  
CONCEPTO DE FOTON
5. DUALIDAD PARTICULA - ONDA. RELACION DE DE BROGLIE

## C. DESARROLLO DE LA FISICA CUANTICA, FISICA ATOMICA

1. INTRODUCCION
2. EL MODELO ATOMICO DE THOMSON
3. EL MODELO ATOMICO DE RUTHERFORD
4. EL MODELO ATOMICO DE BOHR
5. SERIES ESPECTRALES DEL HIDROGENO

## D. FISICA NUCLEAR

1. INTRODUCCION
2. CARACTERISTICAS DEL NUCLEO
  - NUMERO ATOMICO Y NUMERO MASICO
  - ISOTOPOS
  - ENERGIA DE ENLACE.
3. EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO
4. LA FISION NUCLEAR

## INTRODUCCION

## ¿Qué es la física moderna?

Según el diccionario, el vocablo "moderno" se define como "perteneciente a la época actual o un pretérito no muy lejano". Sin embargo, cuando un físico habla de física moderna este adjetivo tiene un sentido algo distinto, pues la expresión se usa para designar ciertos campos específicos de la física. Todos estos campos tienen en común dos características: la primera, que se han desarrollado a partir del año de 1900, aproximadamente, y la segunda, que las teorías empleadas para explicar los fenómenos propios de dichos campos son completamente diferentes a las teorías que existían antes de 1900.

La física que se estudiaba antes de 1900 es la física clásica. Esta comprende el estudio de la mecánica de Newton y los fenómenos que pueden explicarse en términos de la misma; la teoría de Maxwell de los fenómenos electromagnéticos y sus aplicaciones; la termodinámica y la teoría cinética de los gases. Los temas que estudia la física moderna son: la teoría de la relatividad y los fenómenos relacionados con ella; la teoría y los fenómenos cuánticos, y, en particular, la aplicación de las teorías de la relatividad y la cuántica al átomo y al núcleo.

Independientemente de ello, está claro que algunos de los resultados experimentales que se utilizaron en el desarrollo de ambas teorías fueron obtenidos en años anteriores a este siglo.

Se observa pues, que los calificativos moderna y clásica, tal como se emplea en física, carecen del significado temporal con el que se usan normalmente.

¿Qué otro aspecto fundamental influye en el hecho de que esta parte de la Física sea conocida como Física Moderna? El desarrollo de la ciencia está muy ligado al desarrollo y necesidades de la sociedad y también de las posibilidades de la técnica existente en un momento dado de comprobar y utilizar los resultados científicos. Un motor impulsor de la ciencia es el conjunto de necesidades y problemas que tiene la sociedad en cuestión.

Así, es conocido que la Mecánica se desarrolló a partir de la necesidad del cálculo del movimiento de los proyectiles y de los planetas. Por ello podemos decir que los problemas que atacan la Cuántica y la Relatividad son problemas de la sociedad del siglo XX, ya que tienen que ver con el mundo microscópico, átomos, partículas elementales, etc., y el estudio de procesos que se desarrollan a altas velocidades cercanas a la velocidad de la luz en el vacío. Estos problemas y sus soluciones no podían estar frente a un científico del siglo XV o XVI ya que no tenían la posibilidad real de estudiarlos ni de utilizar sus resultados.

Vamos a comenzar nuestro estudio sobre este tema de Física Moderna con el tema de la Relatividad.

## A. TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

### A.1. INTRODUCCION

Posiblemente, Albert Einstein es el físico más conocido en el mundo. Su teoría de la Relatividad es la que más se asocia con su nombre.

La relatividad incluye dos teorías: La Relatividad Especial y la Relatividad General. La Relatividad Especial trata acerca del movimiento, a velocidad constante, mientras que la Relatividad General incluye el movimiento acelerado y el movimiento en un campo gravitacional. La Relatividad Especial se puede entender utilizando matemáticas no más complicadas que el álgebra; mientras que la Relatividad General requiere matemáticas mucho más complejas. Por esta razón, se presentará sólo el tema de la Relatividad Especial.

Albert Einstein trabajaba como dependiente en la oficina de patentes en Bern, Suiza, cuando publicó tres artículos, en el año 1905. Un artículo acerca del efecto fotoeléctrico le ganó el premio Nobel, en 1921. Un segundo artículo, esta vez acerca del movimiento aleatorio de las partículas, conocido como el Movimiento Browniano, explicaba este fenómeno. El tercer artículo, titulado sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, presentaba la Teoría de la Relatividad y le ganó un lugar destacado en el campo de la Física y el reconocimiento de todos los científicos y el público en general. En el momento en que el artículo se publicó, el tema de la relatividad fue ignorado por algunos físicos y otros se opusieron al mismo. Sin embargo, las pruebas experimentales a las que se han sometido han confirmado sus predicciones. Así, pues, esta se ha aceptado como uno de los fundamentos de la física moderna y ha resuelto, además, muchos de los problemas mayores de la Física. Antes de continuar,

¿Qué otro aspecto fundamental influye en el hecho de que esta parte de la Física sea conocida como Física Moderna? El desarrollo de la ciencia está muy ligado al desarrollo y necesidades de la sociedad y también de las posibilidades de la técnica existente en un momento dado de comprobar y utilizar los resultados científicos. Un motor impulsor de la ciencia es el conjunto de necesidades y problemas que tiene la sociedad en cuestión.

Así, es conocido que la Mecánica se desarrolló a partir de la necesidad del cálculo del movimiento de los proyectiles y de los planetas. Por ello podemos decir que los problemas que atacan la Cuántica y la Relatividad son problemas de la sociedad del siglo XX, ya que tienen que ver con el mundo microscópico, átomos, partículas elementales, etc., y el estudio de procesos que se desarrollan a altas velocidades cercanas a la velocidad de la luz en el vacío. Estos problemas y sus soluciones no podían estar frente a un científico del siglo XV o XVI ya que no tenían la posibilidad real de estudiarlos ni de utilizar sus resultados.

Vamos a comenzar nuestro estudio sobre este tema de Física Moderna con el tema de la Relatividad.

## A. TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

### A.1. INTRODUCCION

Posiblemente, Albert Einstein es el físico más conocido en el mundo. Su teoría de la Relatividad es la que más se asocia con su nombre.

La relatividad incluye dos teorías: La Relatividad Especial y la Relatividad General. La Relatividad Especial trata acerca del movimiento, a velocidad constante, mientras que la Relatividad General incluye el movimiento acelerado y el movimiento en un campo gravitacional. La Relatividad Especial se puede entender utilizando matemáticas no más complicadas que el álgebra; mientras que la Relatividad General requiere matemáticas mucho más complejas. Por esta razón, se presentará sólo el tema de la Relatividad Especial.

Albert Einstein trabajaba como dependiente en la oficina de patentes en Bern, Suiza, cuando publicó tres artículos, en el año 1905. Un artículo acerca del efecto fotoeléctrico le ganó el premio Nobel, en 1921. Un segundo artículo, esta vez acerca del movimiento aleatorio de las partículas, conocido como el Movimiento Browniano, explicaba este fenómeno. El tercer artículo, titulado sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, presentaba la Teoría de la Relatividad y le ganó un lugar destacado en el campo de la Física y el reconocimiento de todos los científicos y el público en general. En el momento en que el artículo se publicó, el tema de la relatividad fue ignorado por algunos físicos y otros se opusieron al mismo. Sin embargo, las pruebas experimentales a las que se han sometido han confirmado sus predicciones. Así, pues, esta se ha aceptado como uno de los fundamentos de la física moderna y ha resuelto, además, muchos de los problemas mayores de la Física. Antes de continuar,

veamos las ideas que se tenían antes de que Einstein publicara su famosa teoría.

La relatividad galileana

Consideremos una bola que se lanza hacia arriba dentro de un avión que viaja a una velocidad constante de  $+200\text{m/s}$ . Para un pasajero en el avión, la velocidad horizontal de la bola es cero. Sin embargo, una persona que pudiera observar con un telescopio desde la Tierra, vería que la bola se mueve con una velocidad horizontal de  $+200\text{m/s}$ . Cada una de estas dos personas puede definir un sistema de coordenadas, ejes  $x$  y  $y$ , y utilizar las leyes de Newton para analizar el movimiento. Cada sistema de coordenadas es un marco de referencia. La única diferencia en los dos marcos es la velocidad horizontal de la bola. Para el pasajero, es cero; para la persona que observa desde la tierra, es  $+200\text{m/s}$ . El marco de referencia del pasajero se mueve a una velocidad de  $+200\text{m/s}$  con respecto al marco de referencia que se encuentra en la Tierra. Se dice que los dos marcos son equivalentes, ya que las leyes de Newton se pueden utilizar para analizar el movimiento en cualquiera de ellos, aunque inicialmente la bola se encuentra en reposo en uno de los marcos no hay nada especial acerca de ese marco de referencia.

Galileo demostró que en la Tierra prácticamente se cumple la ley de la inercia. Se sabe que de acuerdo con esta ley la acción de las fuerzas sobre un cuerpo se manifiesta en el cambio en la velocidad, en tanto que para mantener el movimiento a una velocidad de valor y dirección uniforme no se necesita la presencia de fuerzas.

A este marco de referencia, en el que se cumple la ley de la inercia, se le denominó inercial, es decir

un marco inercial de referencia es un marco de referencia en el cual un cuerpo

libre de fuerzas, e inicialmente en reposo, permanecerá en reposo.

Ahora imaginemos que un avión parte del reposo y acelera por una pista. Un pasajero observará que una bola que está colocada en el piso del avión se mueve hacia atrás. El pasajero notará que la bola acelera, aún cuando no hay ninguna fuerza que actúe sobre ella en la dirección de su movimiento. En una situación como ésta, se diría que las leyes de Newton se han violado. Sin embargo, para una persona que está en la Tierra, la bola ha permanecido estacionaria. Por lo tanto, las leyes de Newton continúan válidas para ella. Los dos marcos de referencia no son equivalentes, ya que uno de ellos está acelerado.

El hecho de que las leyes de Newton, las leyes de la mecánica, son válidas en cualquier marco de referencia que no está acelerado, se conoce como la relatividad galileana. La relatividad galileana se puede aplicar, también, aún cuando la bola tenga una velocidad horizontal en ambos marcos. Imaginémos de nuevo que el avión viaja a una velocidad constante de  $+200\text{m/s}$ , pero, esta vez la bola se lanza hacia el frente. Si para el pasajero en el avión la bola tiene una velocidad de  $+10\text{m/s}$ , para la persona en la Tierra tiene una velocidad de  $(+220\text{m/s}) + (10\text{ m/s}) = +230\text{m/s}$ . Esto es, la velocidad de la bola es la suma de la velocidad relativa de los marcos de referencia más la velocidad de la bola en el marco en movimiento.

### El electromagnetismo

Einstein hizo la siguiente pregunta: ¿Cómo se vería una onda de luz si uno se estuviera moviendo al lado de ella a la rapidez de la luz? Sus campos eléctricos serían estacionarios. Pero, los campos eléctricos estacionarios no pueden inducir campos magnéticos.

Por eso, Einstein razonó; las leyes del electromagnetismo no pueden ser válidas en este marco de referencia. Esto es, la relatividad galileana no se puede aplicar en un marco de referencia que se mueve a la rapidez de la luz con respecto a otro marco.

Había también otro problema con el electromagnetismo. Los físicos del siglo XIX, pensando que la mecánica era el área más importante de la Física, trataban de construir modelos mecánicos de todo, incluyendo de los ondas electromagnéticas. El sonido es una onda de presión que viaja a través de un medio. ¿Cuál es el medio por el cual se propaga la luz en el espacio? Esto se resolvió inventando un medio, "el éter", sobre el cual los campos eléctricos y magnéticos oscilaban. El éter estaba en reposo, era el marco de referencia preferido y todos los objetos se movían a través de él. Esto le daba al éter algunas propiedades asombrosas. Por ejemplo, era sumamente rígido; sin embargo, la Tierra podía moverse por él sin que le ofreciera resistencia.

El físico norteamericano Albert Michelson pensó una manera de medir el movimiento de la Tierra por el éter. En 1887, diseñó un experimento en el cual un haz de luz era dividido en dos por medio de un espejo semiplatado. Uno de los rayos de luz viajaba paralelo a la dirección del movimiento de la Tierra, mientras que el otro viajaba perpendicular al primero. Los dos rayos de luz se reflejaban hacia el espejo, recombinándose en un solo rayo nuevamente ver figura 1. Si la luz tardaba el mismo tiempo en recorrer las dos trayectorias, los dos rayos tendrían que interferir constructivamente. Si uno de los rayos tardaba un tiempo igual al de media oscilación de la onda de luz, ocurriría una interferencia destructiva.

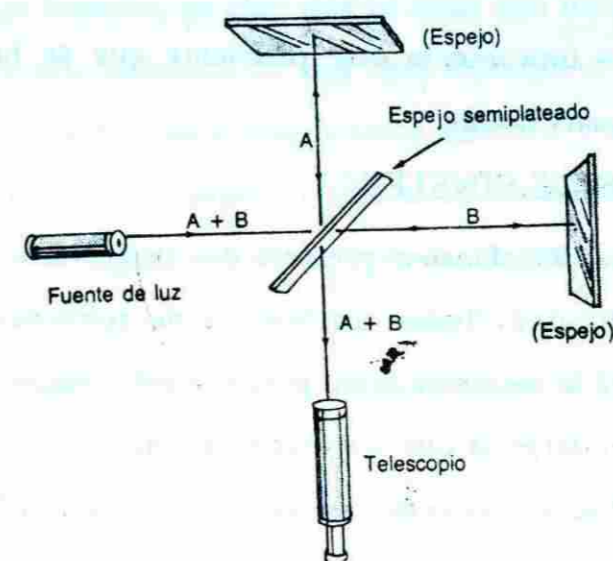


Figura 1. Aparato empleado por Michelson

Michelson asumió que el movimiento de la luz por el éter era similar al de una persona que nada en un río. El tiempo en nadar una distancia determinada, depende de si el nadador va a favor o en contra de la corriente o perpendicular a esta. De igual manera, el tiempo que le toma a la luz viajar desde el espejo semiplatado hasta el espejo reflector y de vuelta al primero, depende de si la luz viaja paralela o perpendicular al movimiento del éter.

Se supone que la Tierra y el instrumento viajen a través del éter. El instrumento se puede hacer girar por  $90^\circ$  en relación con el movimiento de la Tierra por el éter. Se debe observar que la interferencia cambia de destructiva a constructiva a medida que el instrumento gira. Sin embargo, Michelson encontró que no hubo cambio alguno. Michelson se unió más tarde al científico norteamericano E. W. Morley y repitió el experimento, utilizando un instrumento mucho más sensible. Sin embargo, el resultado fue el mismo. No se pudo detectar el movimiento de la Tierra por el éter. Se trató de proponer varias explicaciones para este resultado tan desconcertante. Sin embargo, todas ellas se

crearon para resolver únicamente este problema que se había presentado. Ninguna de ellas era convincente.

