TEMA 2.- LA FÍSICA CLÁSICA

LA FÍSICA CLÁSICA

Desarrollo histórico de la Mecánica clásica.

Desarrollo histórico de la Termodinámica.

Desarrollo histórico de la Óptica.

Desarrollo histórico del electromagnetismo.

Desarrollo histórico de la Mecánica Clásica

La Mecánica es quizás la disciplina de la Física que antes comenzó a desarrollarse. El movimiento de los planetas en la bóveda celeste es algo que ha atraído la curiosidad del ser humano desde su aparición como especie. Así la arqueología ha determinado con un alto grado de certeza que muchos monumentos prehistóricos eran en realidad observatorios astronómicos que indicaban los solsticios de verano e invierno y los equinoccios de otoño y primavera.



Stonehenge (Gran Bretaña)



Carnac (Francia)



Goseck (Alemania)



Templo de Kukulkan, Chichén Itzá (México)

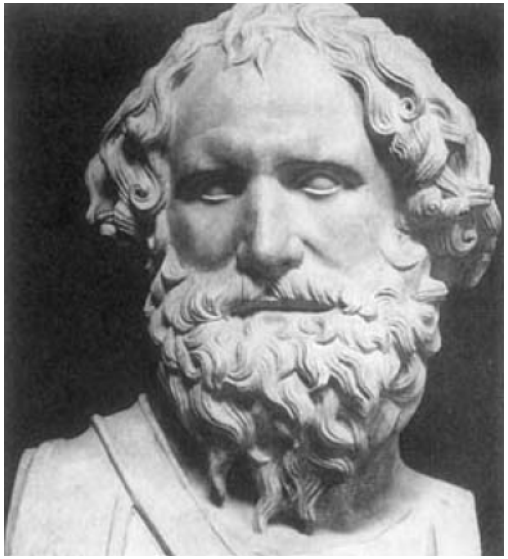
Sin embargo, como en la mayoría de las ramas del conocimiento, la cultura Griega fue la primera en abordar la mecánica desde un punto de vista científico.

Así, Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.) es el primero que introduce el concepto de fuerza que, según él, aparece como consecuencia del contacto entre las cosas y son las responsables del movimiento uniforme. Por otro lado es el primero en analizar la gravedad y concluir (erróneamente) que los cuerpos más pesados caen más rápido que los más ligeros. Esta teoría se mantuvo vigente casi 2000 años hasta el siglo XVI.

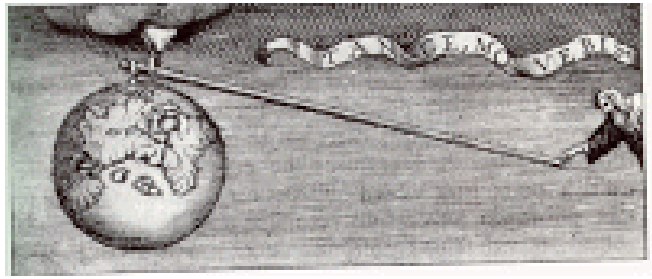


Aristóteles

Arquímedes de Siracusa (287 ac – 212 ac) descubrió diferentes comportamientos de los sistemas mecánicos. Así por ejemplo a él debemos el Principio de Arquímedes que permite calcular la fuerza hidrostática sobre un cuerpo sumergido (Eureka) y la ley de la palanca "Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo…". Por otro lado, utilizo sus conocimientos de mecánica para desarrollar diferentes inventos como: el Tornillo de Arquímedes (bomba), máquinas de guerra contra invasiones Romanas, Poleas, etc.



Arquímedes



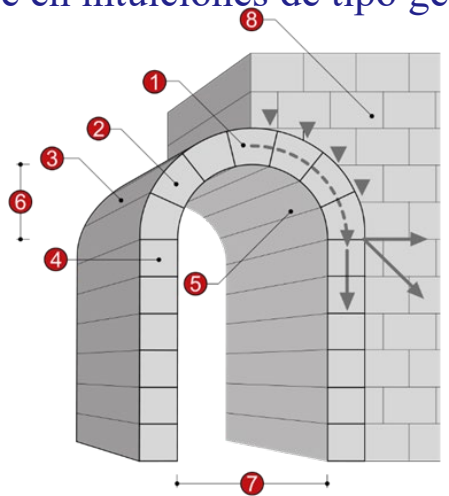
Otro ejemplo del conocimiento del comportamiento mecánico de los sistemas es la construcción de los arcos. El arco posee en la historia de la construcción un periodo de seis mil años. Aparece por primera vez en la arquitectura de Mesopotamia y se transmite a Europa, mediante su uso en el Imperio Romano, hasta alcanzar su máximo esplendor en el siglo XVI. Esto se produce debido a la intuición básica de los constructores medievales, que sin conocer la teoría mecánica del arco, construyen catedrales y puentes que permanecen edificados hasta hoy en día. La historia se puede decir que pasa por tres etapas:

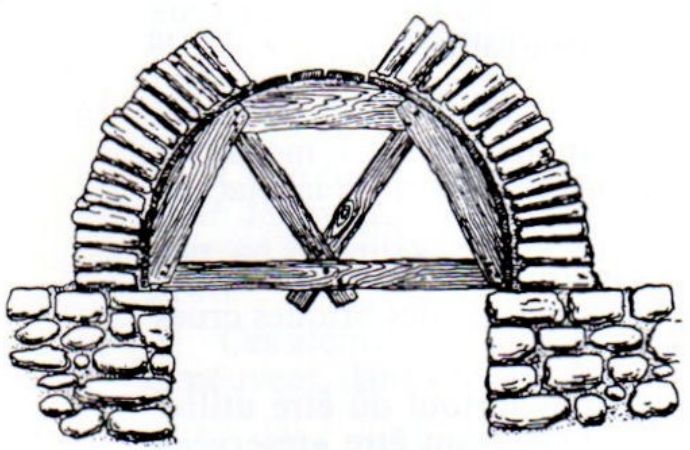
1.- Una primera en la que se elaboran arcos siguiendo la intuición y experiencia de los constructores.

2.- Otra en la que se abstraen propiedades empíricas en modelos geométricos (algunos de ellos sin inspiración científica).

3.- Una tercera en la que los modernos modelos analíticos permiten saber como "funciona" un arco.

El desarrollo empírico duró hasta el siglo XV mientras que podemos considerar que el científico comenzó en el año 1670 cuando el físico Robert Hooke formula el problema en términos científicos. En los siglos intermedios se hicieron aportaciones interesantes por diferentes autores como Leonardo da Vinci basándose en intuiciones de tipo geométrico.





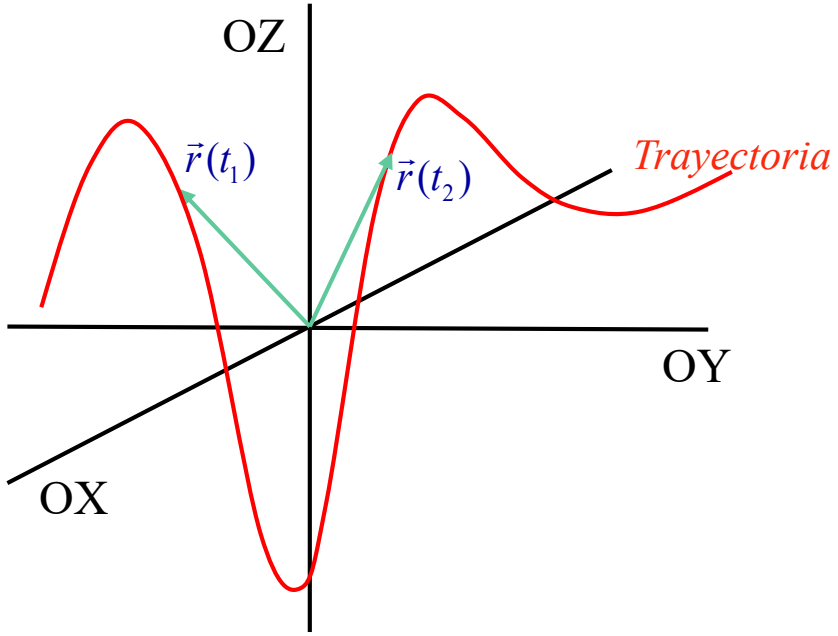
A finales del siglo XVI y sobre todo durante el siglo XVII, todos estos conocimientos y otros muchos que no hemos comentado aquí que tienen que ver con el movimiento comenzaron a analizarse desde un punto de vista Científico.

Aunque fueron muchos los investigadores que hicieron su aportación en el desarrollo de la dinámica aquí consideraremos sólo los más representativos:

Descartes (1596-1650): Aunque muchos otros científicos hicieron aportaciones en este sentido se considera a Descartes como el "padre" del sistema de ejes cartesianos y vector posición para describir matemáticamente el movimiento de un sistema.

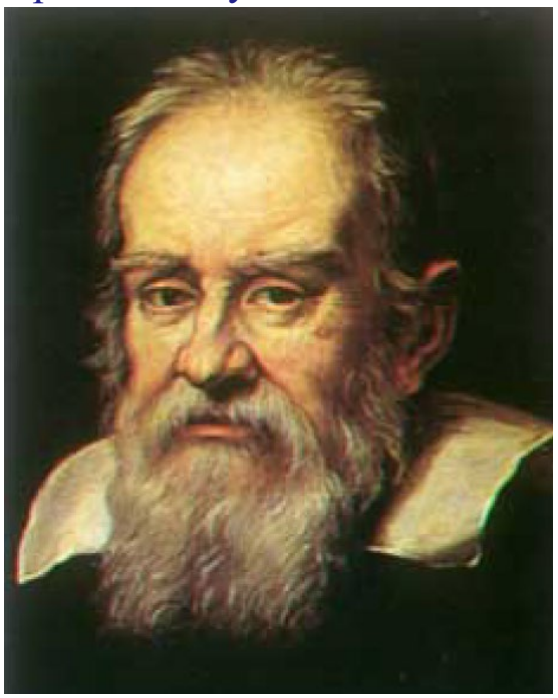


René Descartes



Por otro lado, la astronomía había avanzado mucho desde la mejora en los procesos de fabricación de las lentes. En este sentido, Nicolás Copérnico (1473-1543) formuló la teoría heliocéntrica del sistema solar, concebida en primera instancia por Aristarco de Samos. Su libro "**De revolutionibus orbium coelestium**" (*Sobre las revoluciones de las esferas celestes*) suele ser considerado como el punto inicial o fundador de la astronomía moderna, además de ser una pieza clave en lo que se llamó la Revolución científica en la época del Renacimiento. Copérnico pasó cerca de veinticinco años trabajando en el desarrollo de su modelo heliocéntrico del universo. En aquella época resultó difícil que los científicos lo aceptaran, ya que suponía una auténtica revolución.
Por su lado, Kepler descubrió que el movimiento de los planetas en sus órbitas alrededor del Sol podían describirse matemáticamente mediante tres leyes. Las dos primeras leyes fueron enunciadas en 1609 y la tercera en 1618.

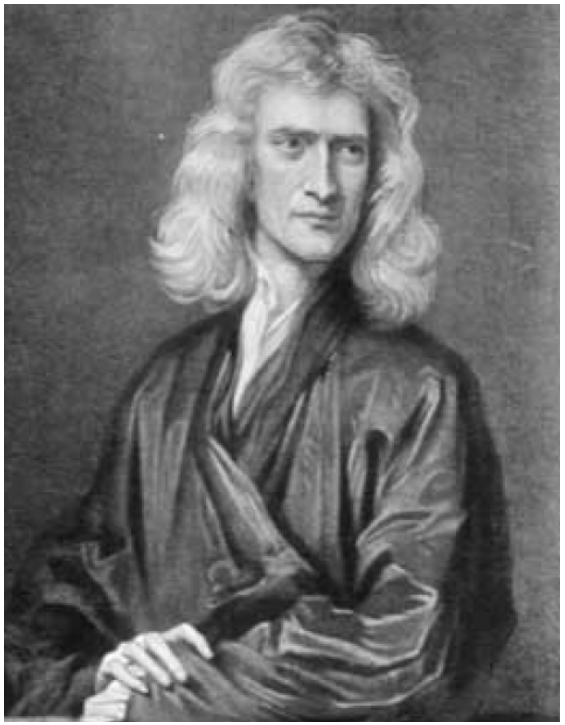
En 1609, Galileo Galilei, registró el primer telescopio astronómico con el que hizo grandes descubrimientos en astronomía, entre los que destaca la observación, el 7 de enero de 1610, de cuatro de las lunas de Júpiter girando en una órbita en torno a este planeta. Además, analizó la caída de objetos por planos inclinados y la caída libre y concluyó, contradiciendo la tesis aristotélica, que la aceleración de todos los objetos era la misma. También analizó el movimiento de los sistemas desde sistemas de referencia que se mueven con velocidades relativas (relatividad Galileana).



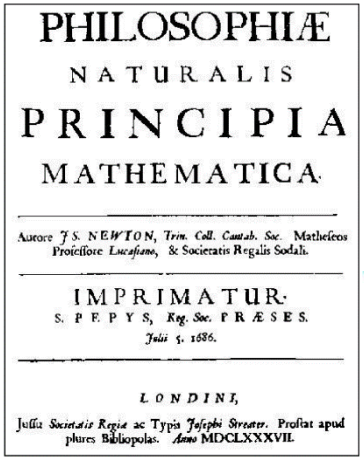
Galileo Galilei



Todos los descubrimientos hechos en relación con la mecánica de sistema fueron maravillosamente condensados en tres leyes por Isaac Newton (1643-1727). Por otro lado, descubrió que toda la materia se atraía entre sí y cuantifico su valor (Ley de Gravitación Universal). Así, el principio de Arquímedes, la ley de la palanca, la construcción de arcos, las observaciones de Galileo, los movimientos planetarios descritos empíricamente por las leyes de Kepler, etc, podían explicarse en base únicamente a estas tres leyes de la mecánica y a la ley de gravitación universal.



Isaac Newton

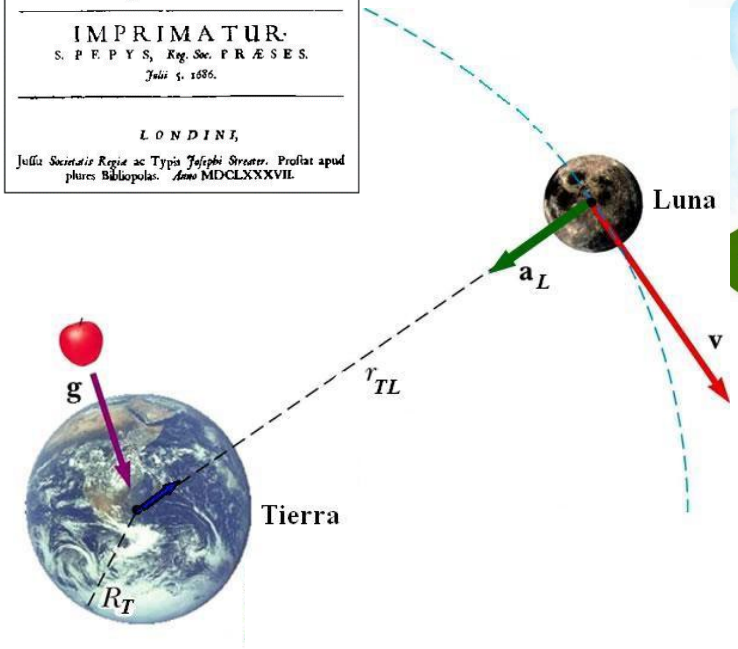

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *IS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.*

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Justu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.





LEYES DE NEWTON

Primera ley de Newton (ley de la inercia)

*Todo cuerpo sobre el que no actúa una fuerza **neta** no altera su estado de movimiento, permaneciendo en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, según fuera su estado inicial.*

Segunda ley de Newton

Si sobre un cuerpo actúa una fuerza neta , $\vec{F}$,este sufre una aceleración dada por:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

Tercera ley de Newton. Principio de acción-reacción.

Si un cuerpo produce una fuerza determinada sobre otro, este ejerce sobre el primero una fuerza igual, pero de sentido contrario a la original.

Fuerzas en la naturaleza. Fuerzas fundamentales.

Las leyes de Newton introducen las fuerzas como las responsables del movimiento de los sistemas. La siguiente pregunta que nos deberíamos hacer sería ¿Cuales son los orígenes de las fuerzas? o lo que es lo mismo ¿Cuáles son las causas de que en la naturaleza aparezcan las fuerzas? En principio puede parecer complicado responder a esta pregunta puesto que en el apartado anterior hemos comentado muchos tipos de interacciones o fuerzas diferentes. Sin embargo, un análisis profundo de la naturaleza nos lleva a la conclusión de que todas las fuerzas o interacciones que observamos pueden explicarse en función únicamente de cuatro interacciones básicas:

1.- La fuerza gravitatoria.

2.- La fuerza electromagnética.

3.- La fuerza nuclear fuerte (fuerza hadrónica).

4.- La fuerza nuclear débil.

Las fuerzas cotidianas que observamos entre cuerpos macroscópicos son debidas a la fuerza gravitatoria o a la fuerza electromagnética. Las fuerzas nucleares fuertes y débiles son las que permiten la formación de los núcleos atómicos y las partículas elementales.

Tipo de interacción	Intensidad relativa	Alcance
Interacción fuerte	1	$\approx 1.4 \cdot 10^{-15}$ m
Interacción electromagnética	$\sim 10^{-2}$	$\approx$prácticamente ∞ $(1/r^2)$
Interacción débil	$\sim 10^{-13}$	$\approx 10^{-16}$ m
Intensidad Gravitatoria	$\sim 10^{-38}$	$\approx$prácticamente ∞ $(1/r^2)$

Comparación entre las diferentes fuerzas fundamentales.

Ley de la Gravitación Universal:

Si consideramos dos cuerpos con masas inerciales m_1 y m_2 separados una distancia r_{12}, la fuerza con la que se atraen estos cuerpos es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ambos cuerpos, es decir,

$$\vec{F}_{12} = -G\frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}\hat{r}_{12}$$

donde G es una constante de proporcionalidad conocida con el nombre de constante de la gravitación Universal.

$$G = 6.67428 \cdot 10^{-11}\ \frac{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^2}{\mathrm{kg}^2}$$

Fuerzas de contacto y fuerzas normales

En general se denominan las fuerzas de contacto a las interacciones que aparecen cuando consideramos dos sistemas mecánicos muy cercanos. Su origen está en las fuerzas electrostáticas de repulsión que los electrones de las capas exteriores de los átomos ejercen. Por tanto, el origen de las fuerzas de contacto es fundamentalmente de tipo electromagnético.

Fuerza de rozamiento sólido-sólido

En este caso, la fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal o de contacto entre ambas superficies. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de coeficiente de rozamiento entre ambas superficies.

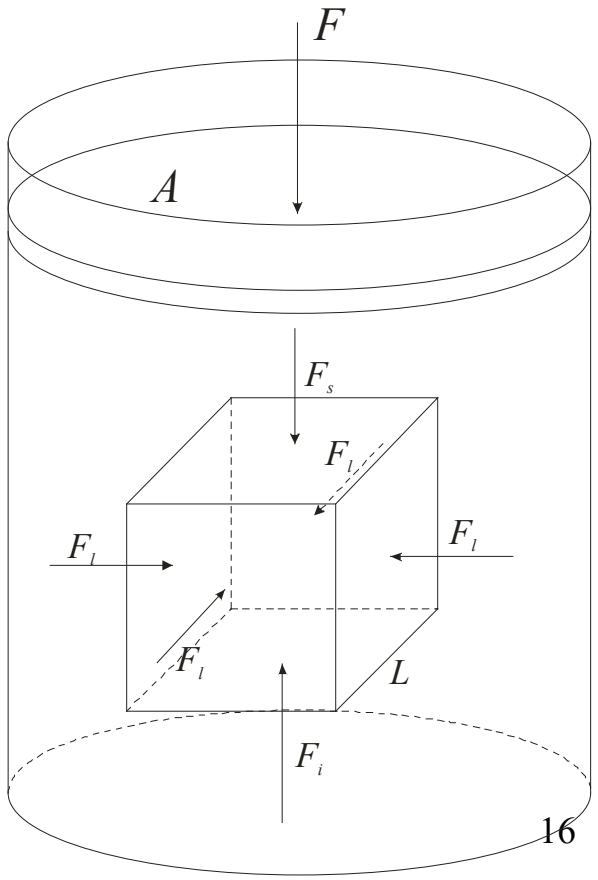
$$F_r \leq \mu N$$

En función de que los sistemas estén en movimiento relativo o no, hay que distinguir coeficiente estático de rozamiento y coeficiente dinámico de rozamiento. En general

$$\mu_{estático} > \mu_{dinámico}$$

OBTENCIÓN DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES A PARTIR DE LAS LEYES DE NEWTON

Para calcular el valor de la presión en cada punto, concentrémonos en el cubo imaginario, de lado L, dibujado dentro del recipiente de la figura. En el caso estático, dicho cubo de fluido ha de estar en equilibrio, de forma que las distintas fuerzas que actúen sobre él habrán de compensarse, pues de lo contrario se movería. Aun en el caso estático, habrá moléculas de fluido que saldrán del cubo y otras que entrarán en él, pero el número medio de las moléculas que entren será igual al de las que salgan. El cubo, considerado como un todo, no se moverá.



Aplicando la segunda ley de Newton al cubo se llega a:

$$P_i \cdot L^2 = P_S \cdot L^2 + \rho \cdot g \cdot L^3$$

Dividiendo todos los miembros de esta ecuación por L^2, se obtiene finalmente

$$P_i = P_S + \rho \cdot g \cdot L$$

que se conoce con el nombre de ecuación fundamental de estática de fluidos.

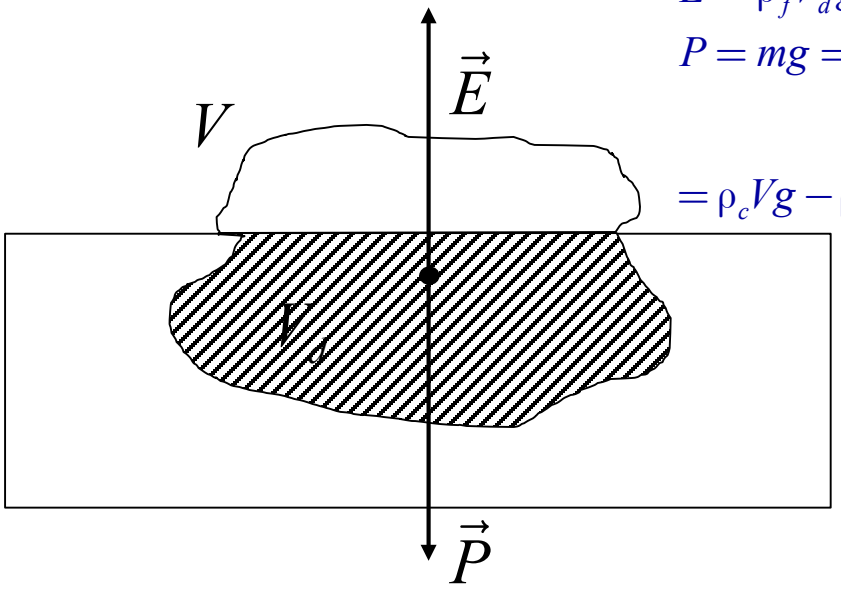
OBTENCIÓN DEL PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES A PARTIR DE LAS LEYES DE NEWTON

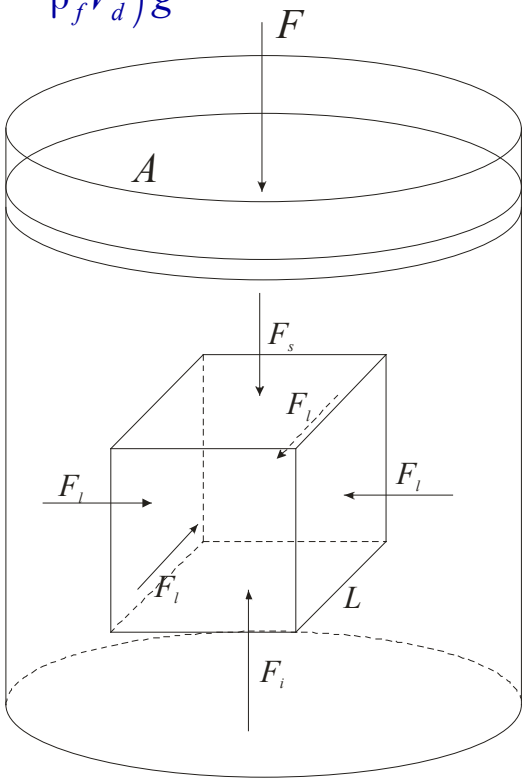
Principio de Arquímedes

Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza de empuje hacia arriba igual al peso del fluido desalojado.

$$\left.\begin{aligned} E &= \rho_f V_d g \\ P &= mg = \rho_c V g \end{aligned}\right| \Rightarrow F_N = P - E$$

$$= \rho_c V g - \rho_f V_d g = \left(\rho_c V - \rho_f V_d\right) g$$





La mecánica es la parte de la física que estudia el movimiento de los cuerpos.

1.- ¿Cómo podemos describir el movimiento de los objetos en el espacio?

CINEMÁTICA ⇒ Posición, velocidad, y aceleración

2.- ¿Por qué existe el movimiento?