## A. 2. POSTULADOS DE EINSTEIN

En su artículo de 1905, Einstein presentó dos postulados. A uno le llamó el Principio de la Relatividad: Todos los marcos de referencia inerciales son equivalentes, tanto para la mecánica como para el electromagnetismo. Esto es, no hay ningún marco de referencia que sea más importante que otro. No existe un marco de referencia absoluto; esto es, que esté en reposo absoluto. No existe el éter. El segundo postulado afirma que la luz se mueve por el espacio, siempre a la misma velocidad ( $c = 3 \times 10^8$  m/s). Principio de la constancia de la velocidad de la luz: La rapidez de la luz es independiente del movimiento de la fuente de luz y del movimiento del observador. La luz que emite el farol de un avión se mueve a  $3 \times 10^8$  m/s con respecto al avión y a  $3 \times 10^8$  m/s con respecto a un observador que está en reposo sobre la Tierra. Las velocidades no se suman de la misma manera a que estamos acostumbrados.

## A. 3. CONSECUENCIAS DE LOS POSTULADOS

Veamos ahora cómo cambian los conceptos de tiempo, longitud y cómo se relacionan la masa y la energía, al aplicar la nueva teoría.

### A.3.1. Dilatación del tiempo

Einstein reconoció que estos postulados parecían contradecirse; que daban la impresión de no tener sentido al considerarlos a la vez. El problema, escribió Einstein, consiste en que la medición de la posición y del tiempo debe considerarse cuidadosamente.

El tiempo, dijo Einstein, es algo que se mide con un reloj. Consideremos un reloj especial que está instalado en una nave espacial. A un extremo de una vara, de longitud  $L_0$  se le coloca una linterna eléctrica y un detector. Al otro extremo de la vara se coloca un espejo. Un pulso de luz sale desde la lámpara, se refleja en el espejo y se registra en el detector. El detector hace que la linterna accione y produzca otro pulso de luz. Cada pulso es como el tic-tac de un reloj. Este no es un reloj convencional, pero sirve para ilustrar el Principio.

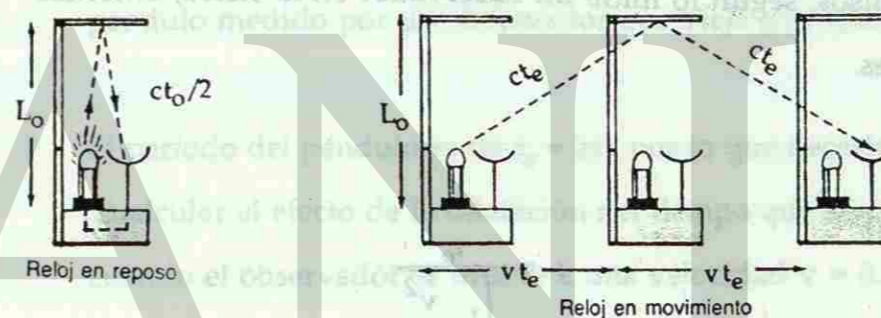


Figura 2. Equipo experimental para medir el tiempo por medio de la luz.

Un astronauta en reposo en relación con el reloj, encontraría que el tiempo entre dos pulsos  $t_0$  es igual a la distancia que viaja  $2L_0$  dividida por la rapidez de la luz  $c$ . Esto es,  $t_0 = 2L_0/c$ . En otras palabras,  $ct_0 = 2L_0$ .

Consideremos lo que un observador en la Tierra vería, si la nave espacial se mueve a una velocidad  $v$  en una dirección perpendicular a la vara. La linterna enviaría un pulso, pero en el tiempo en que el pulso llega al espejo  $t_e$ , el espejo se habrá movido en una distancia igual a  $vt_e$ . Como se ilustra en la figura 2, la trayectoria del pulso de luz es la hipotenusa de un triángulo recto. La altura es  $L_0$

(igual a  $ct_0/2$ ) y la base es  $vt_e$ . Como la luz se mueve a la misma velocidad  $c$  para todos los observadores, la distancia que viaja la luz es  $vt_e$ . De la figura 2 y con un poco de álgebra y trigonometría se puede llegar a

$$t_e = \frac{ct_0}{2\sqrt{c^2 - v^2}}$$

El viaje de vuelta al detector toma la misma cantidad de tiempo. Si  $t$  es el tiempo entre dos pulsos, según lo mide un observador en la Tierra, entonces

$t = 2t_e$ , que es

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

La velocidad  $v$  es siempre menor que  $c$ , por lo que el denominador es siempre menor que 1. Por lo tanto,  $t$  es siempre mayor que  $t_0$ . Esto es, el reloj que se mueve en la nave espacial se mueve más lentamente para un observador en la Tierra. Esto se llama la dilatación del tiempo.

Si el reloj estuviese en la Tierra y la medición se hiciera desde la nave espacial, el astronauta encontraría que el reloj de la Tierra se mueve más lentamente. Hay una simetría completa. Este resultado tan sorprendente está de acuerdo con el Principio de la Relatividad. Esto es, no hay un marco de referencia preferido en el

cual los relojes den el mismo tiempo.

Podemos definir entonces, tiempo propio ( $t_0$ ), como

**El intervalo de tiempo entre dos acontecimientos para el marco de referencia en el cual ambos acontecimientos transcurren en el mismo punto del espacio.**

**Ejemplo 1.** Un péndulo "segundero" necesita 2s para completar un ciclo ( 1s para oscilar en cada dirección ). ¿Cuál será el período de este péndulo medido por un observador que viaja a la velocidad de  $0.8c$ ?

El período del péndulo es de  $t_0 = 2s$ , por lo que necesitamos calcular el efecto de la dilatación del tiempo que se presenta cuando el observador se mueve a una velocidad  $v = 0.8c$ .

Empleando la ecuación para la dilatación del tiempo, tenemos

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sustituyendo los datos

$$t = \frac{2s}{\sqrt{1 - \frac{(0.8c)^2}{c^2}}}$$

$$t = 3.333 \text{ s}$$

Efectuando operaciones, obtenemos

El observador en movimiento "ve" que el péndulo se mueve más lentamente.

**A.3.2. La contracción de la longitud**

Einstein también consideró la medición de la longitud. Imaginemos que nuestro reloj se utiliza para medir la longitud de la vara. Nuevamente, el reloj viaja en una nave espacial, pero esta vez el reloj se coloca en forma tal que la vara queda paralela a la dirección de movimiento de la nave, como lo muestra la figura 3. Para un astronauta que está dentro de la nave, todo es normal. El largo de la vara, según lo midió el astronauta, es  $L_0$ . Al igual que antes,  $2L_0 = ct_0$ .

Si el reloj estuviera en la Tierra y la medición se hiciera desde la nave vendría al astronauta encontrar que el reloj de la Tierra se mueve más lentamente. Una simetría completa. Esto resultó tan sorprendente que de acuerdo con el Principio de la Relatividad, no hay un marco de referencia preferido.

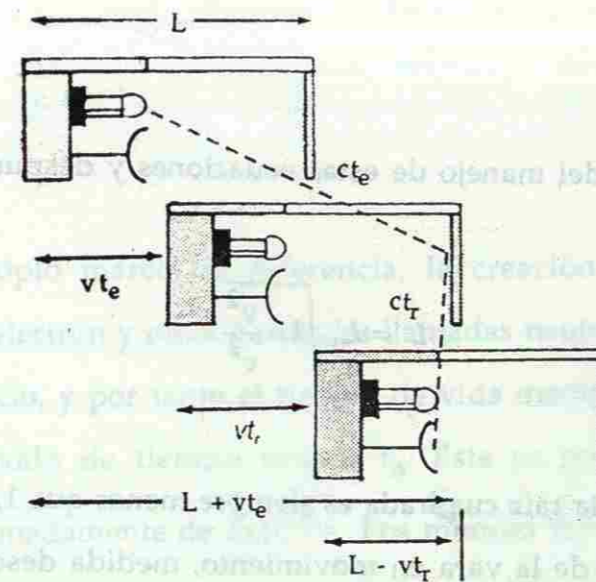


Figura 3. Equipo experimental que se usa para medir la longitud por medio de la luz

Imaginemos ahora que un observador en la Tierra quisiera medir la longitud de la vara en movimiento. Llamemos  $L$  a esa longitud. El observador podría medir el tiempo entre dos pulsos de luz. Este tiempo podría ser corregido para tomar en consideración la dilatación del tiempo, para determinar su valor  $t$ . El tiempo que le toma a la luz viajar desde la lámpara hasta el espejo es  $t_e$ . Durante ese tiempo, la vara se mueve en una distancia igual a  $v t_e$ . La distancia que recorre la luz en ir desde la lámpara hasta el espejo es, por lo tanto,  $L + v t_e$ . Así que  $c t_e = L + v t_e$ . En el viaje de regreso al detector, que toma un tiempo  $t_r$ , la distancia recorrida por la luz es  $L - v t_r$ . Por lo tanto,  $c t_r = L - v t_r$ . El tiempo total entre dos pulsos es  $t = t_e + t_r$ . Esto es,

$$t_e = \frac{L}{c - v} \quad t_r = \frac{L}{c + v}$$

Pero sabemos que  $t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  y también que  $t_0 = \frac{2L_0}{c}$

Una prueba experimental para la dilatación del tiempo se hizo en 1971. Se usó un avión que volaba a una velocidad de 3400 km/h. Se usó un reloj atómico que mide el tiempo con una precisión de 100 mil millones de segundos. El tiempo medido en el avión fue 59 nanosegundos más que el tiempo medido en la Tierra.



Con un poco del manejo de estas ecuaciones y después de despejar  $L$  se llega a

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

El término dentro de la raíz cuadrada es siempre menor que 1, por lo tanto  $L < L_0$ . Esto es, la longitud de la vara en movimiento, medida desde la Tierra, es más corta que si se midiera en reposo sobre la Tierra. Notemos que el astronauta que hace la medición en la nave espacial encontraría el mismo valor que una persona que midiera la vara, en reposo, sobre la Tierra. Los objetos se encogen al moverse. Sin embargo, solo se encogen en la dimensión paralela a su movimiento. A esto se le llama la **contracción de la longitud**.

Podemos definir también, longitud propia ( $L_0$ ), como

**se llama longitud propia a la longitud de un cuerpo medida en un marco de referencia en el cual el cuerpo está en reposo.**

Por ejemplo, si un objeto de 1m de largo se mueve a una velocidad igual al 60% de la rapidez de la luz, su longitud, según la mide un observador en reposo, es

$$(1m) \left( \sqrt{1 - (0.6)^2} \right) = 0.8m$$

Una prueba experimental para la dilatación del tiempo y de la contracción de la longitud es la creación y la desintegración de la partícula elemental llamada **muón** (los muones pueden ser producidos en colisiones energéticas entre otras

partículas). En su propio marco de referencia, la creación del muón y su desintegración (en un electrón y otras partículas llamadas neutrinos) ocurre en el mismo punto del espacio, y por tanto el tiempo de vida medio en ese marco de referencia es el intervalo de tiempo propio  $t_0$ . Este se puede medir en el laboratorio y es aproximadamente de  $2 \times 10^{-6}$  s. Los muones también se producen cuando las partículas de alta energía conocidas como rayos cósmicos chocan contra los átomos de la alta atmósfera: estos muones se aceleran hacia el suelo a velocidades muy cercanas a la de la luz; algunos se mueven a 0.999985 c. A esta velocidad la distancia que recorrerían, sería

$$s = vt$$

$$s = \left[ (0.999985) \left( 3 \times 10^8 \frac{m}{s} \right) \right] (2 \times 10^{-6} s)$$

$$s = 599.991m$$

una distancia mucho muy pequeña comparada con la altura de la atmósfera que es de más de 100 Km. Por lo tanto los muones nunca llegarían a la superficie de la Tierra; sin embargo se detectan en grandes cantidades.

La vida media del muón es como un reloj y, al moverse, camina más lentamente. Para un muón su vida es de  $2 \times 10^{-6}$  s, pero para un observador estacionario es

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$t = \frac{2 \times 10^{-6} \text{ s}}{\sqrt{1 - \frac{(0.999985 c)^2}{c^2}}}$$

$$t = 3.65 \times 10^{-4} \text{ s}$$

En esta cantidad de tiempo, el muón puede viajar una distancia de

$$s = vt$$

$$s = \left[ (0.999985) \left( 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \right] (3.65 \times 10^{-4} \text{ s})$$

$$s = 109.498 \text{ m}$$

Por lo tanto, el muón puede viajar fácilmente los 100 Km hasta la superficie de la Tierra.

Esta situación se puede examinar desde el punto de vista del muón. Para un marco de referencia en el muón, éste está en reposo mientras que la Tierra es la que se mueve.

Debido a la contracción de la longitud, la distancia de 100 Km hasta la Tierra (L) le parece más corta al muón. La distancia estaría dada por

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 100 \text{ km} \sqrt{1 - \frac{(0.999985 c)^2}{c^2}}$$

$$L = 547.72 \text{ m}$$

Como vimos, el muón puede viajar más de 600 m durante una vida media. Para su reloj, la distancia requiere menos de una vida media. Por eso el muón puede llegar a la superficie de la Tierra.

El número de muones que se detectan en algunas montañas y al nivel del mar, se han medido cuidadosamente y concuerdan con las predicciones de la Teoría de la Relatividad.

### A.3.3. Variación de la masa y relación masa-energía

Einstein demostró que la masa de un objeto en movimiento aumenta. El encontró que, si la masa de un objeto en reposo es  $m_0$ , cuando se mueve a una velocidad  $v$ , estará dada por

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

La masa es una medida de la inercia de un cuerpo; esto es, la razón de la fuerza aplicada  $F$  a la aceleración resultante  $a$ . ( $m = F/a$ ). Un aumento en masa indica

que una misma fuerza produce una aceleración menor.

Observemos que en la ecuación de la masa, cuando la velocidad del objeto se acerca a la velocidad de la luz, el denominador es casi cero y la masa se hace infinitamente grande. Por lo tanto, la aceleración también se hace cero. Esto es, la fuerza requerida para acelerar un objeto que se mueve a la velocidad de la luz es infinita. Por esta razón, ningún objeto con masa en reposo diferente de cero puede viajar a la velocidad de la luz.

Las partículas aceleradas a altas velocidades mediante aceleradores lineales y sincrotrones muestran un aumento en masa. Mientras más energía se les añade a las partículas, sus aceleraciones se hacen cada vez más pequeñas y sus velocidades se acercan lentamente a la velocidad de la luz. La experiencia con los aceleradores de partículas han verificado que la ecuación de Einstein es correcta.

Unos meses después de escribir su artículo acerca de la relatividad, Einstein escribió un artículo de tres páginas donde exploraba las consecuencias del aumento relativista de la masa.

Para velocidades pequeñas en comparación con la rapidez de la luz, se puede escribir la ecuación

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

Esta aproximación tiene un error de solo el 3% cuando la velocidad es igual a  $c/5$ .