DINÁMICA ⇒ Tres leyes de Newton ⇒ Las fuerzas son las responsables del movimiento

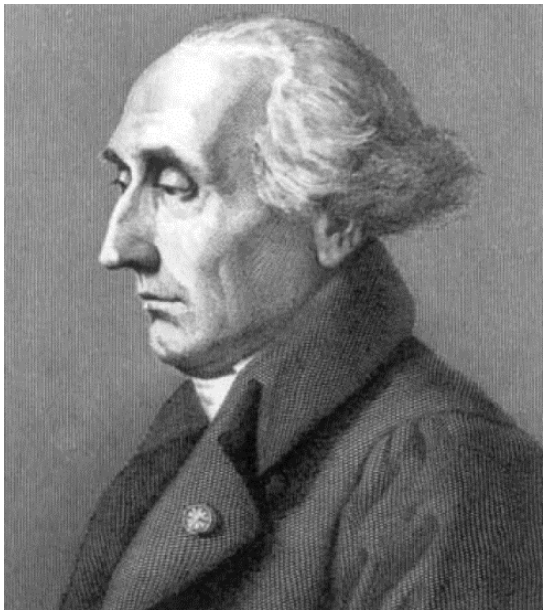
3.- ¿Qué origen tienen las fuerzas?

FUERZAS EN LA NATURALEZA ⇒

- Fuerzas fundamentales ⇒
  - Fuerza gravitatoria
  - Fuerza electromagnética
  - Fuerza nuclear fuerte
  - Fuerza nuclear débil
- Fuerzas de contacto
- Fuerzas de rozamiento

4.- ¿Podemos describir el movimiento en base a una magnitud diferente a la fuerza?

Algunos Físicos trataron de unificar la Mecánica y la Termodinámica, dado que había poderosas justificaciones experimentales para asegurar que los fenómenos térmicos son la manifestación a escala macroscópica de las propiedades dinámicas a nivel atómico o molecular. Uno de los problemas para unificar dichas ramas se encontraba en que la base en la mecánica de Newton eran las fuerzas mientras que la temperatura y el calor eran manifestaciones de la energía. Esto motivó que diferentes autores trataran de reescribir las Leyes de Newton en función del concepto de trabajo y energía. En este sentido Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) y William Rowan Hamilton (1805-1865) desarrollaron la **mecánica analítica** que consiste precisamente en eso, la reformulación de las leyes de Newton en base a los conceptos de trabajo y energía.

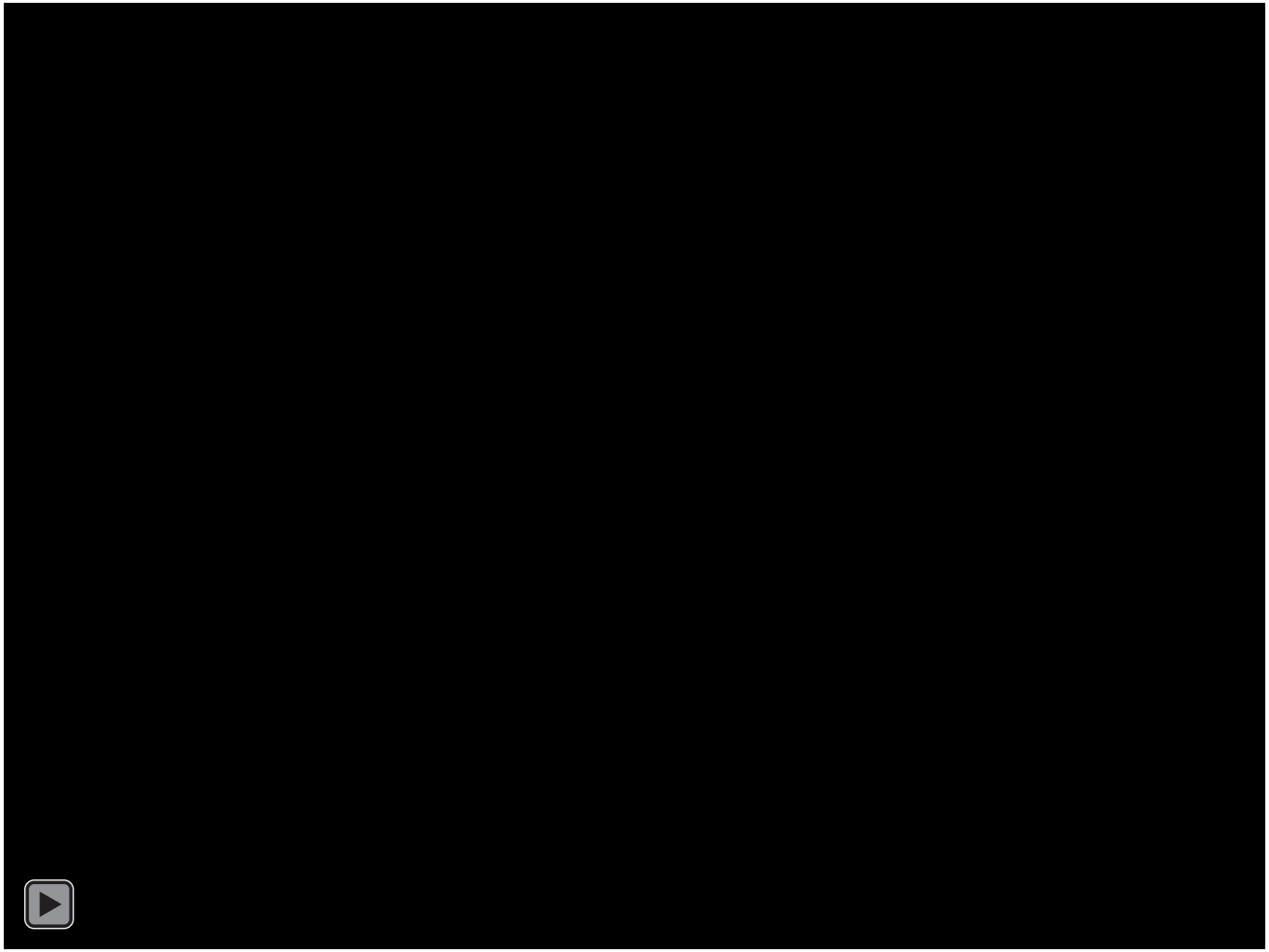


Joseph-Louis Lagrange



William Rowan Hamilton

Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.



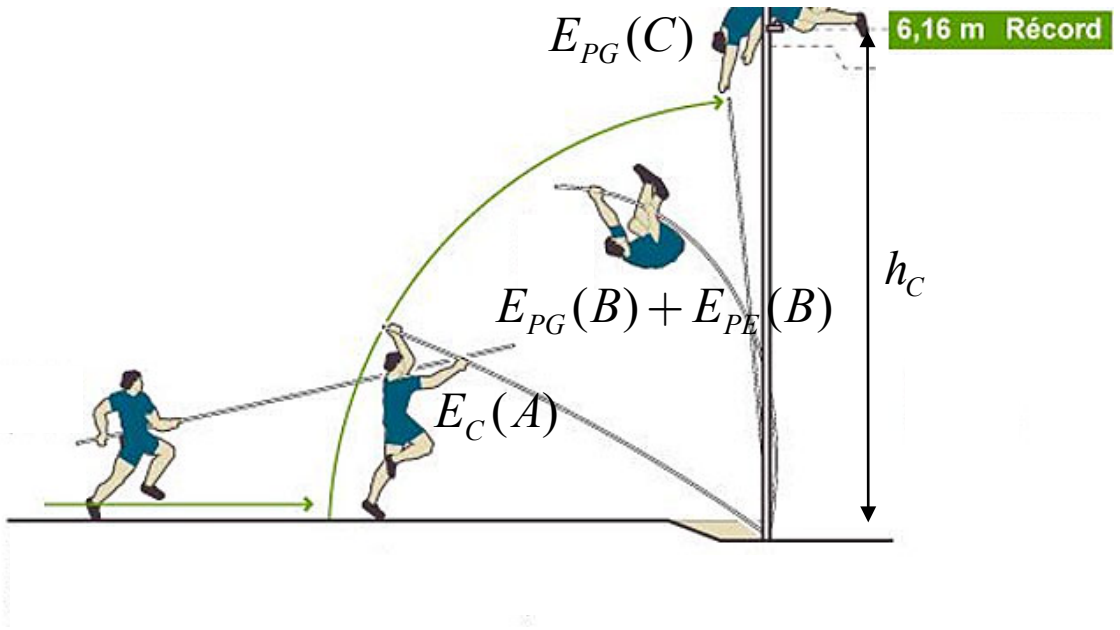
Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.



Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.

Planteamiento

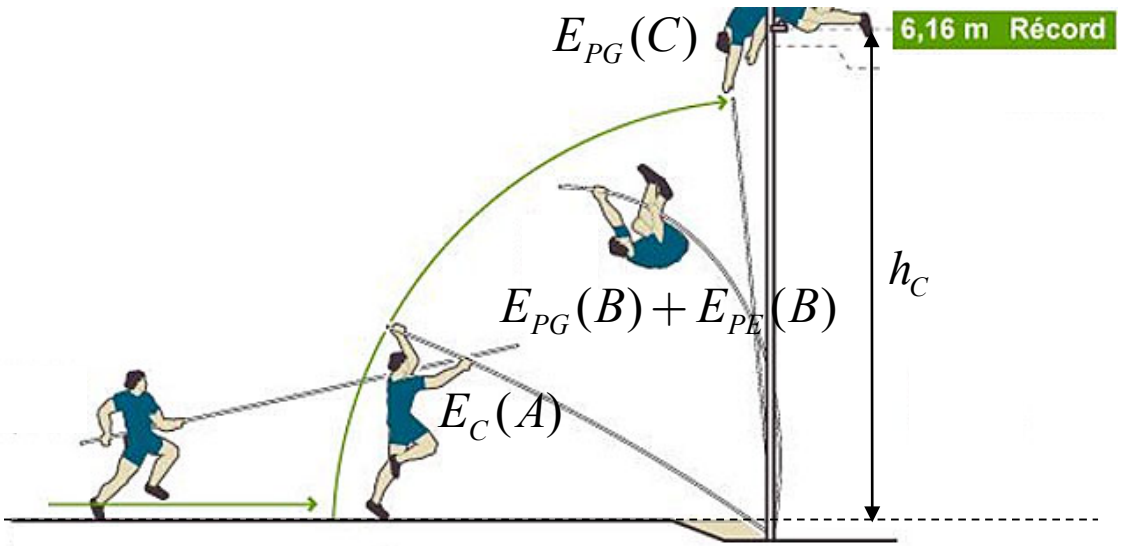
$$E_M(A) = E_M(B) = E_M(C)$$



Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.

Planteamiento

$$E_M(A) = E_M(B) = E_M(C)$$



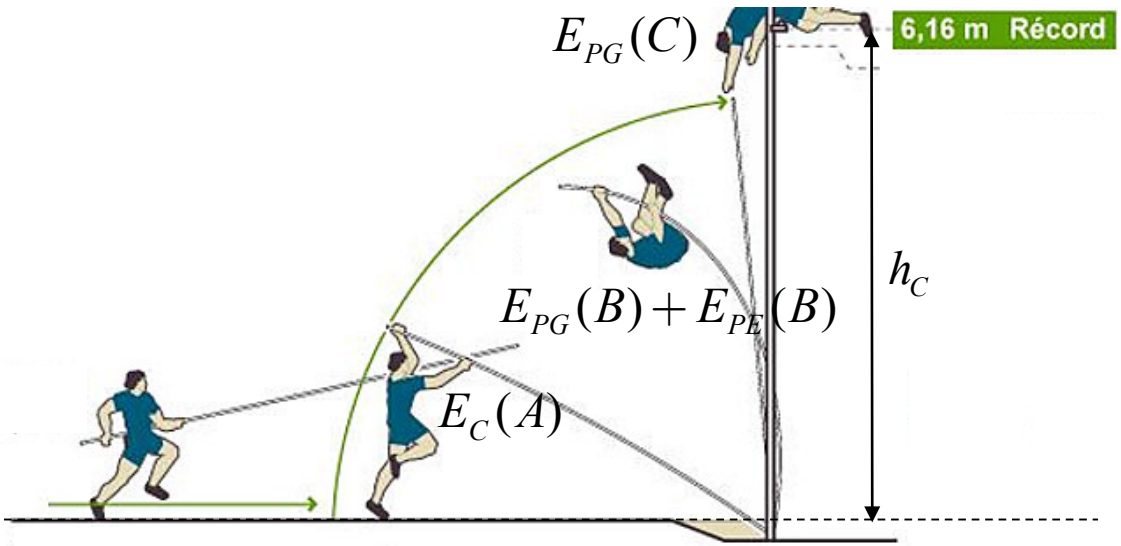
Desarrollo

$$\left.\begin{aligned} E_M(A) &= E_C(A) + E_{PG}(A) = \frac{1}{2}mv_A^2 + mg0 = \frac{1}{2}mv_A^2 \\ E_M(C) &= E_C(C) + E_{PG}(C) = \frac{1}{2}m0 + mgh = mgh_C \end{aligned}\right| \Rightarrow \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_C \Rightarrow \frac{1}{2}v_A^2 = gh_C$$

Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.