La energía cinética del objeto en movimiento está dada por  $E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2$

Einstein demostró que el aumento relativista de la masa ( $m - m_0$ ) es igual a la energía cinética dividida por el cuadrado de la rapidez de la luz. Como  $c$  es grande, el aumento en la masa es pequeño.

La ecuación puede describirse como

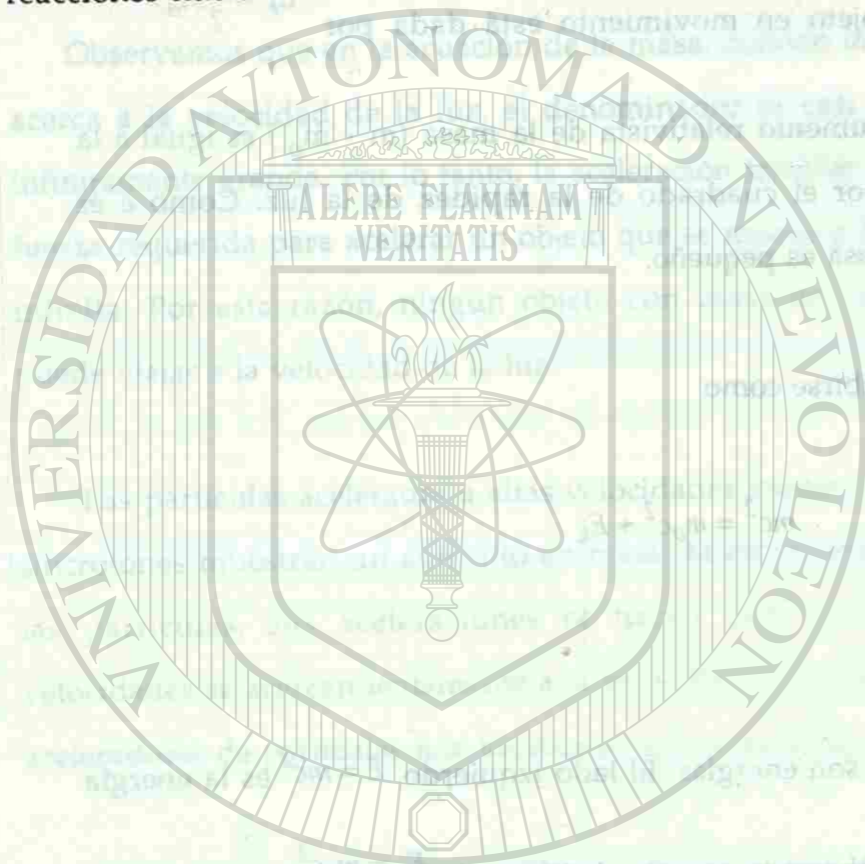
$$mc^2 = m_0c^2 + E_k$$

Ambos lados de la ecuación son energías. El lado izquierdo  $E = mc^2$  es la energía total del objeto. El lado derecho es la energía cinética más  $E_0 = m_0c^2$ , el contenido energético del objeto en reposo. La relación:

$$E = mc^2$$

es la famosa ecuación de Einstein para la equivalencia energética de una masa. El principio de la proporcionalidad de la masa y la energía establecido por la teoría de la relatividad, ha desempeñado enorme papel en la ciencia, sobre todo en la física atómica y nuclear. La fórmula anterior fue muchas veces verificada experimentalmente y obtuvo brillante confirmación. Más adelante

veremos, cómo esta fórmula se usa en los cálculos del balance de energía en las reacciones nucleares.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

AUTOEVALUACION

I.- CONTESTA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS.

1.- ¿Cuáles son las ramas de estudio de la física clásica ?

-----  
-----  
-----

2.- ¿ Cuáles son las ramas de estudio de la física moderna?

-----  
-----  
-----

3.- ¿Cuál es la diferencia entre la física clásica y la física moderna?

-----  
-----  
-----

4.- ¿ Qué afirma el principio de relatividad de Galileo ?

-----  
-----  
-----

5.- Enuncia los postulados de la teoría especial de la relatividad de Einstein.

-----  
-----  
-----

6.- ¿ Cuáles son las consecuencias más importantes de la teoría especial de la relatividad ?

-----  
-----  
-----

7.- ¿Qué es el tiempo propio?

-----

-----

-----

8.- ¿Qué es la longitud propia?

-----

-----

-----

9.- ¿Cuáles son las expresiones para la dilatación del tiempo y la contracción de la longitud?

-----

-----

-----

10.- ¿Cuáles son las expresiones para la masa y la energía relativistas y como se relacionan?

-----

-----

-----

## II.- RESUELVE LOS SIGUIENTES PROBLEMAS.

1.- Una barra rígida, de 1m de largo, es medida por dos observadores, uno en reposo con respecto a la barra y el segundo moviéndose con respecto al primero a lo largo de la longitud de la barra. ¿A qué velocidad debe moverse el observador para ver la barra contraída a 0.999m y 0.500m? R) 0.0447c; 0.866c

2.- El mesón  $\pi^+$ , una partícula inestable, tiene una vida media de unos  $2.6 \times 10^{-8}$  s (medida en su propio marco de referencia) antes de desintegrarse. a) Si una de estas partículas se mueve respecto al laboratorio con una velocidad de  $0.8c$ , ¿Cuál es la vida media medida en el laboratorio? b) ¿Qué distancia, medida en el laboratorio, recorre la partícula antes de desintegrarse? R) a)  $4.3 \times 10^{-8}$  s b) 10.4 m

3.- ¿Qué tan rápido tendrá que viajar una nave para que un intervalo de 1 año medido por un observador en la nave sea de 2 años medido por un observador terrestre estacionario? R) 0.866 c

4.- Determine las dimensiones y forma de una placa de 1 m cuadrado que se mueve alejándose de un observador en línea recta a lo largo de su base, a la velocidad relativa de  $0.8c$ . R) placa rectangular: base = 0.6m ; altura = 1 m

5.- Un pasajero viaja en un tren que se mueve a la velocidad de  $0.75c$ . Cuando el tren pasa frente a la plataforma de una estación, un dependiente levanta un reloj y después lo deja. Si el pasajero observa que el dependiente sostuvo el reloj durante 8s, ¿qué tanto tiempo piensa el dependiente haberlo sostenido? R) 5.3 s

6.- Determine la energía total de un protón que viaja a  $0.8 c$ . R)  $2.5 \times 10^{-10}$  J

## B. FISICA CUANTICA

### B.1. INTRODUCCION A LA FISICA CUANTICA

En la unidad IV ya hablamos del concepto que se tiene sobre la naturaleza de la luz. Además estudiamos algunos fenómenos que nos demuestran que la luz tiene características ondulatorias o sea que se comporta como una onda electromagnética. Entre estos fenómenos tenemos la interferencia, la difracción y la polarización.

Este concepto acerca de la luz como una onda electromagnética corresponde a finales del siglo XIX. Vamos a ver ahora cómo apareció en la Física un concepto más moderno a través del surgimiento de una nueva rama de la Física Moderna: la Física Cuántica.

A finales del siglo XIX se comenzaron a estudiar una serie de nuevos fenómenos, en los que la luz participa, que convencieron a algunos científicos de la época, de la necesidad de modernizar el concepto de la luz. Vamos a revisar algunos de estos fenómenos.

### B. 2. RADIACION TERMICA:

El primer fenómeno que impuso la necesidad de revisar una vez más el concepto de la luz fue la radiación térmica.

Todos conocemos que los cuerpos emiten radiación y que esto depende fundamentalmente de la temperatura del cuerpo. A mayor temperatura, mayor radiación emitirá el cuerpo. -

La cantidad de energía por unidad de tiempo que emite la superficie de un cuerpo depende además del estado de la superficie (rugosa o lisa) y del color de la misma. Así los cuerpos de color oscuro o negro emiten más energía y los de color claro emiten menos energía, estando a igual temperatura. Esto está relacionado con la absorción por parte del cuerpo de la radiación que incide sobre él. Los cuerpos oscuros absorben más y por ello emiten más, los cuerpos claros absorben menos y por ello emiten menos.

Se define de esta forma el cuerpo negro como aquel cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él y por ello es el cuerpo que más radiación emite, por lo que también se le llama radiador o emisor ideal.

A finales del siglo XIX fue estudiada la forma en que un cuerpo negro emitía la radiación, basándose en el concepto de que la luz era una onda electromagnética; pero los investigadores no pudieron, partiendo de esta hipótesis, explicar correctamente los resultados experimentales que se tenían.

En el año 1900 el científico alemán Max Planck introdujo una nueva hipótesis, muy revolucionaria para aquella época, que planteaba que la radiación era emitida no en forma de ondas electromagnéticas sino en forma de paquetes de energía, a los que él llamó "cuantos"

Planck consideró que el cuerpo negro estaba constituido por cierto número de osciladores pero que cada uno de ellos solo podía emitir una energía igual a un número entero de cuantos:

$$E = n\varepsilon \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

donde  $n$  es el número de cuantos y la energía de cada cuanto es:

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

donde  $h$  es una nueva constante llamada la constante de Planck y  $\nu$  es la frecuencia de la radiación.

O sea que aquí Planck introdujo conceptos nuevos en la Física de aquel tiempo como el concepto de "cuanto" y el hecho de que la radiación fuera emitida en forma de paquetes de energía y no en forma de ondas electromagnéticas. Aquí es donde se puso de manifiesto que la radiación se emitía en forma de un haz de cuantos o sea tenía naturaleza corpuscular y no ondulatoria.

A partir de estas hipótesis, Planck pudo explicar correctamente los resultados experimentales de la radiación del cuerpo negro y dado el concepto de cuanto de energía que introdujo, se considera que éste da inicio a la Física Cuántica. Por este trabajo Max Planck obtuvo el Premio Nobel de Física en 1918.

Notemos sin embargo que Planck sólo nos habló del hecho de que la radiación, y por tanto la luz, es emitida en forma de cuantos, pero no dijo nada en cuanto a su absorción o su propagación ¿Será posible que en estos fenómenos también esté presente la naturaleza cuántica, corpuscular de la radiación?

Sobre estos aspectos hicieron sus aportes otros científicos al estudiar otros fenómenos.

Ejemplo 1. ¿Cuál es la energía de los fotones de un rayo de luz que tiene una longitud de onda de 540 nm (luz verde)?

$$\lambda = 540 \text{ nm} = 540 \times 10^{-9} \text{ m}$$

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La energía de un fotón de luz de frecuencia  $\nu$  es:

$$E = h\nu$$

el dato que se tiene es la longitud de onda que es igual a:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{de donde } \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{540 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5.55 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

por lo tanto

$$E = h\nu = (6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) \left( 5.55 \times 10^{14} \frac{1}{\text{s}} \right)$$

$$E = 3.666 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Ejemplo 2. ¿Cuáles fotones tienen más energía, los de un rayo de luz ultravioleta de 300 nm de longitud de onda o los de un rayo de luz roja de 700 nm de longitud de onda?

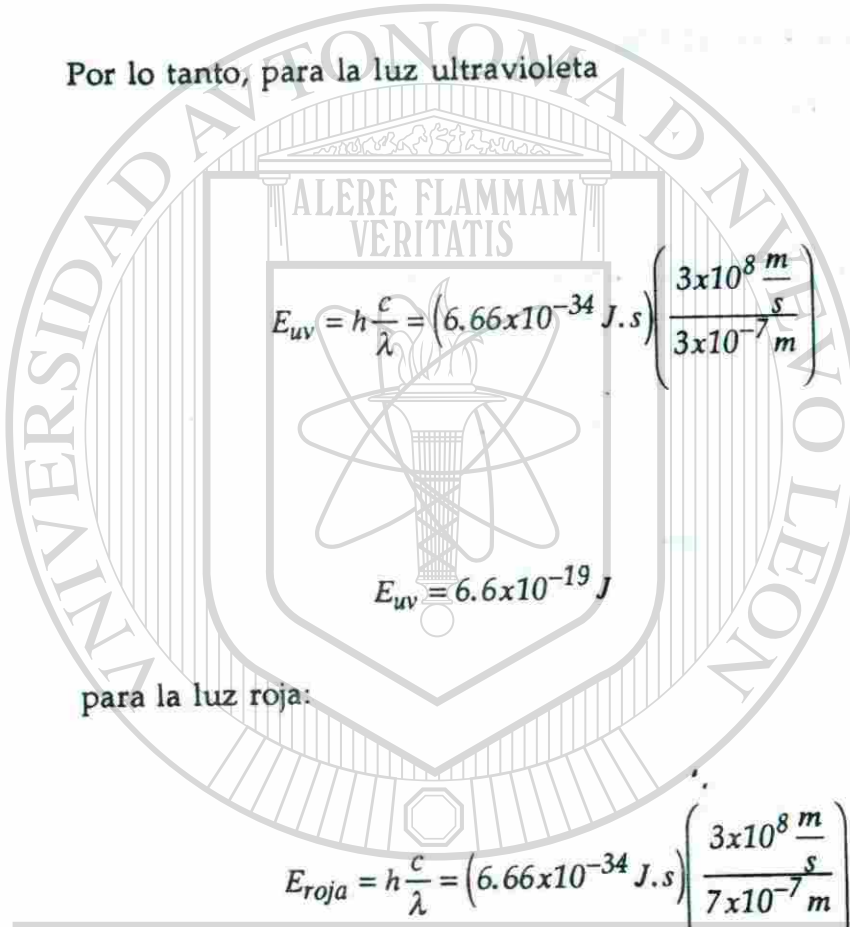
$$\lambda_{uv} = 300 \text{ nm} = 300 \times 10^{-9} \text{ m} = 3 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_{roja} = 700 \text{ nm} = 700 \times 10^{-9} \text{ m} = 7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

La energía de un fotón es igual a:

$$E = h \frac{c}{\lambda}$$

Por lo tanto, para la luz ultravioleta



$$E_{uv} = h \frac{c}{\lambda} = (6.66 \times 10^{-34} \text{ J.s}) \left( \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \times 10^{-7} \text{ m}} \right)$$

$$E_{uv} = 6.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

para la luz roja:

$$E_{roja} = h \frac{c}{\lambda} = (6.66 \times 10^{-34} \text{ J.s}) \left( \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{7 \times 10^{-7} \text{ m}} \right)$$

De aquí vemos que los fotones del ultravioleta poseen más energía que los del rojo. Por ello se plantea la necesidad de protegernos de la acción de los rayos ultravioleta.

### B.3 EFECTO FOTOELECTRICO:

Seguramente has utilizado muchas veces una calculadora que no necesita baterías y es posible te hayas preguntado: ¿De dónde sale la energía que necesita para funcionar?. Quizás también te hayas preguntado: ¿De dónde sale la energía que utilizan las naves espaciales? como el trasbordador Discovery, durante el vuelo para mantener funcionando los equipos de la nave y garantizar la vida de la tripulación. Pues en ambos casos se utiliza la energía de la luz para producir energía eléctrica. Vamos a ver cómo son las características de este proceso.

A finales del siglo XIX se descubrió y estudió el Efecto Fotoeléctrico. Este fenómeno consiste en que al incidir radiación (luz) sobre un material, generalmente un metal, éste emite electrones. A estos electrones se les llama fotoelectrones ya que son liberados del metal por la acción de la luz. O sea este fenómeno corresponde a la absorción de la luz por un material, por lo que su estudio tenía gran importancia porque permitía aclarar cómo era el comportamiento de la luz en estas condiciones.

Los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico, obtenidos mediante la instalación mostrada, en la figura 4, pueden ser resumidos de la siguiente forma:

1. El número de los fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la luz incidente.
2. La energía cinética máxima de los fotoelectrones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de su frecuencia.
- 3.-El efecto no se produce para cualquier frecuencia de la luz incidente, sino para frecuencias mayores que cierto valor llamado frecuencia de corte o umbral.



4. La emisión de los fotoelectrones es instantánea luego de la incidencia de la luz. El tiempo que transcurre entre la incidencia de la luz y la emisión es del orden de  $10^{-8}$  segundos.

Partiendo de la suposición de que la luz es una onda electromagnética, de estos 4 resultados experimentales sólo puede explicarse el número 1. Los otros 3 resultados no son explicados partiendo de esta suposición.

En 1905 el físico alemán Albert Einstein publicó un trabajo donde explicaba todos los resultados experimentales del efecto fotoeléctrico.

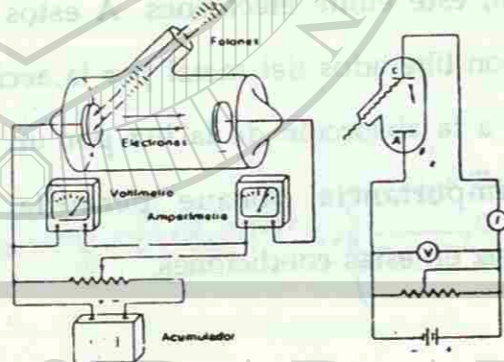


Figura 4. Instalación experimental para el estudio, del efecto fotoeléctrico.

Einstein partió del trabajo anteriormente expuesto por Planck y postuló que la luz es un haz de cuantos, en la actualidad conocidos como fotones, cada uno con una energía  $E$  igual a:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

donde:

- $h$ : la constante de Planck
- $c$ : la velocidad de la luz en el vacío
- $\nu$ : la frecuencia de la luz
- $\lambda$ : la longitud de onda

Planck nos había planteado que la luz se emitía en forma de cuantos, Einstein amplió esta idea y postuló que la luz no sólo se emite sino que se propaga y absorbe en forma de cuantos o fotones, generalizando de esta forma la naturaleza corpuscular, cuántica o fotónica de la luz.

A partir de esto y según la explicación de Einstein el efecto fotoeléctrico ocurre de la siguiente forma:

-El haz de fotones llega a la superficie del metal, cada uno llevando una energía  $E = h\nu$ .

-Cada fotón interactúa con un electrón del metal y le entrega su energía.

-Cada electrón utiliza la energía que recibe en 2 procesos

1. Escapar del metal, para lo cual requiere gastar cierta cantidad de energía  $\phi$ , llamada función de trabajo.

2. Moverse con una determinada energía cinética  $E_k$ .

De manera que podemos plantear la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico de la siguiente forma:

$$h\nu = E_k + \phi = \frac{1}{2}m_0v^2 + \phi$$

De esta ecuación podemos entender perfectamente los resultados experimentales anteriormente expuestos, ya que se ve que la energía cinética de los electrones depende de la frecuencia de la luz y no de la intensidad, además si la energía de los fotones  $E = h\nu$  es menor que la función de trabajo  $\phi$  los electrones no pueden salir del metal, pues no les alcanza la energía, y por ello no ocurre el efecto fotoeléctrico.

Ciertos experimentos fueron realizados por Robert Millikan en 1915 y de ellos se obtuvo el valor de  $h$ . En la actualidad el valor más exacto de la constante es:

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

De esta manera del estudio del efecto fotoeléctrico se pudo concluir que el comportamiento de la luz en procesos de absorción es corpuscular o cuántico. El trabajo de Albert Einstein de este efecto fue galardonado con el Premio Nobel de Física en el año 1921.

Como ya vimos al principio el efecto fotoeléctrico tiene una gran importancia práctica. Permite producir energía eléctrica a partir de la luz, permite construir equipos para medir la intensidad de la luz, se diseñan dispositivos basados en este efecto que reaccionan ante la presencia de luz, como alarmas o sistemas de seguridad etc. Todo esto lo tenemos a nuestro servicio gracias al trabajo de muchos científicos que han dedicado su vida al estudio de éste y otros fenómenos.

Otros fenómenos estudiados posteriormente confirmaron el hecho de que la luz posee características corpusculares. Entre ellos el efecto Compton, un proceso de interacción de los fotones con electrones, sin absorción, y en el cual los fotones se comportan como las bolas de billar.

Ejemplo 3. La función de trabajo para el tungsteno es de  $7.232 \times 10^{-19} \text{ J}$  (4.52eV).

Si se ilumina una superficie de este metal con luz de frecuencia  $1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$ , a) ¿Cuál será la energía cinética máxima de los electrones emitidos? b) Determine la frecuencia de corte y la longitud de la onda de corte de este metal.

$$\phi = 7.232 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\nu = 1.5 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

a) Según la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico:

$$h\nu = E_k + \phi$$

$$E_k = h\nu - \phi$$

$$E_k = \left(6.66 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}\right) \left(1.5 \times 10^{15} \frac{1}{\text{s}}\right) - \left(7.232 \times 10^{-19} \text{ J}\right)$$

$$E_k = 2.668 \times 10^{-19} \text{ J}$$

b) La frecuencia del corte queda determinada por la ecuación de Einstein cuando  $E_k = 0$ , o sea:

$h\nu = E_k + \phi$   
 $h\nu_0 = \phi$   
 o sea:  
 $\nu_0 = \frac{\phi}{h} = \frac{7.232 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.6 \times 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{s}}}$   
 $\nu_0 = 1.095 \times 10^{15} \text{ Hz}$

El significado de este valor es que si la frecuencia de la luz incidente es menor que  $1.095 \times 10^{15} \text{ Hz}$  no se produce el efecto fotoeléctrico en el tungsteno, pues la energía de los fotones es menor que la función de trabajo del metal. Asociada a la frecuencia de corte se

designa una longitud de onda de corte o umbral  $\lambda_0$

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = \frac{3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.095 \times 10^{15} \frac{1}{\text{s}}} = 2.739 \times 10^{-7} \text{ m}$$

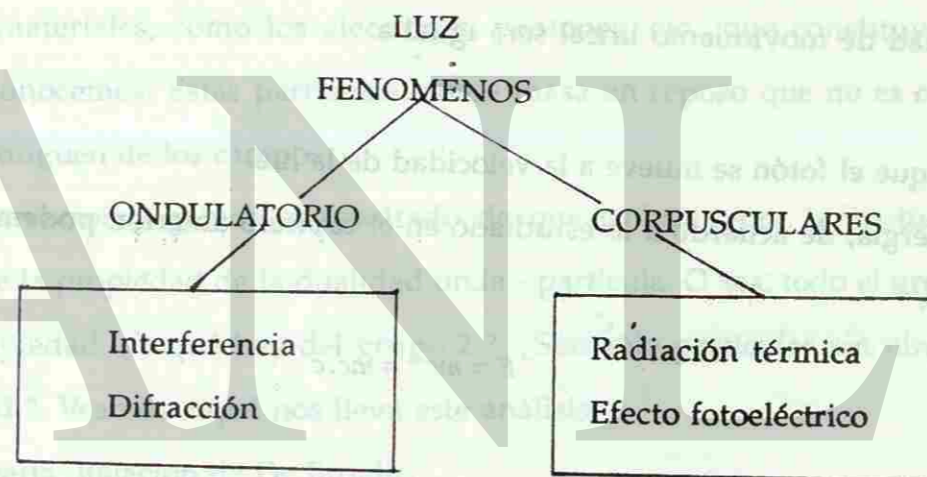
$$\lambda_0 = 273.9 \text{ nm}$$

Su significado es el mismo, si la longitud de onda de la luz

incidente es mayor que este valor, no ocurrirá el efecto fotoeléctrico en el tungsteno.

B. 4. DUALIDAD ONDA - PARTICULA DE LA LUZ. CONCEPTO DE FOTON.

Resumiendo lo que hemos visto hasta ahora tenemos que la luz participa tanto en fenómenos ondulatorios, estudiados en la unidad IV, como en fenómenos corpusculares, que acabamos de ver:



El hecho de que un mismo rayo de luz pueda ocasionar fenómenos ondulatorios o corpusculares nos plantea de nuevo la pregunta, ¿ qué es la luz ? .

Aquí llegamos al concepto de dualidad onda - partícula de la luz. Podemos decir que la luz no es sólo una onda electromagnética ni es sólo un haz de fotones. La luz tiene características tanto ondulatorias como corpusculares y a esto es lo que llamamos dualidad onda - partícula de la luz.

Esta dualidad se refleja en las relaciones:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

donde tenemos propiedades corpusculares como E, la energía de un fotón, y ondulatorias como  $\nu$ , la frecuencia de la luz o  $\lambda$ , la longitud de la onda.

El fotón es una partícula cuya masa en reposo es igual a cero y por tanto, su cantidad de movimiento lineal será igual a:

$$p = mc$$

dado que el fotón se mueve a la velocidad de la luz.

La energía, de acuerdo a lo estudiado en el capítulo anterior, podemos plantearla como:

$$E = mc^2 = mc \cdot c$$

Por lo tanto:  $E = pc = h \frac{c}{\lambda}$  y de aquí, nos queda el impulso:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

relación que nos señala también la dualidad, pues tiene una característica corpuscular p, la cantidad de movimiento lineal del fotón, y una característica ondulatoria, que es la longitud de la onda asociada al fotón.

Ya tenemos entonces el concepto moderno de la luz, que es el de la dualidad, y que prevalece en la Física desde la primera década del presente siglo.

Hemos visto además como el camino para llegar a este concepto pasó por el surgimiento de una nueva rama de la Física que es la Física Cuántica.

### B.5 DUALIDAD PARTICULA - ONDA . RELACION DE DE BROGLIE

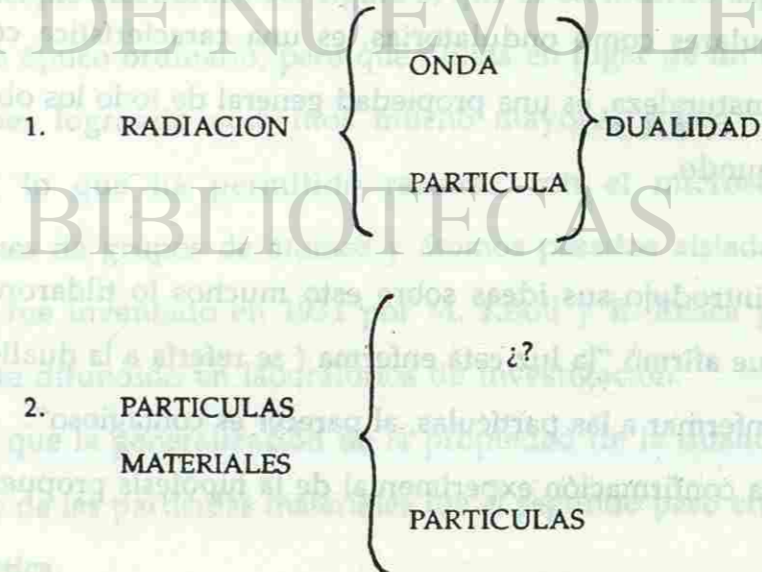
Todo lo que existe en la naturaleza puede clasificarse en dos grandes grupos:

1. Radiación, como la luz. A esto los físicos le llaman campo y se refieren a objetos cuya masa en reposo es cero.
2. Partículas materiales, como los electrones, protones, etc., que constituyen la materia que conocemos. Estas partículas tienen masa en reposo que no es cero y por eso se distinguen de los campos.

En el punto anterior llegamos al resultado de que la luz y por tanto toda la radiación tiene la propiedad de la dualidad onda - partícula. O sea, todo el grupo 1 tiene esta propiedad. ¿Y qué hay del grupo 2? ¿Son sólo partículas sin ninguna otra propiedad? Veamos a qué nos lleva este análisis.

#### Ondas de materia. Relación de De Broglie.

El científico francés Louis De Broglie analizó esta situación de la siguiente forma:



de lo cual se concluye que hay como una falta de simetría en el cuadro.

Esto llevó a que De Broglie propusiera en 1924 que las partículas materiales debían presentar también propiedades ondulatorias para de esta manera se les pudiera reconocer la característica de la dualidad, ya reconocida para la luz y la radiación en general.

De Broglie propuso que una partícula con una cantidad de movimiento lineal igual a  $p$ , debe tener asociada una onda cuya longitud de onda debe calcularse por la relación:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

donde de nuevo aparece  $h$ , la constante de Planck. Esta relación, que es similar a la vista anteriormente para el fotón, es conocida como la relación de De Broglie. A las ondas asociadas a las partículas se les llamó ondas de materia.

De esta forma aparece que la dualidad, o sea el hecho de presentar tanto propiedades corpusculares como ondulatorias, es una característica común de todo lo que forma la naturaleza, es una propiedad general de todo los objetos que existen en nuestro mundo.

Cuando De Broglie introdujo sus ideas sobre esto muchos lo tildaron de loco. Hubo un científico que afirmó "la luz está enferma ( se refería a la dualidad de la luz), ahora quieren enfermar a las partículas, al parecer es contagioso". Se necesitaba de una confirmación experimental de la hipótesis propuesta.

### Difracción de electrones. Microscopio electrónico.

Para demostrar experimentalmente que las partículas, como los electrones, poseen propiedades ondulatorias, es necesario realizar un experimento donde dichas partículas provoquen un fenómeno ondulatorio, por ejemplo la difracción.

Este experimento fue realizado en 1927 por C. Davisson y L. Germer en los Estados Unidos y por G. Thomson en Inglaterra. Consistió en dirigir un haz de electrones hacia un cristal de Níquel y observar la dirección que tenía el haz de electrones que luego salía del cristal.

La figura que se obtuvo fue una figura de difracción correspondiente a una onda cuya longitud de onda era exactamente la calculada por la relación de De Broglie. Esta fue entonces la confirmación experimental de la hipótesis de De Broglie y en el año 1929 se le otorgó el Premio Nobel de Física por su trabajo.

Hoy se conocen la difracción de muchos tipos de partículas, como neutrones, átomos de helio, de hidrógeno, etc., y este fenómeno es ampliamente utilizado para el estudio de los sólidos.

Un dispositivo práctico que se basa en las características ondulatorias del electrón es el microscopio electrónico ver figura 5, que es en muchos aspectos similar a un microscopio óptico ordinario, pero que utiliza en lugar de un haz de luz, un haz de electrones logrando aumentos mucho mayores y con un gran poder de resolución, lo que ha permitido realizar, con el microscopio electrónico, observaciones de grupos de átomos y átomos pesados aislados. El microscopio electrónico fue inventado en 1931 por M. Knoll y E. Rusca y actualmente está ampliamente difundido en laboratorios de investigación.