Planteamiento

$$E_M(A) = E_M(B) = E_M(C)$$



Desarrollo

$$\left.\begin{aligned} E_M(A) &= E_C(A) + E_{PG}(A) = \frac{1}{2}mv_A^2 + mg0 = \frac{1}{2}mv_A^2 \\ E_M(C) &= E_C(C) + E_{PG}(C) = \frac{1}{2}m0 + mgh = mgh_C \end{aligned}\right| \Rightarrow \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_C \Rightarrow \frac{1}{2}v_A^2 = gh_C$$

Solución

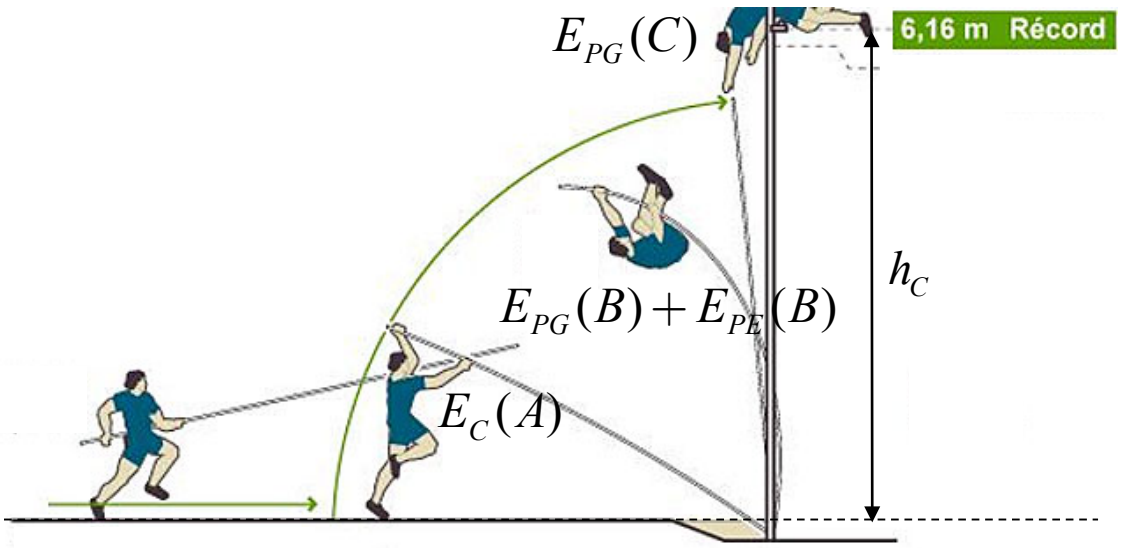
$$v_A = \frac{100\text{ m}}{10\text{ s}} = 10\text{ m/s}$$

$$h_C = \frac{v_A^2}{2g}$$

Ejercicio. Sabiendo que el record de los 100 m lisos es aproximadamente 10 s estime cuanto debe valer el record de salto con pértiga.

Planteamiento

$$E_M(A) = E_M(B) = E_M(C)$$



Desarrollo

$$\left.\begin{aligned} E_M(A) &= E_C(A) + E_{PG}(A) = \frac{1}{2}mv_A^2 + mg0 = \frac{1}{2}mv_A^2 \\ E_M(C) &= E_C(C) + E_{PG}(C) = \frac{1}{2}m0 + mgh = mgh_C \end{aligned}\right| \Rightarrow \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh_C \Rightarrow \frac{1}{2}v_A^2 = gh_C$$

Diferencia muy grande entre el valor estimado y el real. Además el valor estimado es menor que el real.

Solución

$$v_A = \frac{100\ \text{m}}{10\ \text{s}} = 10\ \text{m/s}$$

¿Por qué ocurre esto?

$$h_C = \frac{v_A^2}{2g} \overset{\Downarrow}{=} \frac{100\ \text{m}^2/\text{s}^2}{2 \cdot 10\ \text{m}/\text{s}^2} = 5\ \text{m}$$

Por otro lado, Leonard Euler (1707-1783) analiza, a partir de las leyes de Newton, la dinámica de los cuerpos sólidos (dinámica del sólido rígido) e introduce los conceptos de momento cinético y momento angular (Mechanica (1736)). El desarrollo que hizo Euler de las Leyes de Newton son la base en la actualidad del cálculo de estructuras en la construcción, del desarrollo de la mecánica de los motores de los coches, etc.



Leonard Euler

Estos desarrollos de las Leyes de Newton llevan aparejados frecuentemente la definición de alguna magnitud física nueva que es fundamental a la hora de entender el comportamiento mecánico de los sistema como por ejemplo el concepto de centro de masas.

Las leyes de Newton permiten explicar cualquier fenómeno dinámico macroscópico en el que no sean importantes las correcciones relativistas y por lo tanto son las que cierran esta rama de la Física. Sin embargo hay que tener en cuenta que las leyes de Newton son estrictamente ciertas para partículas puntuales y la mayoría de sistemas reales no se ajustan bien a esta aproximación. Es por ello que muchos investigadores posteriores a Newton desarrollaron sus leyes para tratar sistemas mecánicos reales. Así, por ejemplo, Daniel Bernouilli (1700-1782) (junto a Euler) hizo importantes avances en la determinación del movimiento de los líquidos y gases y en el terreno del cálculo de estructuras. Los resultados obtenidos por Bernouilli fueron utilizados 100 años después por los hermanos Wright para diseñar el primer aeroplano.



Daniel Bernoulli

Desarrollo histórico de la Termodinámica



tierra, agua, aire, y fuego. Esta concepción del fuego como constitutivo fundamental de la Naturaleza es el antecesor directo de conceptos posteriores como caloría.

Como en otras ramas de la Física habría que esperar a finales del siglo XVI y principios del siglo XVII para que se produjese un avance importante

Principio cero (concepto de temperatura)

El concepto más singular en Termodinámica es, sin duda, el de temperatura. Ya el hombre primitivo debió darse cuenta de que la temperatura era un atributo de los cuerpos, que impresionaba los sentidos de una manera particular, independientemente del estado mecánico. Dos piedras iguales ofrecerían a sus sentidos sensaciones diferentes si una de ellas había sido calentada por el sol. La clasificación de los diferentes estados térmicos fue muy simplista: caliente, tibio (como el cuerpo humano), templado (con el ambiente) y frío, enriqueciéndose con modos comparativos como 'frío como el hielo', frío como el invierno, caliente como el verano, caliente como el agua hirviendo, caliente como el fuego.

Aunque, como hemos visto, el estudio de los fenómenos térmicos se remonta a los sabios griegos, es tradicional asociar el comienzo de la Termodinámica con el primer termómetro, atribuido a Galileo quien en 1592 empezó a utilizar como tal un bulbo de vidrio, del tamaño de un puño, abierto a la atmósfera a través de un tubo delgado (un artificio análogo fue descrito por Filo de Bizancio hacia el año 100 a.C.). Para evaluar la temperatura ambiente, se calentaba con la mano el bulbo y se introducía parte del tubo (boca abajo) en un recipiente con agua coloreada; la variación de temperatura del aire atrapado en el proceso de enfriamiento al ambiente ocasionaba un ascenso del nivel del líquido en el tubo que era proporcional a la diferencia entre la temperatura ambiente y la del cuerpo humano. El desarrollo de termómetros basados en las propiedades termométricas de los materiales fue muy importante para alcanzar el concepto de temperatura.

PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

Se dice que una propiedad de un material es termométrica cuando dicha propiedad depende de la temperatura que el material posee.

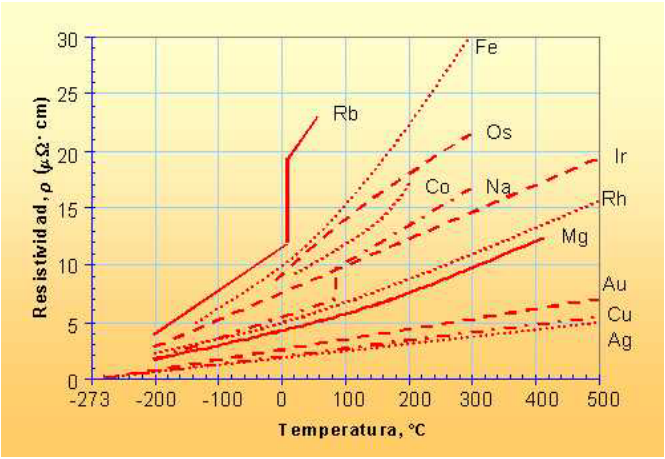
Sin duda alguna la propiedad termométrica de la que el hombre antes tuvo conocimiento es la dilatación-contracción que sufre la materia con el aumento-disminución de la temperatura. Como veremos esta propiedad termométrica fue fundamental en el desarrollo de los termómetros y por lo tanto para llegar a un concepto físico de lo que es la temperatura.



PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

No obstante, aunque la dilatación térmica es sin duda la propiedad termométrica más conocida, aparecen muchas otras propiedades de los materiales que dependen de la temperatura y que, por tanto, son propiedades térmicas.

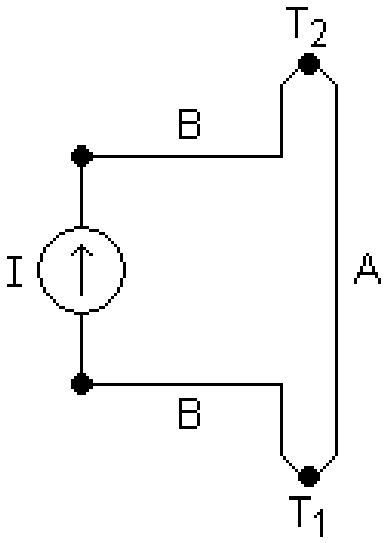
1.- Variación de la resistencia eléctrica de un material con la temperatura

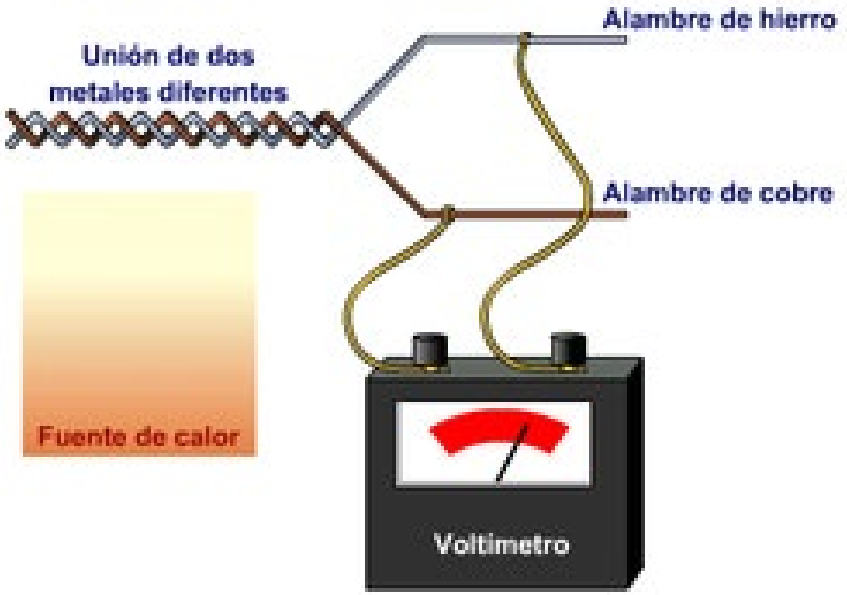




PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

2.- **Efecto Seebeck: C**onversión de diferencias de temperatura directamente a electricidad. Seebeck en 1821 descubrió que la aguja de una brújula se desviaba cuando se formaba un circuito cerrado de dos metales unidos en dos lugares con una diferencia de temperatura entre las uniones.





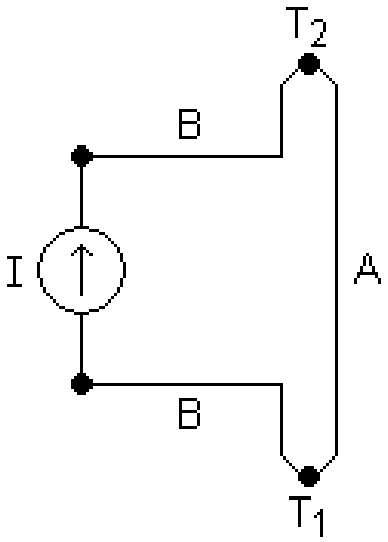
PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

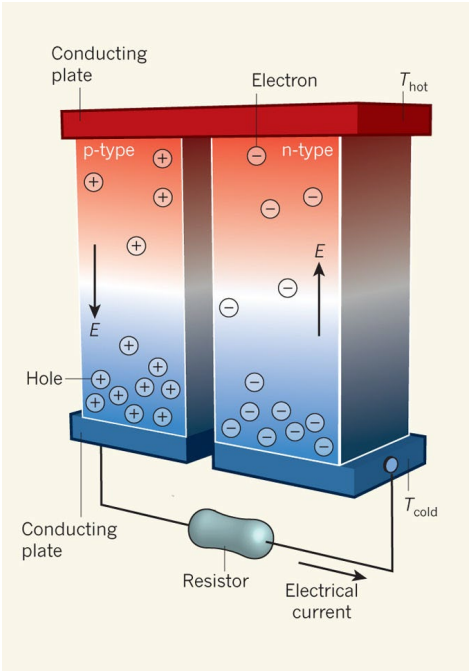
2.- **Efecto Seebeck: C**onversión de diferencias de temperatura directamente a electricidad. Seebeck en 1821 descubrió que la aguja de una brújula se desviaba cuando se formaba un circuito cerrado de dos metales unidos en dos lugares con una diferencia de temperatura entre las uniones.