De manera que la generalización de la propiedad de la dualidad partícula onda para el caso de las partículas materiales fue el segundo paso en el desarrollo de la Física Cuántica.

Es necesario señalar que aún cuando todos los cuerpos materiales tienen asociada una onda cuya longitud de onda viene dada por la relación de De Broglie, esta onda no se manifiesta para cuerpos de gran tamaño, porque el valor de la longitud de onda es muy pequeño. Solamente en cuerpos, como las micropartículas, de masa muy pequeña, el valor de la longitud de onda llega a tener valores importantes. Recordemos que la constante de Planck tiene un valor del orden de  $10^{-34}$  y está en el numerador de la relación.

Hemos conocido aquí solo las ideas básicas de la Física Cuántica. Por supuesto el desarrollo de esta ciencia a lo largo del siglo XX ha sido impetuoso. Vamos a asisitir ahora al siguiente paso de este desarrollo.

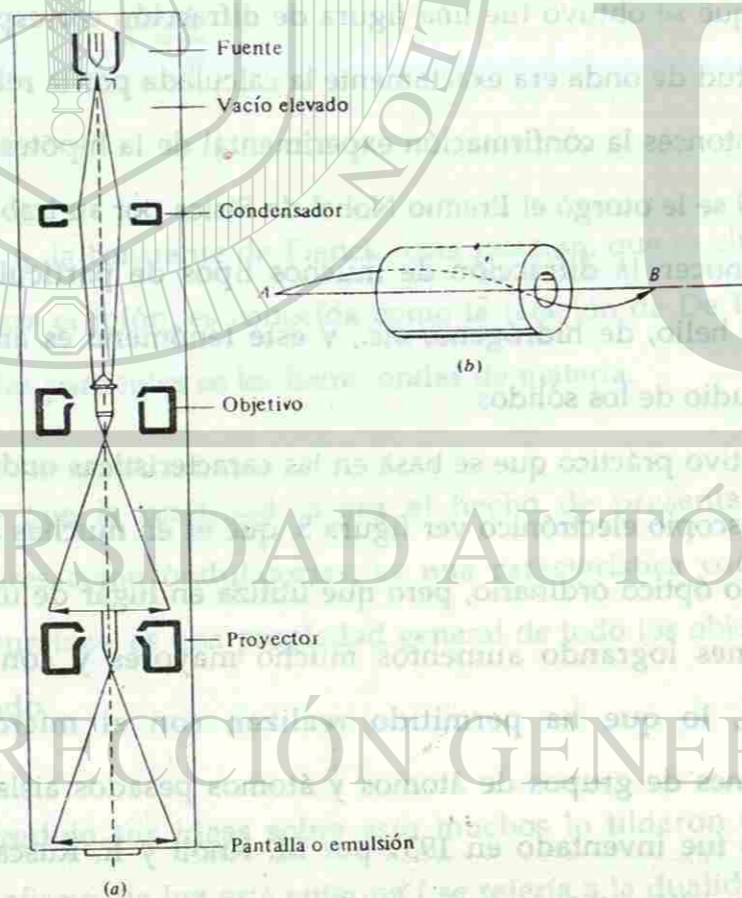


Figura 5. a) Etapas ópticas en un microscopio electrónico con lentes magnéticas. b) Acción de enfoque de una lente magnética. Como se muestra, los electrones que salen del punto A recorrerán una trayectoria helicoidal dentro de la lente magnética, porque se mueven circularmente en un campo magnético; más adelante, se volverán a enfocar en el punto B.

Ejemplo 4. Determina la longitud de onda asociada a un electrón que se mueve a una velocidad de 1,000 m/s y la asociada a una pelota de baseball lanzada por un pitcher a 30 m/s ( $m_{\text{pelota}} = 120 \text{ g}$ ).

$$v_{\text{electrón}} = 1,000 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{pelota}} = 30 \text{ m/s}$$

$$m_{\text{electrón}} = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_{\text{pelota}} = 120 \text{ g} = 0.12 \text{ kg}$$

La relación de De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad p = mv, \quad \text{sustituyendo } \lambda = \frac{h}{mv}$$

para el electrón

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \left(1,000 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 7.25 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 7.25 \times 10^{-7} \text{ m}$$

para la pelota

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{(0.12 \text{ kg}) \left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 1.83 \times 10^{-34} \text{ m}$$

$$\lambda = 1.83 \times 10^{-34} \text{ m}$$

Obsérvese que la longitud de onda asociada a la pelota es mucho menor que la asociada al electrón, por lo cual decimos que las propiedades ondulatorias sólo se revelan en el caso de partículas de masa muy pequeña.

AUTOEVALUACION

I. CONTESTA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS.

1. ¿ Cómo se les llama a las unidades de energía transportadas por una onda electromagnetica ?

-----  
 -----  
 -----

2. ¿ Qué es un cuerpo negro ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

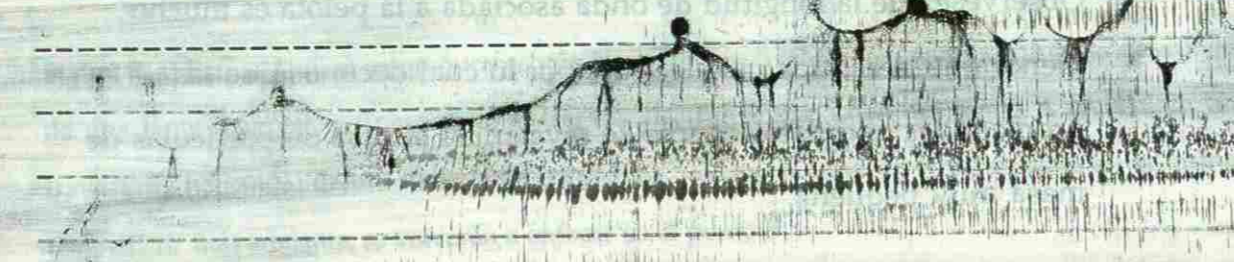
3. Explica brevemente la hipótesis de Planck que permitió explicar la radiación del cuerpo negro.

-----  
 -----  
 -----  
 -----

4. Explica brevemente en que consiste el efecto fotoeléctrico.

-----  
 -----  
 -----  
 -----

5. ¿ En que consiste la explicación correcta del efecto fotoeléctrico proporcional por Einstein ?



-----  
 -----

6. ¿ Qué es la función de trabajo ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

7. Desde el punto de vista moderno, ¿ Qué es la luz?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

8. ¿ Qué hipótesis intrdujo De Broglie sobre el comportamiento dual onda-partícula ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

9. ¿Cuál es la expresión para la longitud de onda de De'Broglie ?

-----  
 -----  
 -----  
 -----

II. RESUELVE LOS SIGUIENTES PROBLEMAS.

1. ¿Cuál es la frecuencia de la luz cuyos fotones tienen una energía de  $3.06 \times 10^{-19}$

J? R)  $4.63 \times 10^{14}$  Hz

2. Determine la energía de los fotones emitidas por una fuente de luz monocromática que emite luz de 600 nm de longitud de onda. R)  $3.3 \times 10^{-19}$  J

-----  
 -----  
 -----  
 -----

3. Un metal tiene una función de trabajo de 2.4 eV. ¿Cuál es la longitud de onda de corte para que haya fotoemisión de esta superficie? R) 517.5 nm

4. Si la función de trabajo para el zinc es de 4.3 eV, ¿cuál es la energía cinética máxima de los electrones expulsados de una superficie pulida de zinc por la línea ultravioleta de 253.7 nm del mercurio? R) 0.6 eV

5. Una superficie tiene una función de trabajo de 4 eV. ¿Cuál es la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos por la luz de frecuencia  $3 \times 10^{15}$  Hz? R)  $1.72 \times 10^6$  m/s

6. Calcular la velocidad máxima de los electrones emitidos por una superficie con función de trabajo de 3.4 eV por un fotón de 310 nm de longitud de onda. R)  $4.63 \times 10^5$  m/s

7. ¿Qué velocidad tendrá un electrón con una longitud de onda asociada de 20 nm? R)  $3.64 \times 10^4$  m/s

8. Calcule la longitud de onda asociada a un electrón que se mueve a una velocidad de 5,000 m/s. ( $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  kg) R)  $1.45 \times 10^{-7}$  m

## C. DESARROLLO DE LA FISICA CUANTICA , FISICA ATOMICA

### C.1 INTRODUCCION

En la antigüedad, en los siglos IV y V a. C., los filósofos griegos especulaban si podía existir la estabilidad en medio del cambio, o si el cambio mismo era la única característica "permanente" del universo. Algunos opinaban que debía existir algo estable, y que esto era la materia, por lo que se preguntaron cómo debería estar constituida la materia para que esta estabilidad fuera posible. Una idea presentada por Demócrito (460- 370 a. C.) establecía que la materia estaba formada por partículas muy pequeñas que podían moverse de un lado a otro, eran invisibles y las llamó átomos, la palabra griega que significa indivisible es, **atomos**, de donde proviene el término átomo, que corresponde a la partícula más pequeña en que puede dividirse la materia. Si cortamos un trozo de oro, ¿Cuántas veces podríamos cortarlo de manera que la partícula más pequeña siga siendo oro?, ¿Puede dividirse continuamente la materia?. Demócrito y otros opinaban que existe un límite, que debía haber una partícula de oro que ya no podía ser dividida.

Aristóteles (384 - 322 a. C.) no estaba de acuerdo con lo establecido por Demócrito, e insistía que la materia podía dividirse indefinidamente ( y esto es cierto si llegamos a las partículas fundamentales, pero éstas no conservan las características de los diferentes elementos). Aristóteles era un sabio tan eminente que cualquier teoría contraria a la suya no se aceptaba fácilmente, por lo que la idea de los átomos se olvidó bastante tiempo; hasta el siglo XIX, cuando John Dalton (1766 - 1844), químico y físico inglés, dió un paso muy importante en la ciencia, ya que para comprender las combinaciones químicas y las relaciones de peso en éstas, investigó cómo debería ser la materia y formuló su teoría atómica; él encontró pruebas que obligaban a creer en la existencia de los átomos aunque no pudieran ser vistos. Dalton postuló su teoría atómica en ella su descripción de los átomos, incluía en realidad algunas partículas de materia que actualmente llamamos moléculas; para Dalton un átomo era simplemente una partícula fundamental, con las características de la sustancia a la que pertenecía.



3. Un metal tiene una función de trabajo de 2.4 eV. ¿Cuál es la longitud de onda de corte para que haya fotoemisión de esta superficie? R) 517.5 nm

4. Si la función de trabajo para el zinc es de 4.3 eV, ¿cuál es la energía cinética máxima de los electrones expulsados de una superficie pulida de zinc por la línea ultravioleta de 253.7 nm del mercurio? R) 0.6 eV

5. Una superficie tiene una función de trabajo de 4 eV. ¿Cuál es la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos por la luz de frecuencia  $3 \times 10^{15}$  Hz? R)  $1.72 \times 10^6$  m/s

6. Calcular la velocidad máxima de los electrones emitidos por una superficie con función de trabajo de 3.4 eV por un fotón de 310 nm de longitud de onda. R)  $4.63 \times 10^5$  m/s

7. ¿Qué velocidad tendrá un electrón con una longitud de onda asociada de 20 nm? R)  $3.64 \times 10^4$  m/s

8. Calcule la longitud de onda asociada a un electrón que se mueve a una velocidad de 5,000 m/s. ( $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$  kg) R)  $1.45 \times 10^{-7}$  m

## C. DESARROLLO DE LA FISICA CUANTICA , FISICA ATOMICA

### C.1 INTRODUCCION

En la antigüedad, en los siglos IV y V a. C., los filósofos griegos especulaban si podía existir la estabilidad en medio del cambio, o si el cambio mismo era la única característica "permanente" del universo. Algunos opinaban que debía existir algo estable, y que esto era la materia, por lo que se preguntaron cómo debería estar constituida la materia para que esta estabilidad fuera posible. Una idea presentada por Demócrito (460- 370 a. C.) establecía que la materia estaba formada por partículas muy pequeñas que podían moverse de un lado a otro, eran invisibles y las llamó átomos, la palabra griega que significa indivisible es, **atomos**, de donde proviene el término átomo, que corresponde a la partícula más pequeña en que puede dividirse la materia. Si cortamos un trozo de oro, ¿Cuántas veces podríamos cortarlo de manera que la partícula más pequeña siga siendo oro?, ¿Puede dividirse continuamente la materia?. Demócrito y otros opinaban que existe un límite, que debía haber una partícula de oro que ya no podía ser dividida.

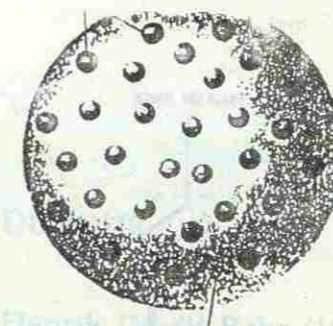
Aristóteles (384 - 322 a. C.) no estaba de acuerdo con lo establecido por Demócrito, e insistía que la materia podía dividirse indefinidamente (y esto es cierto si llegamos a las partículas fundamentales, pero éstas no conservan las características de los diferentes elementos). Aristóteles era un sabio tan eminente que cualquier teoría contraria a la suya no se aceptaba fácilmente, por lo que la idea de los átomos se olvidó bastante tiempo; hasta el siglo XIX, cuando John Dalton (1766 - 1844), químico y físico inglés, dió un paso muy importante en la ciencia, ya que para comprender las combinaciones químicas y las relaciones de peso en éstas, investigó cómo debería ser la materia y formuló su teoría atómica; él encontró pruebas que obligaban a creer en la existencia de los átomos aunque no pudieran ser vistos. Dalton postuló su teoría atómica en ella su descripción de los átomos, incluía en realidad algunas partículas de materia que actualmente llamamos moléculas; para Dalton un átomo era simplemente una partícula fundamental, con las características de la sustancia a la que pertenecía.

La presentación de la teoría de Dalton incremento las actividades en torno a la ciencia, entre ellas: las investigaciones sobre la naturaleza de las partículas, y la emisión o absorción de energía por los átomos; esta última se presenta bajo circunstancias especiales, como un espectro de luz en forma de líneas, y se encontró que los gases absorben y emiten luz a longitudes de onda características de cada uno, y gracias a esto se pudo determinar la composición del Sol, al comparar las líneas del espectro perdidas con las líneas de absorción conocidas de algunos elementos, de esta manera se descubrió el elemento helio en el Sol antes que en la Tierra. El análisis espectrográfico se basa en esta característica de los elementos y ha hecho posible determinar la composición de las estrellas. En la actualidad este análisis se utiliza para determinar la composición de aleaciones metálicas y en algunas otras áreas.

La idea de la estructura de la materia y las observaciones que se realizaron, parecían tener más sentido en términos de un modelo atómico que de un modelo continuo para describir la materia. "MODELO" como se usa en este caso, significa una abstracción mental, a menudo esbozada sobre papel, que utilizamos para explicar algunas observaciones, y si es apropiado debe satisfacer los datos observados.

### C.2 EL MODELO ATOMICO DE THOMSON

En 1904, antes de que se descubrieran los protones y los neutrones, Joseph John Thomson (1856 - 1940) físico inglés, propuso un modelo para la estructura atómica; él consideró una esfera de carga eléctrica positiva, en la que estuvieran incrustados corpúsculos de carga eléctrica negativa, (como inicialmente llamó a los electrones) por lo que muchos dieron a este modelo el sobrenombre de budín de pasas (ver figura 6). Thomson se imaginó que los electrones podían estar en movimiento, siguiendo órbitas circulares alrededor del centro de la esfera, pero si su movimiento tenía demasiada energía, supuso que el átomo podría desintegrarse, como generalmente esto no ocurre, fue un desacierto de este modelo.



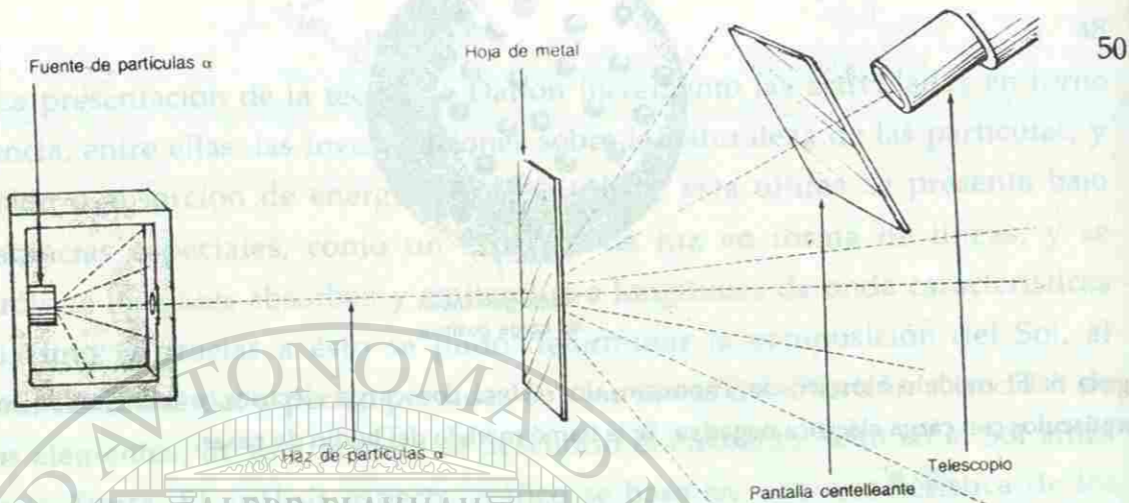
Medio gelatinoso de carga positiva

Figura 6. El modelo atómico de Thomson, una esfera con carga eléctrica, e incrustados en ella corpúsculos con carga eléctrica negativa. Se le llamó modelo del budín de pasas.

### C.3 EL MODELO ATOMICO DE RUTHERFORD

Muchas características del modelo de Thomson se examinaron y criticaron, algunas críticas condujeron a ciertas predicciones sobre el comportamiento de hojas metálicas muy delgadas frente a proyectiles atómicos que emitieran partículas alfa, llamados al principio solo rayos alfa, ya que no se conocía su naturaleza hasta que Ernest Rutherford (1871 - 1937) identificó los rayos alfa definiéndolos como partículas de tamaño atómico con una masa de 4 una (unidades de masa atómica) y una carga de dos veces la carga del electrón pero con signo contrario.

Basándose en la teoría de Thomson, Rutherford y sus colaboradores prepararon un experimento con hojas metálicas muy delgadas (ver figura 7), en el cual una de estas hojas es bombardeada con partículas alfa a alta velocidad, y observaron que la mayoría de estas partículas atravesaron la hoja metálica sin desviarse, otras chocaban y eran devueltas en sentido contrario. Rutherford pensó que el hecho de que las partículas se desviarán, o fueran devueltas en sentido contrario, indicaba que chocaban con carga de igual signo, y con una masa que pudiera detener una partícula alfa y hacerla regresar, y que si la mayoría de ellas atravesaban las hojas, esto significaba que cualquier cosa que fuera el átomo tendría que ser en su mayor parte espacio vacío; Rutherford estaba listo para proponer un modelo nuclear del átomo, con esto nació la era nuclear, y a él se le consideró el "Padre de la ciencia nuclear".



50

Figura 7. Después de bombardear la hoja de metal con partículas alfa, el equipo de trabajo de Rutherford llegó a la conclusión de que gran parte de la masa del átomo estaba concentrada en el núcleo.

El modelo de Rutherford proponía; que toda la masa del átomo, y la totalidad de la carga positiva, estaba concentrada en un conjunto pequeño y denso al centro llamado núcleo. Para cualquier átomo, el número de partículas alfa desviadas debe ser proporcional al cuadrado de la carga del núcleo (en ese tiempo se desconocía la carga del núcleo). El átomo es en su mayoría espacio vacío, ya que si imaginamos que el núcleo de un átomo tiene un diámetro de 10 centímetros, el primer electrón lo encontraríamos a un kilómetro de distancia de él, aproximadamente, para átomos de pocos electrones.

Posiblemente los electrones no llegan a chocar contra el núcleo, debido a que su movimiento circular es tan rápido, que la fuerza que los atrae queda equilibrada con la fuerza que tiende a expulsarlos hacia afuera. Pero el electrón tiene carga eléctrica, y su movimiento alrededor del núcleo debería generar una corriente en miniatura, por lo cual los átomos deberían irradiar energía constantemente y en forma continua, y conforme perdiera energía debido a la irradiación, seguiría una trayectoria espiral hacia el núcleo atraído por éste. lo cual es contrario a lo observado, ya que el espectro atómico cuando se presenta nunca es continuo, sino en líneas características para cada átomo.

Para entonces Max Planck había introducido la idea de "cuantos" o paquetes de energía, y Albert Einstein había utilizado esta idea para explicar por primera vez el efecto fotoeléctrico o teoría del fotón, donde postula que el fotón tiene una energía dada por  $h\nu$  lo cual había sido confirmado mediante la experimentación.

51

#### C.4 EL MODELO ATOMICO DE BOHR

El físico danés Niels Henrik David Bohr (1885-1962), fue a Inglaterra y se unió al grupo de Rutherford para las investigaciones sobre el átomo; comenzó con dos suposiciones: en primer lugar que la idea de Rutherford era correcta, toda la carga positiva así como la masa total del átomo estaban en un núcleo, y los electrones de alguna manera se encontraban en el exterior de éste: en segundo lugar que Planck y Einstein estaban en lo correcto, la materia podía emitir o absorber energía en "paquetes o cuantos". Además Bohr tomó en cuenta el hecho de que el átomo es estable y no irradia energía continuamente en condiciones normales; y propuso así dos postulados de su teoría atómica.

El primer postulado de la teoría atómica de Bohr establecía que un sistema atómico de un electrón girando alrededor del núcleo (consideró el sistema atómico más sencillo que es el del hidrógeno) poseía varios estados o niveles energéticos en los que no irradia ni absorbe energía electromagnética, aún cuando el electrón esté en movimiento respecto al núcleo. En tanto que el electrón permanezca en un estado determinado, el átomo no absorberá ni liberará energía, este se considera un estado estacionario, y rechaza la teoría clásica electrodinámica que podría aplicarse a macrosistemas, pero para los electrones en el átomo en un tamaño tan pequeño, no es correcta.

El segundo postulado de Bohr se basa en el hecho de que en el átomo hay una transición de un estado estacionario a otro, cuando el electrón ha pasado de un nivel de energía a otro, y que el átomo emite o absorbe energía electromagnética en este proceso, y la energía de un electrón es la suma de la energía cinética más potencial debida a la fuerza de atracción entre el electrón y el núcleo, por lo que es necesario realizar un trabajo para mover un electrón desde una órbita que está cerca del núcleo hasta una más lejana. Por lo tanto la energía de un electrón en una órbita cercana al núcleo es menor que la del electrón en una órbita más lejana. Los electrones en estado excitado o energizados, tienen órbitas más grandes y por lo tanto mayor energía. Bohr postuló que la diferencia de energía de un nivel a otro es igual a la energía del fotón, esto es:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

donde:

$h$  = constante de Planck

$\nu$  = frecuencia

$E_2$  = estado de mayor energía

$E_1$  = estado base, de menor energía

Cuando el electrón regresa del estado de mayor energía al estado base emite un fotón, es decir la energía correspondiente a un fotón.

### C.5 SERIES ESPECTRALES DEL HIDROGENO

Una de las formas para detectar la energía emitida por un electrón al pasar de un orbital a otro es: si una muestra de hidrógeno se activa ó excita (en ausencia de aire), haciendo pasar una chispa a través de ella, emite radiaciones electromagnéticas (ver figura 8), esta luz emitida se enfoca para que pase a través de una rendija, hacia un prisma y se proyecta sobre una placa fotográfica, cuando esta se revela se encuentra que la luz no afecta toda la placa, aparecen ciertas líneas claramente definidas, cada línea corresponde a un rango muy angosto de frecuencia, que se puede considerar que la línea representa la luz de una sola frecuencia, o de una longitud de onda, a este grupo de líneas se le conoce como espectro de líneas del hidrógeno, ya que no emite todos los colores del arco iris, solo algunos, y cada elemento emite ciertos colores característicos a ciertas longitudes de onda.

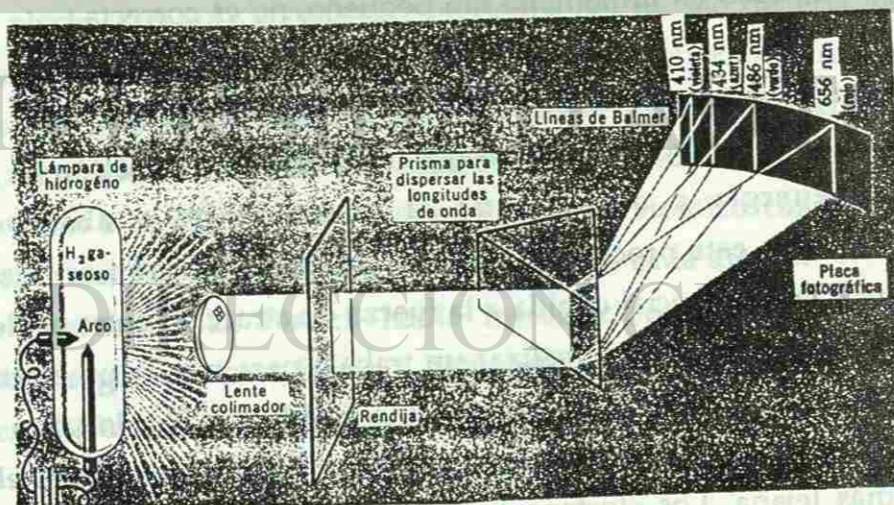


Figura 8. Cuando la luz de una lámpara de hidrógeno se enfoca a través de la rendija sobre una placa fotográfica y a través de un prisma que dispersa, o separa, la luz en las frecuencias que la componen, aparecerán líneas de color en la placa. La serie de líneas de Balmer, que se observa en la región visible del espectro electromagnético.

Un físico matemático suizo Johann Balmer (1825-1898) había observado cierta regularidad en el espaciado de estas líneas. Sus longitudes de onda satisfacían perfectamente la ecuación conocida como ecuación de Balmer:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

En donde

$\lambda$  = longitud de onda

$R = 1.096 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  (constante de Rydberg)

$n = 3, 4, 5, 6, \dots$

Hasta que Bohr propuso su teoría, la constante  $R$  era sólo un número que hacía que las frecuencias observadas satisficieran la ecuación. En esta forma cuando Bohr hizo sus cálculos, los resultados le permitieron predecir que un grupo de líneas del espectro del hidrógeno se ajustarían a la ecuación.

$$\frac{1}{\lambda} = \text{Constante} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

En donde la constante queda en función de otras constantes físicas conocidas, como la constante de Planck, carga del electrón, la masa del electrón,  $\pi$  y otras.

La ecuación de Bohr y la de Balmer pueden ser idénticas sólo si la constante tiene el valor de la constante de Rydberg

Utilizando los mejores valores de la masa  $m$  y de la carga "e" de un electrón y de la constante  $h$ , de Planck, todos ellos determinados en experimentos independientes, Bohr encontró un valor de  $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ , que difiere en menos de 0.1 % de la constante de Rydberg; este resultado asombró al mundo científico.

Además de la Serie de Balmer existen muchos otros grupos de líneas en el espectro del hidrógeno, unas en la zona infrarroja y otra en la ultravioleta, (ver

figura 9). La Serie de Balmer corresponde a saltos cuánticos desde niveles superiores de energía, hasta el segundo nivel; esto es el significado del 2 elevado al cuadrado

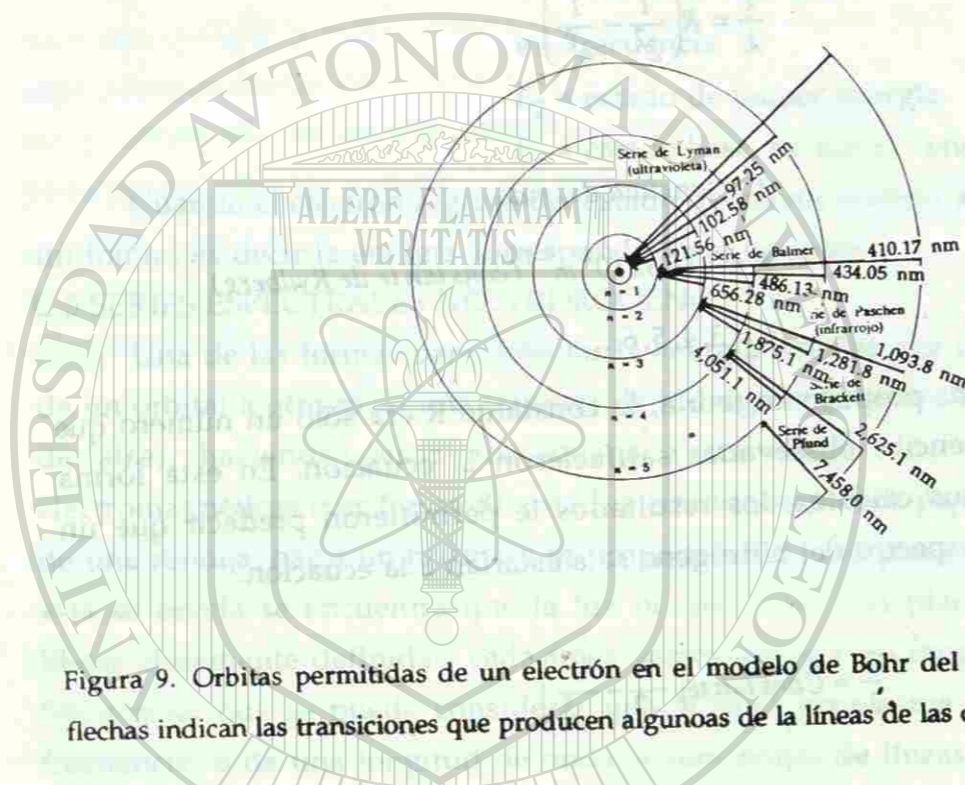


Figura 9. Órbitas permitidas de un electrón en el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno. las flechas indican las transiciones que producen algunas de las líneas de las distintas series.