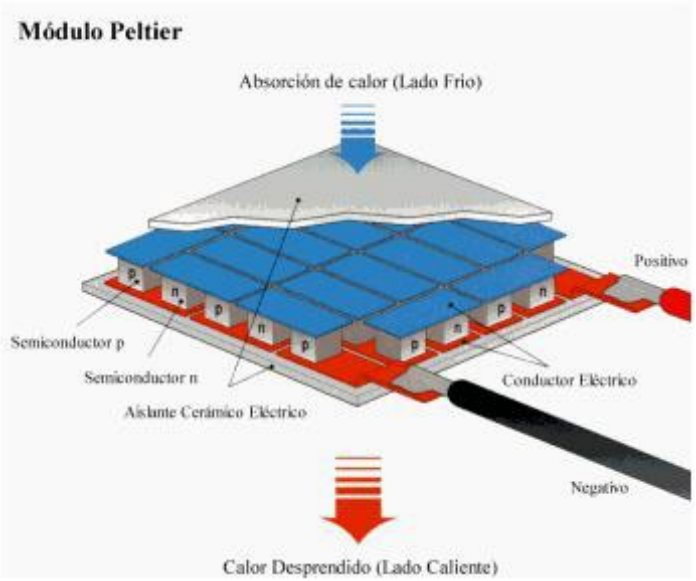


PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

3.- **Efecto Peltier:** Propiedad termoeléctrica descubierta en 1834 por Jean Peltier. El efecto Peltier hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Sucede cuando una corriente se hace pasar por dos metales o semiconductores conectados por dos "junturas de Peltier". La corriente propicia una transferencia de calor de una juntura a la otra: una se enfría en tanto que otra se calienta.







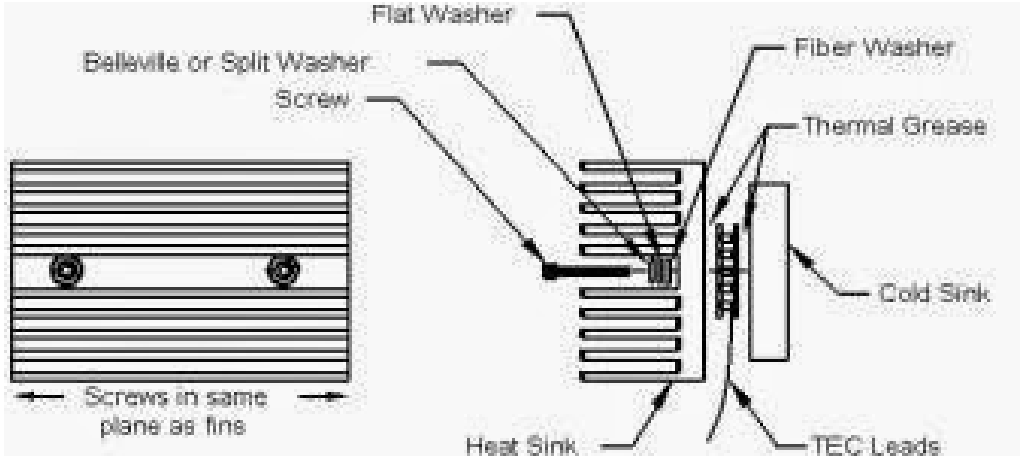
PROPIEDADES TERMOMÉTRICAS

3.- **Efecto Peltier:** Propiedad termoeléctrica descubierta en 1834 por Jean Peltier. El efecto Peltier hace referencia a la creación de una diferencia de temperatura debida a un voltaje eléctrico. Sucede cuando una corriente se hace pasar por dos metales o semiconductores conectados por dos "junturas de Peltier". La corriente propicia una transferencia de calor de una juntura a la otra: una se enfría en tanto que otra se calienta.









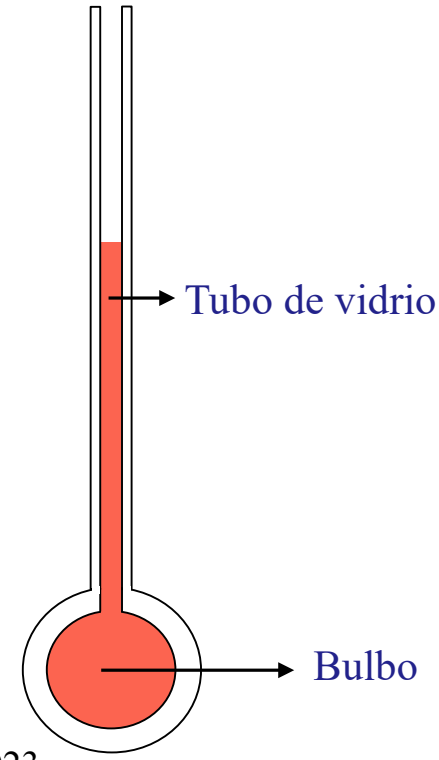
En 1641, el Duque de Toscana, fundador de la Academia Florentina de los Experimentos, aprovechando la entonces emergente tecnología de tubos capilares de vidrio, introduce el termómetro de bulbo con alcohol y capilar sellado, prácticamente como los usados hoy, y en esa época ya se empieza a distinguir entre temperatura (estado térmico) y calor (flujo de energía térmica).



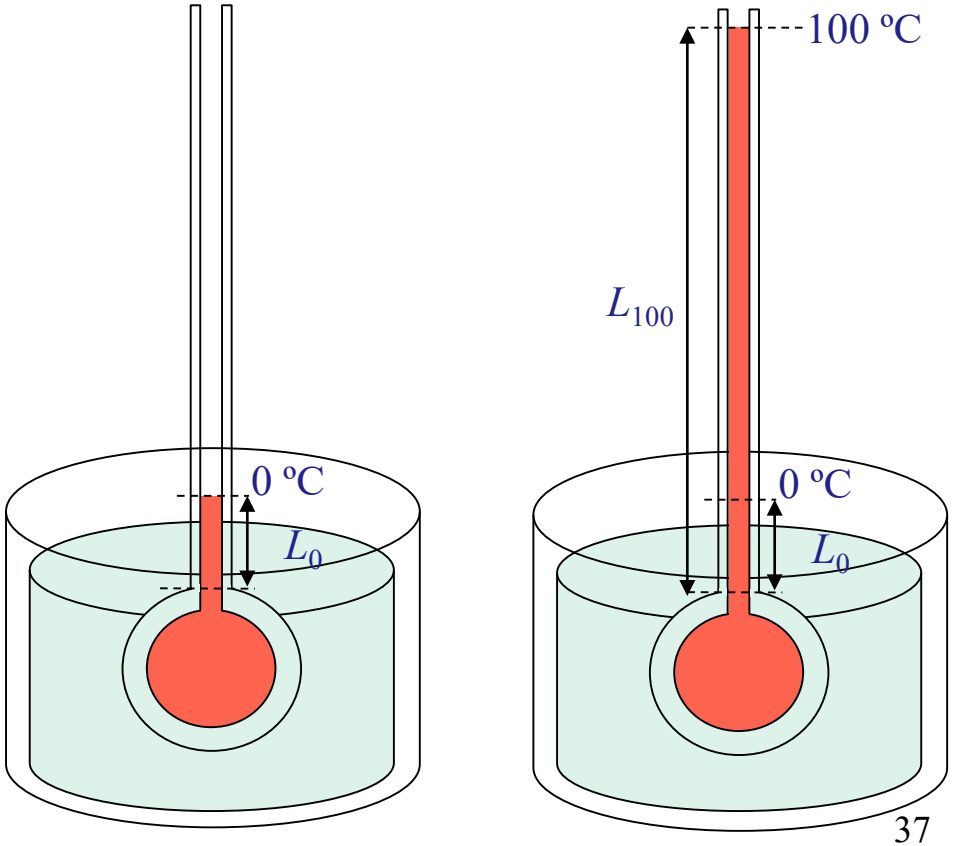
Fernando II de Medici

Termómetro común de mercurio

Esquema

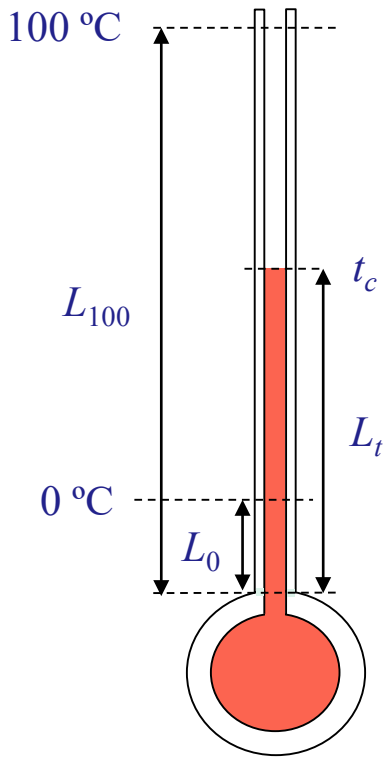


Calibración del termómetro



Agua con hielo

Agua en ebullición



Escala de grados Celsius

$$t_C = 100 \cdot \frac{L_t - L_0}{L_{100} - L_0} \ ^\circ\mathrm{C}$$

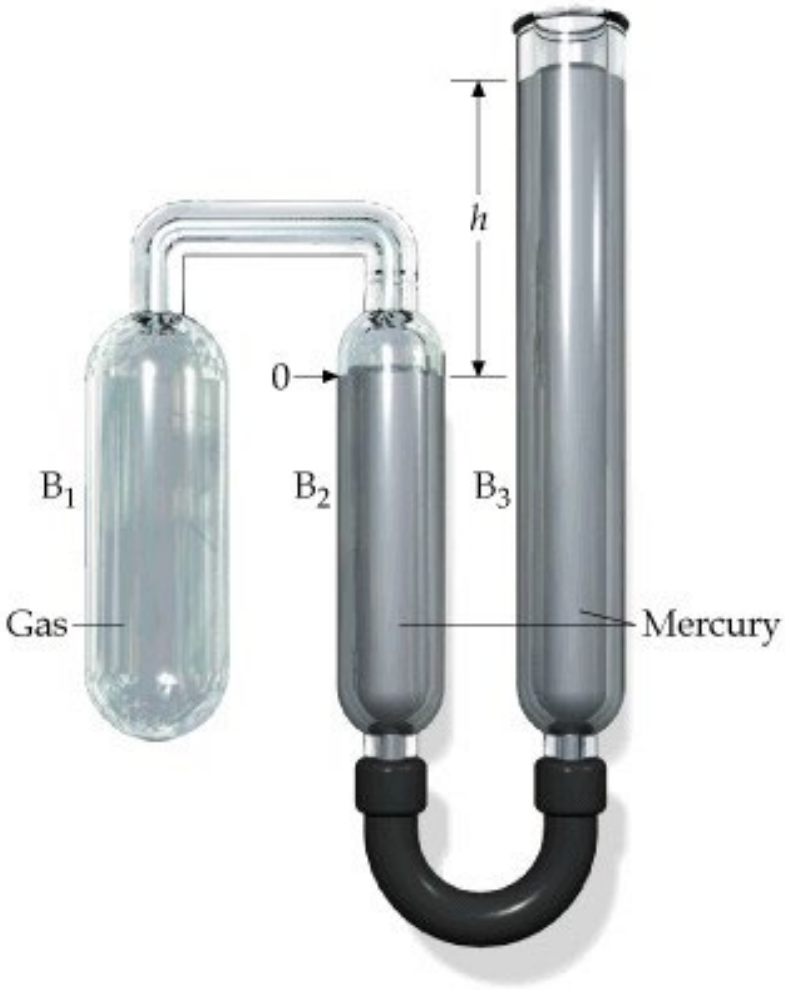
Escala de grados Fahrenheit

En esta escala de temperaturas se define como 32 °F la temperatura del punto de hielo y como 212 °F la del punto de ebullición del agua

$$t_C = \frac{5}{9}\left(t_F - 32\ ^\circ\mathrm{F}\right)\frac{^\circ\mathrm{C}}{^\circ\mathrm{F}}$$