La siguiente es una ecuación general para todas las series de líneas del espectro del hidrógeno.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad n_i = (n_f + 1), (n_f + 2), (n_f + 3), \dots$$

En donde

- $n_f = 1$  Serie de Líneas de Lyman
- $n_f = 2$  Serie de Balmer
- $n_f = 3$  Serie de Paschen
- $n_f = 4$  Serie de Brackett (ver figura 9).

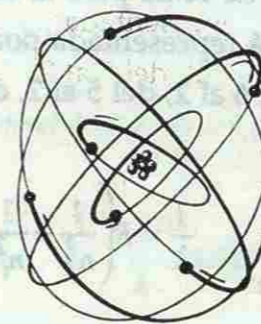


Figura 10. El modelo planetario del átomo de Bohr postulaba que los electrones se mueven en órbitas fijas alrededor del núcleo.

Bohr postuló que sus estados o niveles de energía corresponden a una trayectoria circular, por la que un electrón puede moverse; a estas trayectorias las llamó órbitas debido a su semejanza con las que describen los planetas alrededor del Sol. Por esto el modelo del átomo de Bohr recibió el nombre de modelo planetario (ver figura 10), aunque en realidad el tipo de trayectoria no es muy importante, lo más importante en su teoría es que **un electrón sólo puede poseer ciertos valores de energía, que se conocen como permitidos y no cualquier valor.** La energía, puede medirse y calcularse con las ecuaciones derivadas de los postulados de Bohr. Su postulado básico, que los electrones pueden "residir" en un átomo sólo en **niveles energéticos permitidos**, logró permanecer; pero el modelo del sistema Solar no permaneció, ya que para niveles superiores de energía son otras las trayectorias del electrón; es decir se describen otras formas de orbitales atómicos como se les denominó posteriormente, aquí surgieron los trabajos de otros científicos como de De Broglie, Schrödinger, Heisenberg y muchos otros, en la búsqueda del punto en que probablemente se encontrara el electrón cuando tuviera los valores permitidos de energía. Se encontró una ecuación o un conjunto de ecuaciones para cada estado energético permisible, y se encerraron con una envolvente imaginaria regiones que tenían muy alta probabilidad de tener un electrón de energía dada; y a estas regiones se les denominó "Orbitales Atómicos".

Ejemplo 1. Calcule las longitudes de onda para la serie de Balmer (ver figura 4). La serie de Balmer está representada por la energía emitida cuando el electrón va del nivel 6 al 2, del 5 al 2, del 4 al 2 y del 3 al 2.

utilizando la ecuación:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$n_i$  = nivel inicial

$n_f$  = nivel final

Del nivel 6 al 2:  $\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{6^2} \right)$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} (0.222222)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 2;437,777.86 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 4.1020 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Del nivel 5 al 2:  $\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{5^2} \right)$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} (0.21)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 2;303,700.86 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 4.3408 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Del nivel 4 al 2:  $\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2} \right)$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} (0.1875)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 2;056,875 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 4.861 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Del nivel 3 al 2:  $\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$

$$\frac{1}{\lambda} = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} (0.13888)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1;523,611.11 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 6.563 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Como puede observarse, el valor de la longitud de onda más grande corresponde a la transición de  $n_i = 3$  a  $n_f = 2$ .

AUTEVALUACION

I. CONTESTA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS.

1. Describe brevemente el modelo atómico de Thomson.

-----  
-----  
-----  
-----  
-----

2. Describe brevemente el modelo atómico de Rutherford.

-----  
-----  
-----  
-----  
-----

3. ¿Cuáles son los postulados de Bohr para el átomo de hidrógeno?

-----  
-----  
-----  
-----  
-----

4. ¿Qué es un estado estacionario?

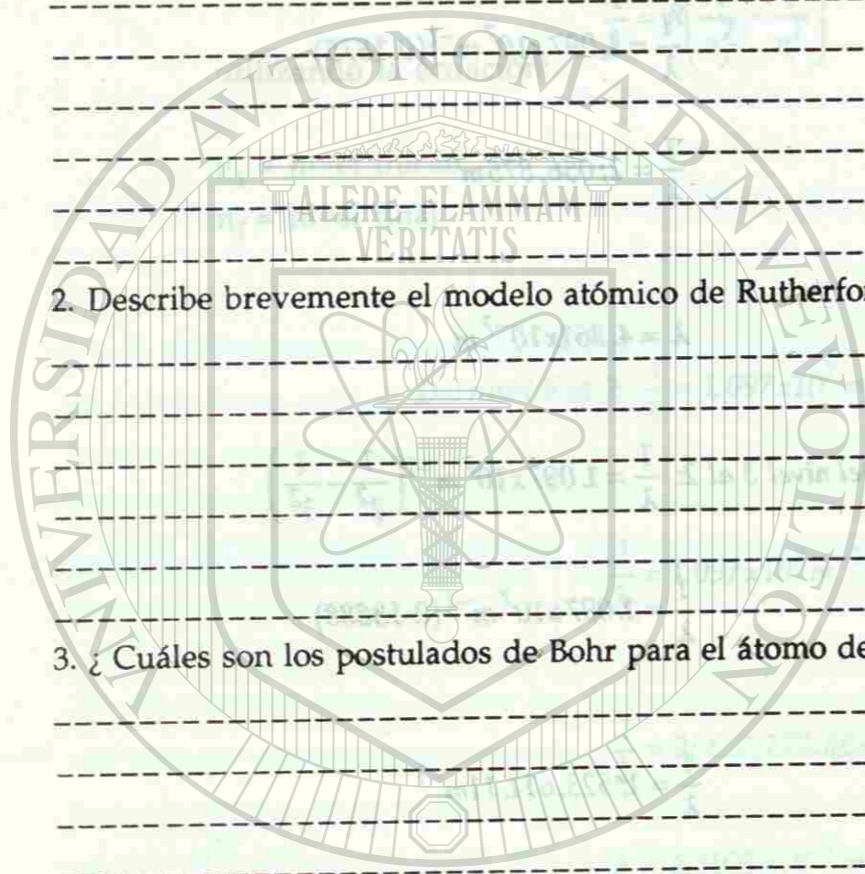
-----  
-----  
-----  
-----  
-----

5. ¿Cómo explica la teoría de Bohr la emisión y la absorción de energía?

-----  
-----  
-----  
-----  
-----

6. ¿Cuáles son las orbitas de mayor energía en el modelo de Bohr?

-----  
-----



II. RESUELVE LOS SIGUIENTES PROBLEMAS.

1. ¿Cuál es la longitud de onda de la línea de Balmer que corresponde a la transición de  $n_i = 5$  a  $n_f = 2$ ?  
R) 410.2 nm

2. Calcular la mayor longitud de onda de la serie de Lyman. R) 121.6 nm

3. Una descarga de hidrógeno emite una luz cuya longitud de onda es de 396 nm. ¿Cuál es la transición que produce esta emisión?  
R)  $n = 7$  a  $n = 2$

U A N L

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS



## D. FISICA NUCLEAR

### D.1 INTRODUCCION

La física nuclear es el área de la física que más rápidamente ha encontrado aplicaciones en diferentes campos del saber humano. Después del descubrimiento de la radiactividad por Berquerel, en 1896, muchos científicos estudiaron este nuevo fenómeno, mediante el cual hemos logrado entender la estructura del núcleo y lograr aplicaciones útiles en la medicina, en la producción de energía eléctrica y en otros campos. Los estudios del núcleo han permitido entender las propiedades de las partículas que lo componen y la naturaleza de las fuerzas que mantienen unido el núcleo.

El descubrimiento de la fisión nuclear en 1939, fue uno de los acontecimientos que hacen época, ya que abrió el camino hacia una fuente de energía totalmente nueva, mediante la utilización de la energía interna del núcleo atómico.

Durante las últimas décadas, las necesidades energéticas han sido cubiertas por los combustibles fósiles, principalmente carbón, petróleo y gas natural. Por otra parte, se sabe que estas fuentes de energía se agotarán en un futuro cercano, de aquí que es preciso buscar nuevas fuentes alternativas de energía.

Con lo anterior se da una idea de la importancia y la necesidad de estudiar el núcleo atómico, la radiactividad y sus aplicaciones, aunque de manera breve, pero precisa.

### D.2 CARACTERISTICAS DEL NUCLEO

#### NUMERO ATOMICO Y NUMERO MASICO

Como, ya se ha dicho, en el capítulo anterior, el átomo consta de un núcleo con carga positiva, rodeado de un cierto número de partículas cargadas negativamente, llamadas electrones, de tal forma que en conjunto el átomo resulta eléctricamente neutro. Los núcleos atómicos están constituidos por dos partículas fundamentales: el protón y el neutrón, que se designan con el nombre genérico de nucleón. El protón transporta una unidad de carga positiva, igual en magnitud a la carga del electrón. Se identifica, en realidad, con el núcleo del átomo de hidrógeno, es decir un átomo de hidrógeno que ha perdido su único

electrón. El neutrón es ligerísimamente más pesado que el protón, y como su nombre lo indica no transporta carga eléctrica.

Para un elemento químico determinado, el número de protones existente en el núcleo atómico, que es igual al número de cargas positivas que transporta, recibe el nombre de número atómico del elemento, y se representa generalmente por el símbolo  $Z$ . Es idéntico al número de orden del elemento en la tabla periódica de los elementos químicos. Así pues, el número del hidrógeno es 1, el del helio es 2, el de litio es 3, y así sucesivamente, hasta llegar al número 92 correspondiente al uranio, que es el elemento de masa atómica más elevado, en cantidades apreciables, en la naturaleza. Cierta número de elementos han sido preparados artificialmente.

El número total de nucleones (protones y neutrones) existentes en el núcleo atómico recibe el nombre de número másico del elemento y se representa por la letra  $A$ . Como  $Z$  es el número de protones, el número de neutrones contenidos en el núcleo atómico vendría representado por  $A - Z$ . Por ejemplo, el uranio cuyo número atómico es 92 y su número másico es 239, se tiene  $A - Z = 239 - 92 = 147$  neutrones en el núcleo.

#### ISOTOPOS

Lo que determina la naturaleza química de un elemento es su número atómico ( $Z$ ), es decir, el número de protones en su núcleo. Átomos cuyos núcleos contiene el mismo número de protones (igual número atómico), pero que difieren en el número másico, son desde el punto vista químico, esencialmente idénticos, presentando diferencias muy marcadas en sus características nucleares. Tales núcleos con idéntico número atómico y diferente número másico, recibe el nombre de isótopos. Los isótopos son, en general químicamente indistinguibles, pero poseen masa atómica diferente. La forma general para el símbolo de un isótopo es  ${}^A_Z E$ , donde  $E$  representa el símbolo del elemento,  $A$  su número másico y  $Z$  su número atómico. Como por ejemplo

isótopos de uranio





isótopos de hidrógeno



representaciones de diferentes isótopos



En física nuclear y disciplinas afines, las masas de los átomos, núcleos y partículas se han expresado invariablemente en unidades de masa atómica (uma). La unidad de masa atómica se define en función de la masa del isótopo de carbono ( ${}^{12}_6\text{C}$ ), de tal forma que una uma es igual a 1/12 de la masa del isótopo

( ${}^{12}_6\text{C}$ ), la cual equivale a  $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

#### ENERGÍA DE ENLACE

Rutherford descubrió que el núcleo del átomo es un cuerpo muy pequeño que se encuentra en el centro del átomo. Hoy en día, se sabe que el radio del núcleo varía entre 1.3 fm ( $1.3 \times 10^{-15} \text{ m}$ ) en el hidrógeno y 8.1 fm ( $8.1 \times 10^{-15} \text{ m}$ ) en el uranio.

Como ya se dijo, el núcleo del átomo está compuesto por protones con carga positiva, y por neutrones. Los protones están muy unidos, aún cuando se espera que la fuerza eléctrica de repulsión los separe. Esto no sucede ya que existe otra fuerza, de atracción, más fuerte dentro del núcleo. A esta fuerza se le conoce como la fuerza nuclear fuerte. Esta fuerza actúa también entre los protones y los neutrones que se encuentran muy cerca. La fuerza nuclear fuerte actúa entre dos protones, entre un protón y un neutrón y entre dos neutrones. En todos los casos, es de atracción y es de igual magnitud.

La fuerza nuclear fuerte retiene a los nucleones dentro del núcleo. Si se quiere remover un nucleón, hay que realizar un trabajo para vencer la atracción de la fuerza nuclear fuerte, o sea, hay que añadir energía al núcleo. La energía de enlace (E.E) de un núcleo es la energía que se requiere para separar a todos los nucleones que lo componen.

Para romper un núcleo hace falta aplicar energía y además, se ha demostrado, de manera precisa, que la masa de un núcleo es menor que la suma de las masas de los nucleones que lo componen por separado. A esto se le conoce como el defecto másico o defecto de masa. La relación  $E = mc^2$  como ya se ha visto, establece la relación de la masa y la energía. Para nuestro caso particular, esta expresión relaciona a la E . E . con el defecto de masa, de la siguiente forma

$$E . E = \Delta m \cdot c^2$$

donde

$\Delta m$  representa el defecto de masa. Lo cual indica que existe una equivalencia entre la energía de enlace y el defecto másico. Por ejemplo, el

núcleo de helio ( ${}^4_2\text{He}$ ) consiste de dos protones y dos neutrones. La masa de un protón es de 1.007825 uma y la de un neutrón es de 1.008665 uma. De éste modo, la suma de las masas de los nucleones que componen el núcleo de helio es igual a la suma de las masas de dos protones y de dos neutrones es decir es de 4.032980 uma. Sin embargo, las mediciones cuidadosas que se han hecho de la masa del núcleo de helio es de 4.00150 uma, de lo cual se observa que la masa del núcleo de helio es menor que la de sus constituyentes. Para separar un núcleo de helio en dos protones y sus dos neutrones, se requiere una cantidad de energía igual al energía de enlace (E . E) del núcleo de helio. Usualmente, la masa se mide en uma. Para la energía se utiliza el electrón - volt, el cual quivale a la energía que adquiere un electrón cuando se acelera en una diferencia de potencial de 1 volt. De que se tiene que 1 eV equivale a  $1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ ., de tal forma que si queremos encontrar la equivalencia de una unidad de masa atómica en electrón volt, se tiene que

$$E = mc^2$$

$$E = (1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}) \left( 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2$$

$$E = 14.9 \times 10^{-11} \text{ kg} \left( \frac{1 \text{ eV}}{1.60 \times 10^{-19} \text{ J}} \right)$$

$$E = 9.31 \times 10^8 \text{ eV}$$

$$E = 931 \text{ MeV}$$

Esta es la energía a la que equivale 1 uma.  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ .