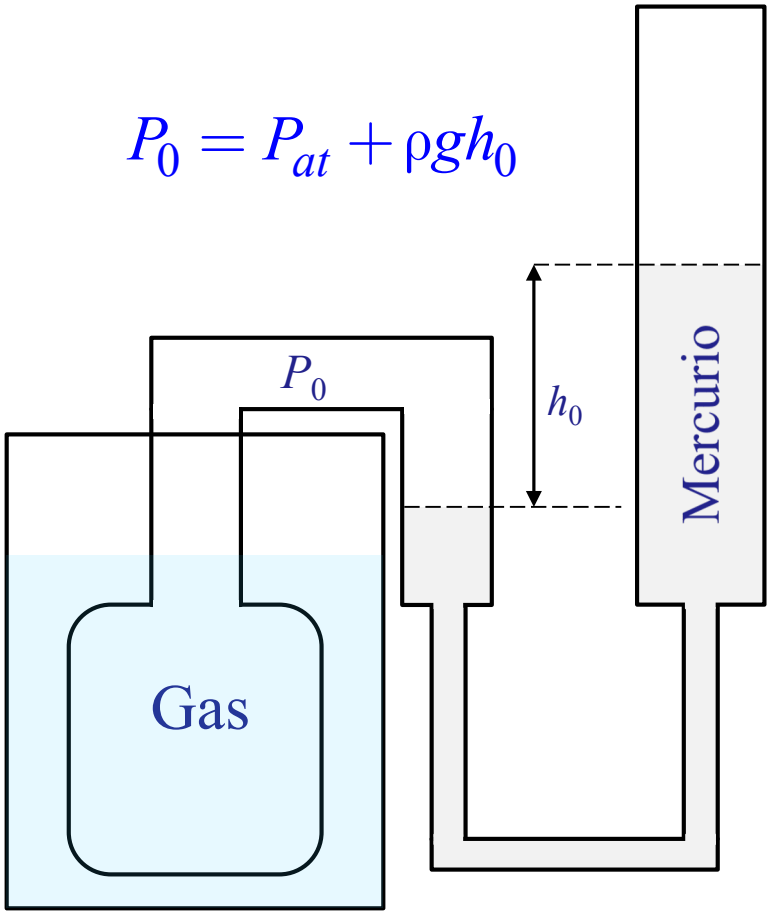
Termómetros de gas

Todos los termómetros calibrados mediante agua con hielo y vapor de agua utilizando la dilatación lineal o volumétrica concuerdan (por definición) a 0 ºC y 100 ºC, pero ofrecen lecturas ligeramente distintas en los puntos intermedios. Estas discrepancias pueden ser muy grandes por encima del punto del vapor y por debajo del punto del hielo. Sin embargo, existe un grupo de termómetros en el que las temperaturas medidas concuerdan muy bien incluso lejos de los puntos de calibración, son los termómetros de gas. Estos termómetros se desarrollaron durante el siglo XVIII.



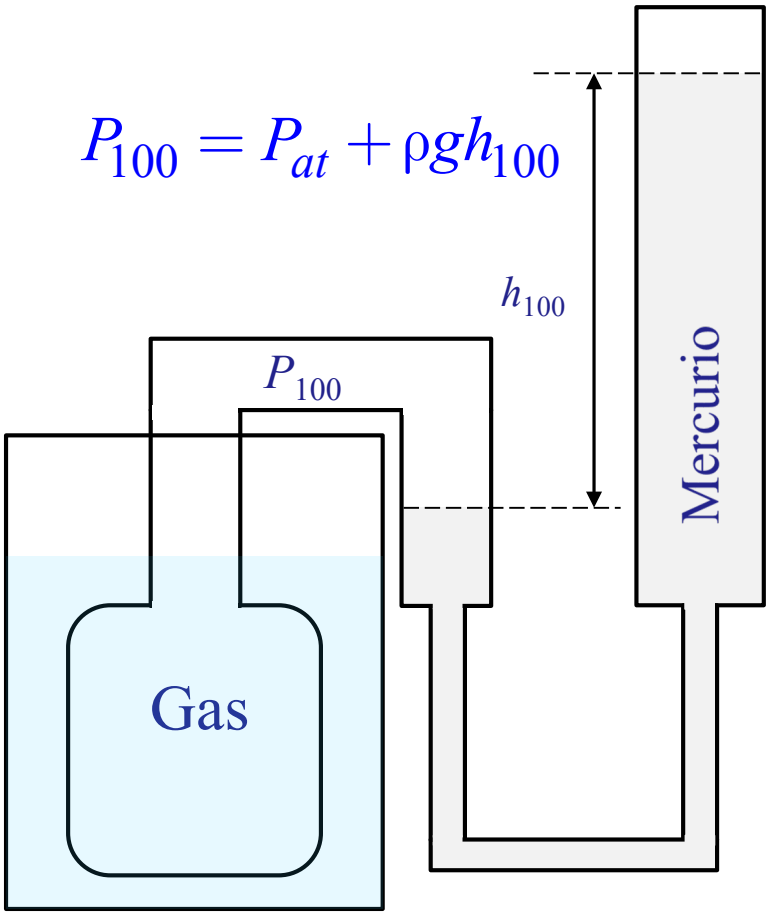
Calibrado de un termómetro de gas

$$P_0 = P_{at} + \rho g h_0$$



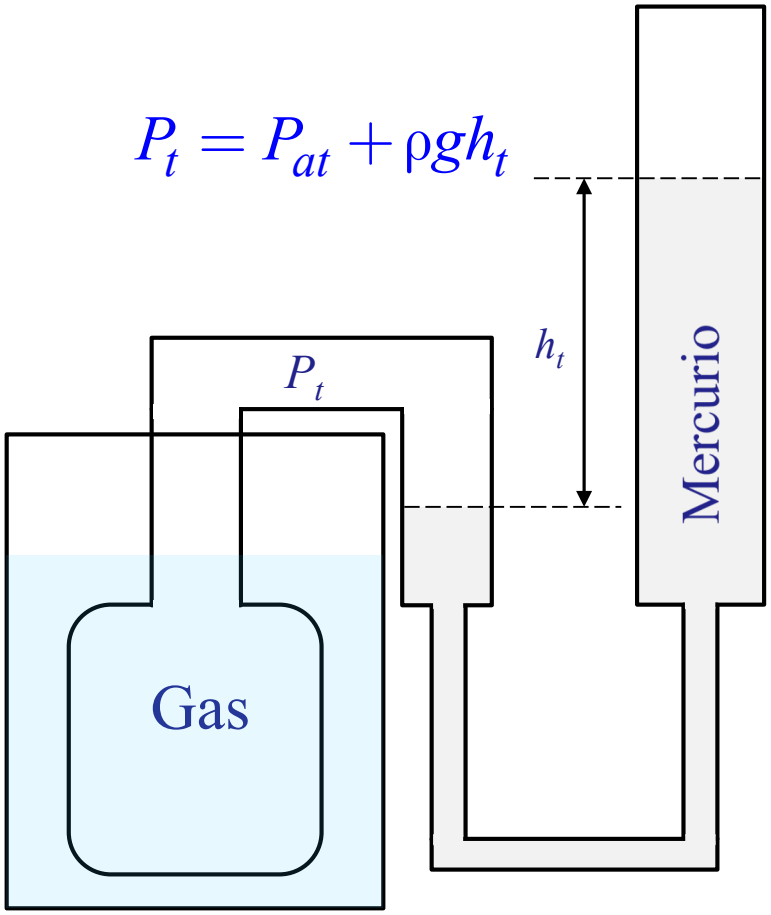
Agua con hielo

$$P_{100} = P_{at} + \rho g h_{100}$$



Agua en ebullición

Calibrado de un termómetro de gas

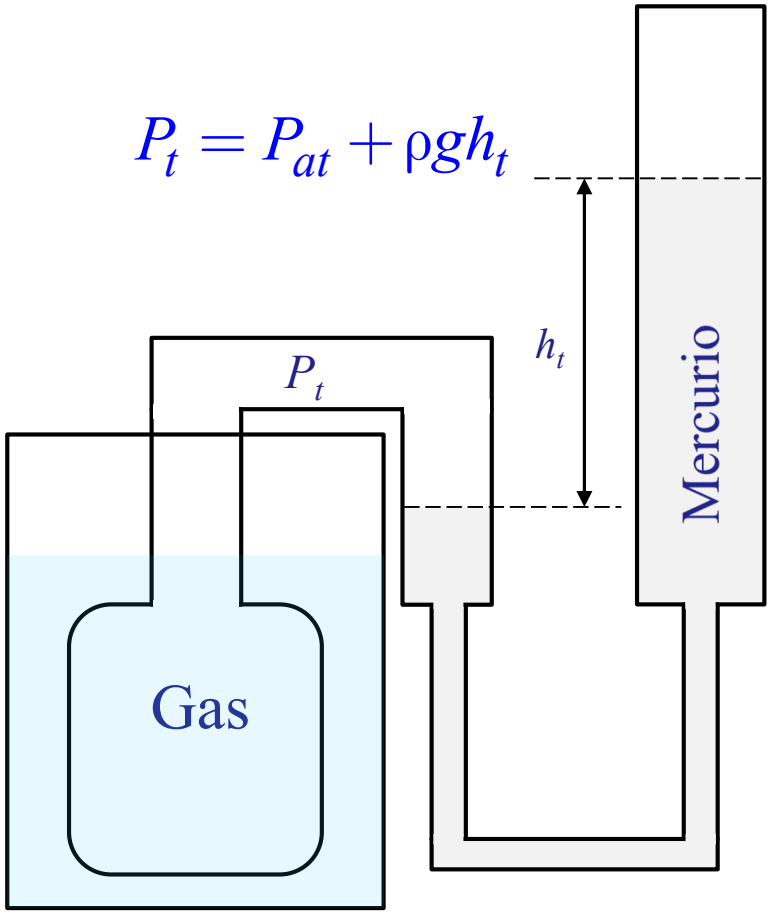


$$t_C = 100 \cdot \frac{P_t - P_0}{P_{100} - P_0}\ ^{o}\mathrm{C} =$$

$$= 100 \cdot \frac{h_t - h_0}{h_{100} - h_0}\ ^{o}\mathrm{C}$$

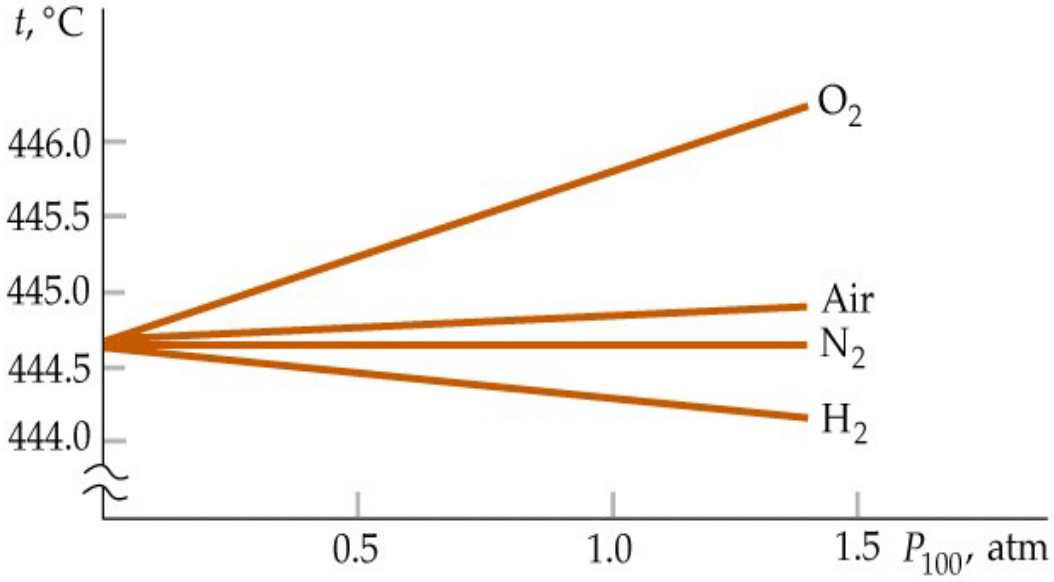
Calibrado de un termómetro de gas

$$P_t = P_{at} + \rho g h_t$$



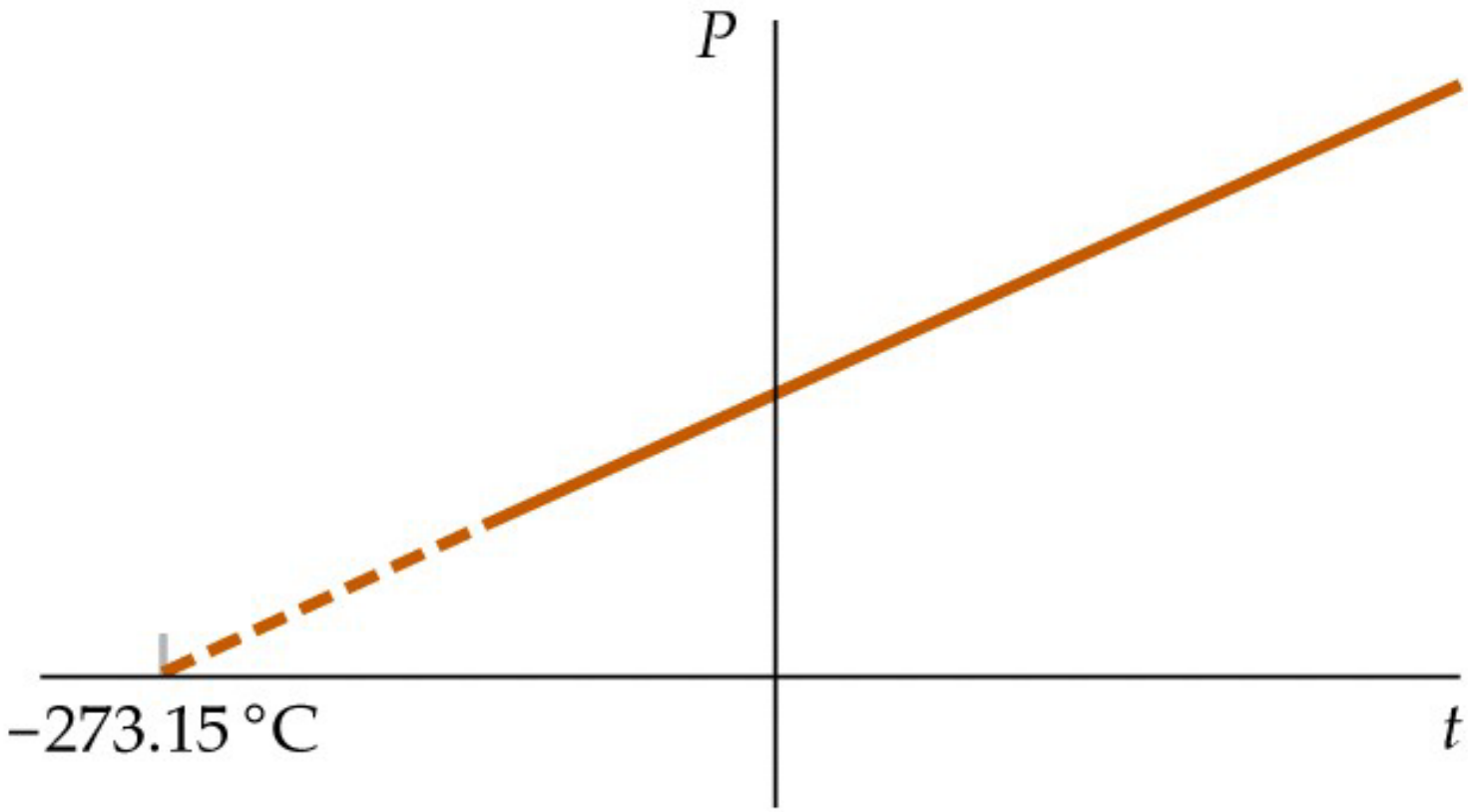
$$t_C = 100 \cdot \frac{P_t - P_0}{P_{100} - P_0}\ ^{\circ}\mathrm{C} =$$

$$= 100 \cdot \frac{h_t - h_0}{h_{100} - h_0}\ ^{\circ}\mathrm{C}$$



Medidas del punto de ebullición del azufre como función de la presión del punto del vapor del agua que se varía modificando la cantidad de gas contenido en el termómetro utilizando termómetros de gas a volumen constante llenos con diversos gases.

Definición de la temperatura absoluta



Temperatura medida en función de la presión en un termómetro de gas a volumen constante.

Definición de la temperatura absoluta

En la actualidad, en lugar de utilizar el punto del hielo o el de ebullición del agua para calibrar el termómetro, se suele utilizar el punto triple del agua (temperatura y presión únicas en las que coexisten en equilibrio el agua, su vapor y el hielo) que puede reproducirse con mucha mayor precisión en el laboratorio. Este equilibrio tiene lugar a la presión de 4,58 mmHg y temperatura de 0,01 ºC. Se define así la escala de temperatura del gas ideal de forma que la temperatura del punto triple es 273,16 kelvins (K), y la temperatura de cualquier otro estado de modo que sea proporcional a la presión de un termómetro de gas a volumen constante.

$$T = \frac{273{,}16\ \text{K}}{P_3} P$$

donde P es la presión del gas en el termómetro cuando éste se halla en equilibrio térmico con el sistema cuya temperatura se está midiendo y P3 es la presión del gas en el termómetro cuando se encuentra inmerso en un baño de agua-vapor-hielo en su punto triple.

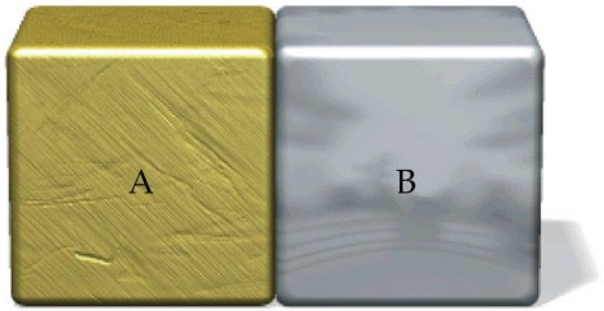
El grado Celsius y el kelvin tienen el mismo tamaño en las diferencias de temperaturas, es decir, una variación de temperatura de 1 grado Celsius equivale a una variación de temperatura de un grado kelvin.

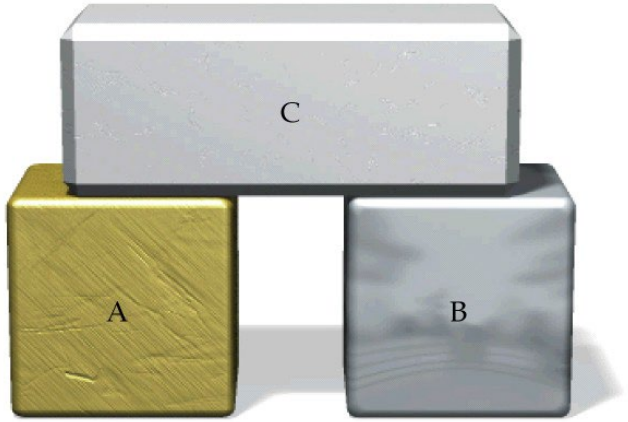
$$T = t_C + 273{,}15$$

El desarrollo de los termómetros llevo a la conclusión de que el concepto de temperatura no estaba relacionado con la sensaciones de caliente-frio que nos proporcionan nuestros sentidos, sino más bien indicaba si al poner en contacto dos objetos había un paso de energía térmica (calor) de uno a otro. En definitiva, para dos objetos con igual temperatura no habría paso neto de energía térmica de uno a otro mientras que en objetos con diferentes temperaturas habría un paso espontáneo de energía térmica del más caliente al más frio.

El enunciado definitivo del principio cero de la termodinámica que supone la definición del concepto de temperatura se debe a Ralph H. Fowler quien en 1935 llegó a la siguiente conclusión empírica

Si dos objetos están en equilibrio térmico (tienen igual temperatura) con un tercero, entonces están en equilibrio térmico (tienen igual temperatura) entre sí.





Primer principio (conservación de la energía)

En 1765, el profesor y químico escocés Joseph Black realiza un gran número de ensayos calorimétricos, distinguiendo claramente calor (energía térmica) de temperatura (relacionada como acabamos de ver con el equilibrio térmico), e introduciendo los conceptos de calor específico y calor latente de cambio de estado. Desgraciadamente, sus experimentos se diseñaron de tal forma que el trabajo intercambiado por el sistema con el exterior era siempre despreciable, dando origen a la creencia errónea de que el calor se conservaba en los procesos térmicos.

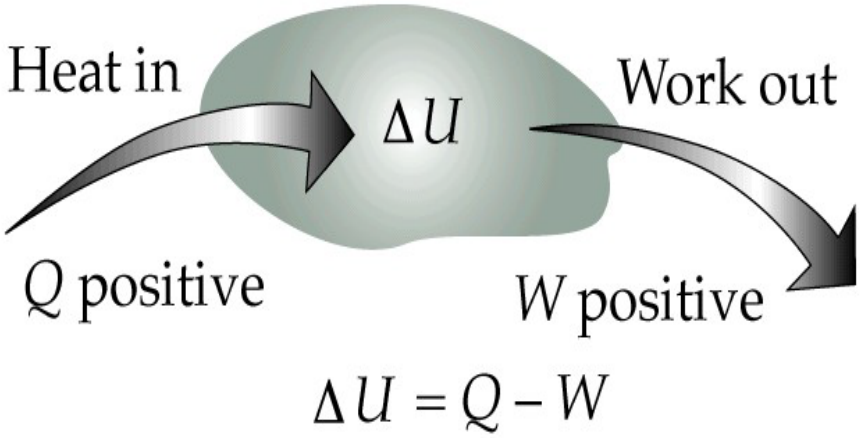
Aunque ya en 1774 Lomonosov rechazaba esta idea no fue hasta 1842, con los concluyentes experimentos de Mayer y Joule, cuando se desechó este modelo. Los resultados de estos investigadores llevaban a la conclusión de que todos los cuerpos con una temperatura distinta del cero absoluto tenían una energía interna de forma que cuando ponía dos sistemas con temperaturas diferentes en contacto había un trasvase espontáneo de energía del más caliente al más frio. Este trasvase se hacia a costa de la energía interna del sistema caliente y esta energía podía utilizarse para calentar el sistema frio (calor) o producir algún tipo de trabajo mecánico.

Durante la década de 1840, varios físicos entre los que se encontraban Joule, Helmholtz y Meyer, fueron desarrollando esta ley. Sin embargo, fueron primero Clausius en 1850 y Lord Kelvin un año después quienes escribieron los primeros enunciados formales del primer principio

El calor neto añadido a un sistema es igual a la variación de la energía interna del mismo más el trabajo realizado por el sistema.

Primer principio (conservación de la energía)

El calor neto añadido a un sistema es igual a la variación de la energía interna del mismo más el trabajo realizado por el sistema.



El calor neto añadido a un sistema es igual a la variación de la energía interna del mismo más el trabajo realizado por el sistema.

$$Q = \Delta U + W$$

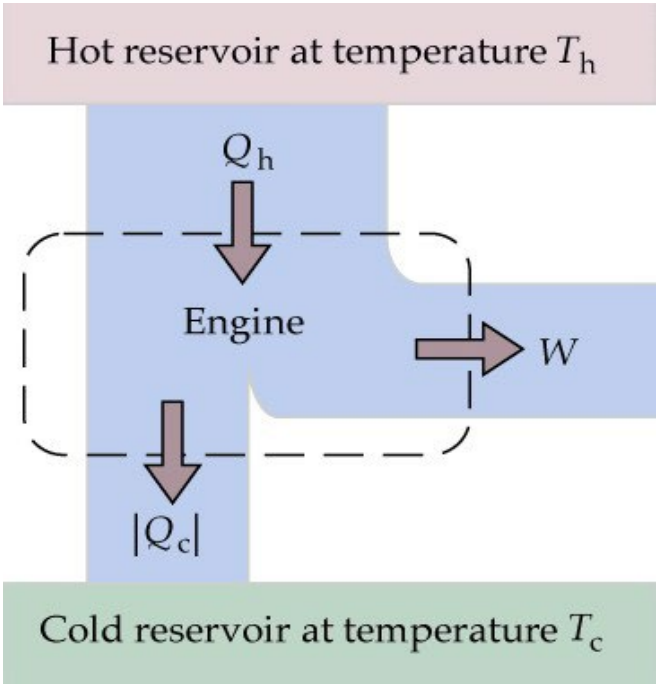
$$dQ = dU + dW$$

Energía interna = Función de estado

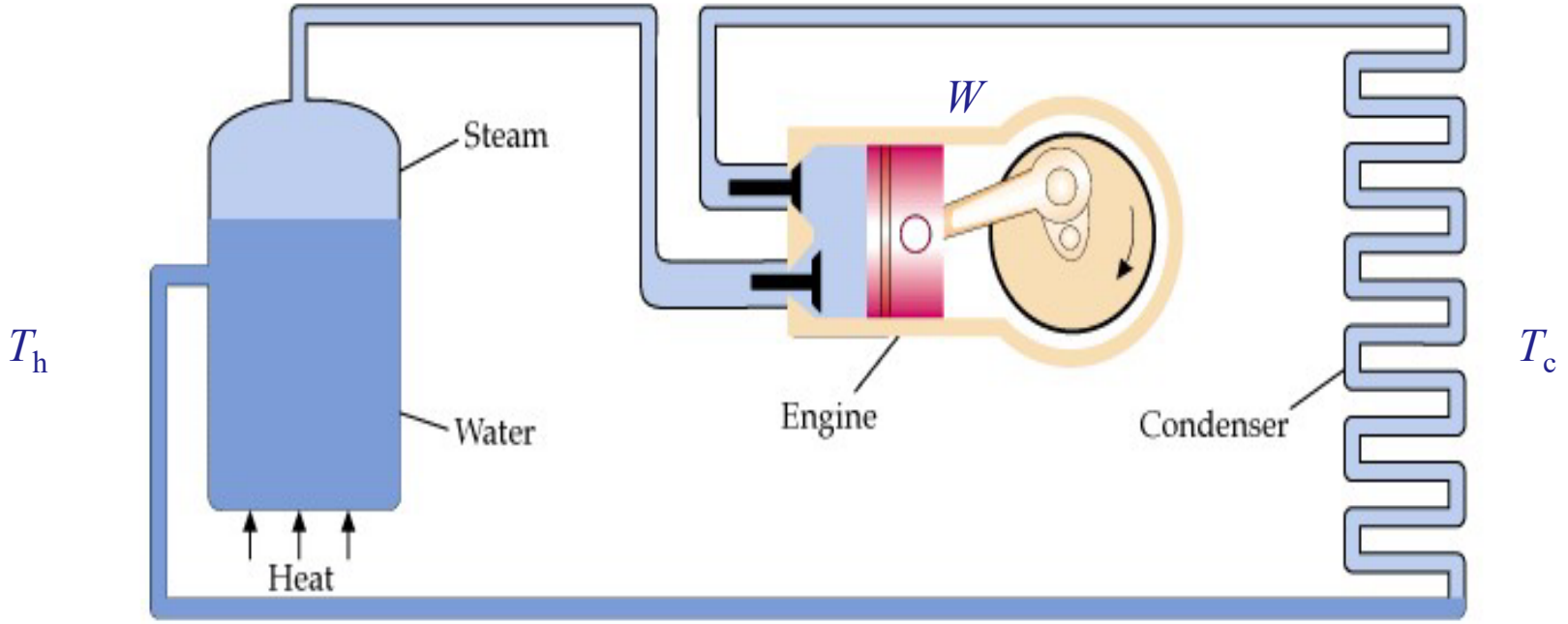
Segundo principio de la Termodinámica

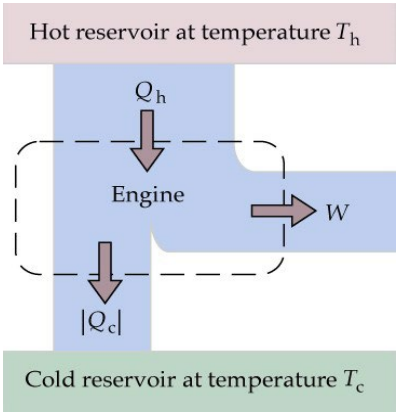
El Primer principio de la Termodinámica permitía, a priori, la posibilidad de extraer energía mecánica de un sistema caliente a costa de su energía interna. Esto llevó al desarrollo de diferentes modelos de motores térmicos y a llegar a la conclusión de que parte de la energía interna que se extraía del sistema tenía que cederse a un sistema frio. De esa forma, Kelvin llego a la siguiente conclusión

Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.



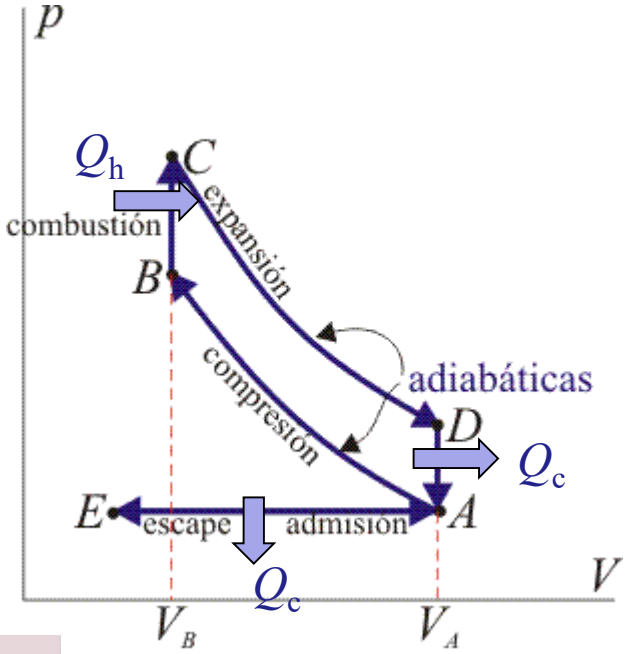
Ejemplos de máquinas térmicas: Máquina de vapor



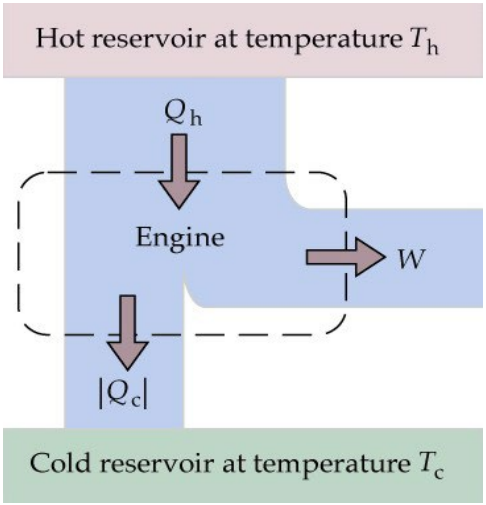


Ejemplos de máquinas térmicas: Motor de combustión.





Ciclo de Otto

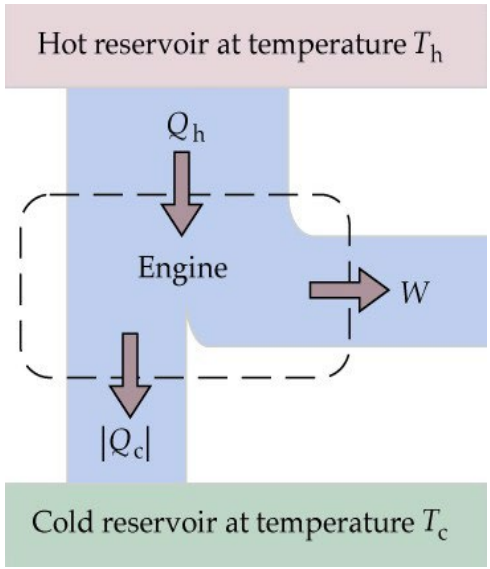


Segundo principio de la Termodinámica

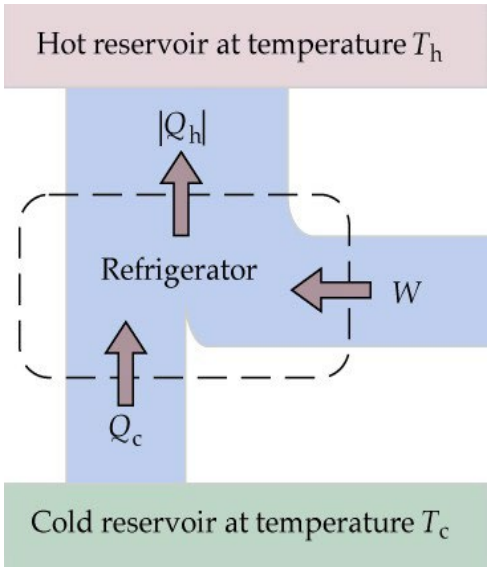
Por otro lado, Clausius paralelamente llegó, también empíricamente, a la siguiente conclusión

No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Ambos principios son equivalentes (de uno puede deducirse el otro) y son la base de las máquinas térmicas que son el ejemplo más significativo de la utilidad de la Termodinámica.



Motor



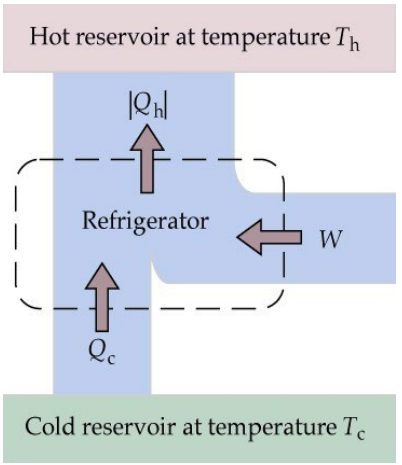
Frigorífico o bomba de calor

Ejemplos de máquinas térmicas: Bomba de calor.

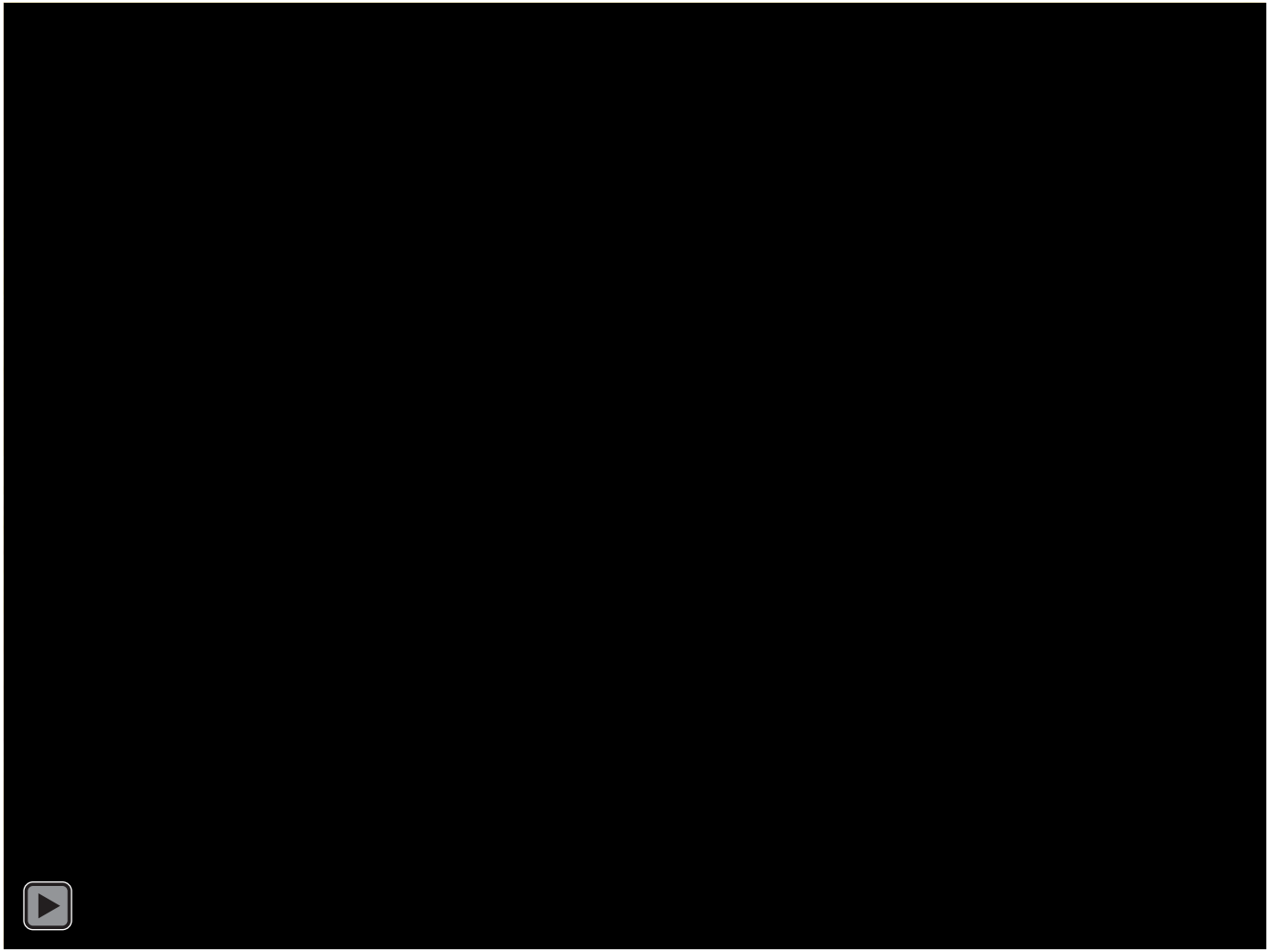


$$P \cdot V = N \cdot R \cdot T \Rightarrow \text{Si } P \uparrow\uparrow\uparrow \Rightarrow T \uparrow\uparrow\uparrow$$

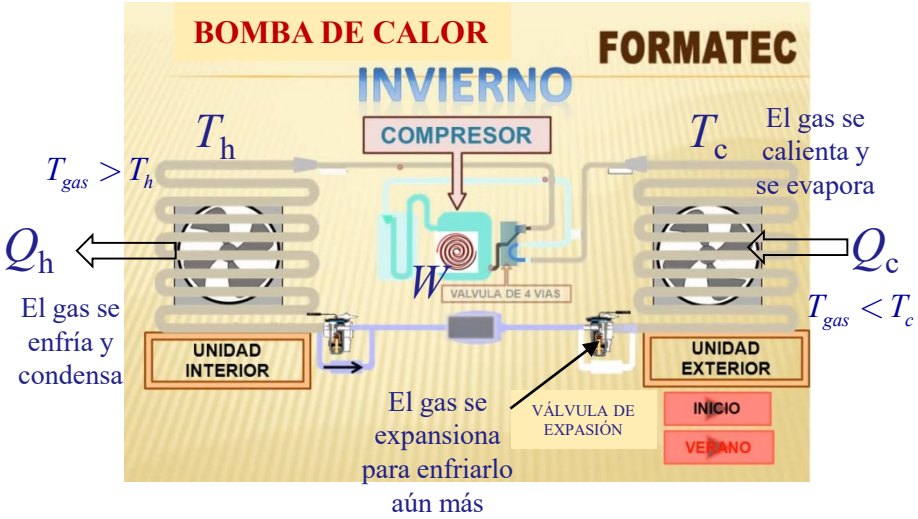
$$P \cdot V = N \cdot R \cdot T \Rightarrow \text{Si } P \downarrow\downarrow\downarrow \Rightarrow T \downarrow\downarrow\downarrow$$