Ejemplo 1 La energía de enlace para el núcleo de helio será.

$$\text{masa de los dos protones } 2(1.007885 \text{ uma}) = 2.015650 \text{ uma}$$

$$\text{masa de los dos neutrones } 2(1.008665 \text{ uma}) = 2.017330 \text{ uma}$$

$$\text{masa de los nucleones} = 4.032980 \text{ uma}$$

$$\text{masa de núcleo de Helio} = 4.00150 \text{ uma}$$

$$\text{defecto másico} = 0.03148 \text{ uma}$$

$$E.E = 0.03148 \text{ uma} \left( \frac{931 \text{ MeV}}{1 \text{ uma}} \right)$$

$$E.E = 29.30 \text{ MeV}$$

Para calcular la energía de enlace por nucleón, que es la energía necesaria para separar un nucleón del núcleo, se divide la energía de enlace ( $E.E$ ) entre el número de nucleones, es decir,

$$\frac{E.E}{A} = \frac{29.30 \text{ MeV}}{4} = 7.32 \text{ MeV}$$

### D.3 EL DECAIMIENTO RADIOACTIVO

En 1896 Henri Becquerel trabajó con compuestos que contenían uranio. El encontró que las placas fotográficas que se exponían se nublaban total o parcialmente, cuando se exponían a los compuestos de uranio. Esto le sugirió que algún tipo de rayo había pasado a través de las cubiertas de las placas. Se ha descubierto que otros materiales también emiten estos rayos penetrantes. Los materiales de este tipo se llaman radiactivos y se dice que sufren un decaimiento radiactivo. En 1899, Rutherford descubrió que los compuestos de uranio emiten tres tipos de radiación, separándolos de acuerdo a su capacidad para penetrar, en

radiación  $\alpha$ ,  $\beta$ , y  $\gamma$ . La radiación  $\alpha$ , no podía penetrar una hoja de papel descubriéndose posteriormente que eran núcleos de átomo de helio. Las partículas  $\beta$ , fueron identificadas como electrones de alta velocidad que pueden penetrar hasta 6 mm de aluminio. Los rayos  $\gamma$ , que son fotones de alta energía, pueden atravesar hasta varios centímetros de plomo.

Como las partículas  $\alpha$  contienen protones y neutrones, deben provenir del núcleo de un átomo: de tal forma que al emitir una partícula  $\alpha$ , en el proceso conocido como decaimiento  $\alpha$ , el núcleo quedará con una masa y una carga eléctrica diferente a la que tenía originalmente.

Un cambio en la carga eléctrica del núcleo implica que el elemento radiactivo ha cambiado a un elemento diferente. Dado que el número másico de una partícula  $\alpha$  es cuatro ( ${}^4_2\text{He}$ ), por lo tanto, cuando un núcleo emite una partícula  $\alpha$ , su número de masa se reduce en cuatro. Como el número atómico de una partícula  $\alpha$ , es dos, por lo tanto, el número atómico del núcleo se reduce en dos. Por ejemplo, cuando el uranio - 238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) emite una partícula  $\alpha$ , el número atómico  $Z$  cambia de 92 a 90, correspondiente éste al elemento Torio. El número de masa se reduce en cuatro  $A = 238 - 4 = 234$ . De aquí que se forma un núcleo del isótopo en torio 234 por emisión de una partícula  $\alpha$ .

Las partículas  $\beta$  son electrones emitidos por el núcleo. Como la masa de un electrón es una fracción muy pequeña de una uma, la masa de un núcleo, que sufre un decaimiento  $\beta$ , cambia muy poco. El número de masa permanece igual. Al emitirse un electrón, un neutrón en el núcleo se convierte en protón, de ahí que el número de protones, y por tanto el número atómico, aumenta en uno. Por ejemplo, el núcleo del torio 234 ( ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ) es inestable, emitiendo una partícula  $\beta$  y se convierte en un isótopo de protactinio ( ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ ).

La radiación  $\gamma$  se debe a una liberación de energía por parte del núcleo. El núcleo puede quedar con un exceso de energía, como resultado de un proceso, por ejemplo una reacción nuclear o una desintegración  $\alpha$  o  $\beta$ . El rayo  $\gamma$  es un

fotón de alta energía. En el decaimiento  $\gamma$  no cambia ni el número atómico ni el número de masa.

Los elementos radiactivos, por lo general, siguen una serie de desintegraciones sucesivas, hasta formar un núcleo estable.

Cuando cambia el número de neutrones o de protones en un núcleo, decimos que ha ocurrido una reacción nuclear. La emisión de partículas, por los núcleos radiactivos, es una forma de reacción nuclear. En estas reacciones, el núcleo radiactivo libera parte de su exceso de energía en forma de energía cinética de las partículas emitidas.

Las reacciones nucleares pueden expresarse en forma de ecuaciones. Estas ecuaciones facilitan el cálculo del número atómico y del número de masa por ejemplo, el decaimiento  $\alpha$  del uranio 238 del cual resulta el torio 234 se representa de la siguiente forma



la cual se lee, " el uranio 238 se transforma en torio 234 al emitir una partícula  $\alpha$  ( ${}^4_2\text{He}$ )". En estas reacciones nucleares, se conserva tanto el número atómico como la masa atómica, ya que ninguna partícula se destruye en el proceso.

#### LA FISION NUCLEAR

Hacia 1930, los científicos creían en la posibilidad de obtener energía útil, a partir de la fisión nuclear, en donde la fisión consiste en la división de un núcleo en dos o más núcleos más ligeros llamados fragmentos de fisión. Muchos científicos se percataron de que la fisión podría utilizarse como una gran fuente de energía. Para lograrlo, se bombardea un núcleo pesado con neutrones, por ejemplo, el isótopo de uranio ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) se fisiona al bombardear con neutrones, obteniéndose la siguiente reacción nuclear ver figura 11

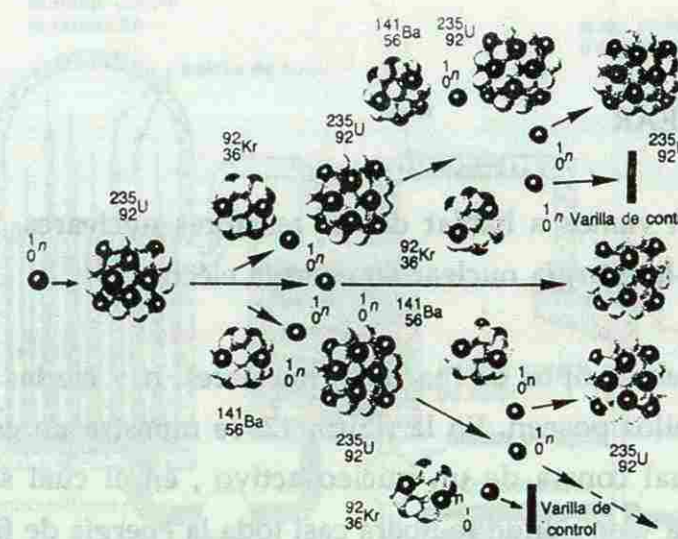
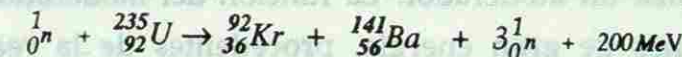


Figura 11. Esquema de la fisión de un núcleo de uranio.



El lado izquierdo de la ecuación nos indica que un neutrón ( ${}_0^1n$ ) reacciona con un núcleo de ( ${}_{92}^{235}\text{U}$ ) y el lado derecho se interpreta como el resultado de esta reacción nuclear, en donde se produce kriptón ( ${}_{36}^{92}\text{Kr}$ ), bario ( ${}_{56}^{141}\text{Ba}$ ) y tres neutrones ( $3{}_0^1n$ ), y se libera una energía de 200 MeV.

La energía liberada (200MeV) en la fisión se puede calcular, determinando la masa de los núcleos a cada lado de la ecuación. De la ecuación anterior, la masa total a la izquierda de la ecuación es 0.215 una mayor que la masa total a la derecha. Esta diferencia en masa equivale a 200 MeV de energía, la cual se libera en la reacción nuclear.

Uno de los tres neutrones que se liberan en la fisión del uranio, puede utilizarse para fisionar otro núcleo de uranio. Si hay suficiente material de uranio, este proceso puede continuar en forma indefinida y se crea una reacción en cadena.

## EL REACTOR NUCLEAR

A continuación vamos a hablar de los reactores nucleares. En una planta nuclear se transforma la energía nuclear en energía eléctrica.

Aunque existen diferentes tipos de reactores nucleares, hay ciertas características comunes que todos ellos poseen. En la figura 12. se muestra un esquema de un reactor nuclear, el cual consta de un núcleo activo, en el cual se mantiene el material que se fisiona y en donde se libera casi toda la energía de fisión en forma de calor, el núcleo del reactor contiene el combustible nuclear.

Es frecuente que la mayoría de las fisiones sean producidas por neutrones lentos, por lo cual se utiliza un moderador. La función del moderador no es otra que frenar los neutrones de gran energía, procedentes de la reacción de fisión principalmente por colisiones elásticas. Los mejores moderadores son aquellos que están constituidos por elementos de números másicos pequeños, con poca tendencia a capturar neutrones, por ejemplo, el agua ordinaria, el agua pesada (óxido de deuterio), berilio, grafito, etc.

En un reactor nuclear hay uranio en cientos de varillas de metal. Las varillas se sumergen en agua, que sirve como moderador y como vehículo para transferir la energía térmica que produce la fisión del uranio. Entre las varillas de uranio se colocan otras varillas hechas de metal cadmio, llamadas varillas de control, que absorben neutrones rápidamente. Estas varillas de control sirven para controlar la reacción en cadena, al sacarse las varillas de control aumenta la liberación de energía.

La energía liberada en la fisión calienta el agua que está alrededor de las varillas de uranio. Esta agua, que se mantiene a presión alta para que no hierva, se bombea a un compartimento en donde el calor se transfiere a otra agua a menor presión, haciéndola hervir (ver figura 12). El vapor producido se utiliza para mover una turbina. Las turbinas están conectadas a unos generadores que producen energía eléctrica. Aproximadamente el 10 % de la energía eléctrica que se consume en los E.U. de N. se produce de esta forma, y en países como Francia el 70 % de su energía eléctrica es de origen nuclear.

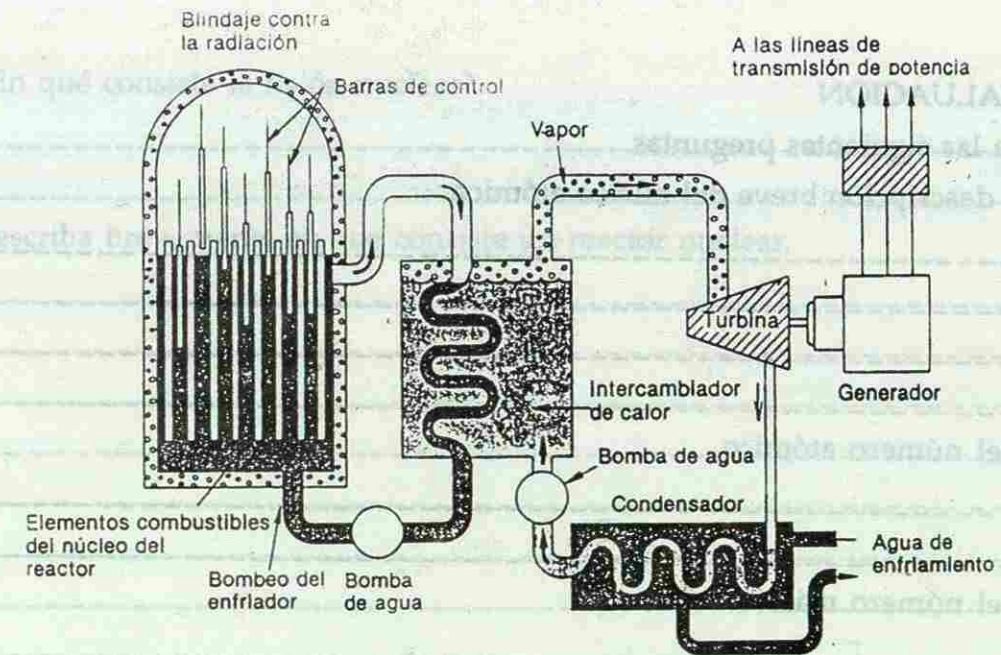


Figura 12. Esquema de un reactor nuclear y de las instalaciones para la producción de energía eléctrica.

### El reactor nuclear de Laguna Verde Veracruz.

Esta central nucleolétrica ocupa una área de 370 Has. en la costa del Golfo de México, en el municipio de Altolucero, Veracruz, a 70 km de la cd de Veracruz y a una altura de 18 m sobre el nivel del mar. Es propiedad de la Comisión Federal de Electricidad y el reactor es del tipo BWR (reactor de agua hirviente), diseñado por la General Electric de los E.U.A.

El combustible que utiliza es de dióxido de uranio ( $UO_2$ ) ligeramente enriquecido, en forma de cilindros cerámicos contenidos dentro de tubos metálicos hechos a base de una aleación de zirconio.

El sistema turbina - generador esta diseñado para recibir el vapor de agua y convertir la energía del vapor de agua en energía eléctrica, tiene una capacidad para generar una potencia neta de 654 MWe (megawatts eléctricos).

## AUTOEVALUACION

### I. Contesta las siguientes preguntas.

1. Da una descripción breve del núcleo atómico.

-----

-----

-----

2. Define el número atómico.

-----

-----

-----

3. Define el número másico.

-----

-----

-----

4. ¿Qué es un isótopo?

-----

-----

-----

5. Define la energía de enlace.

-----

-----

-----

6. Define el defecto másico.

-----

-----

-----

7. ¿En qué consiste el decaimiento  $\alpha$ ?

-----

-----

-----

8. ¿En qué consisten las partículas  $\beta$ ?

-----

-----

-----

9. ¿En qué consiste la radiación  $\gamma$ ?

-----

-----

-----

10. ¿En qué consiste la fisión nuclear?

-----

-----

-----

11. Describa brevemente en que consiste un reactor nuclear.

-----

-----

-----

-----

-----

-----

### II. Resuelve los siguientes problemas.

1. Calcular el defecto de masa y la energía de enlace, para los siguientes núcleos

a)  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , La masa del núcleo es de 55.92066uma.

b)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , La masa del núcleo es de 238.0003uma.

2. Completa las siguientes reacciones nucleares

a)  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \text{-----}$

b)  ${}^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow \text{-----} + {}^4_2\text{He}$

c)  ${}^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{214}_{84}\text{Po} + \text{-----}$





JUAN

SIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO  
ECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTE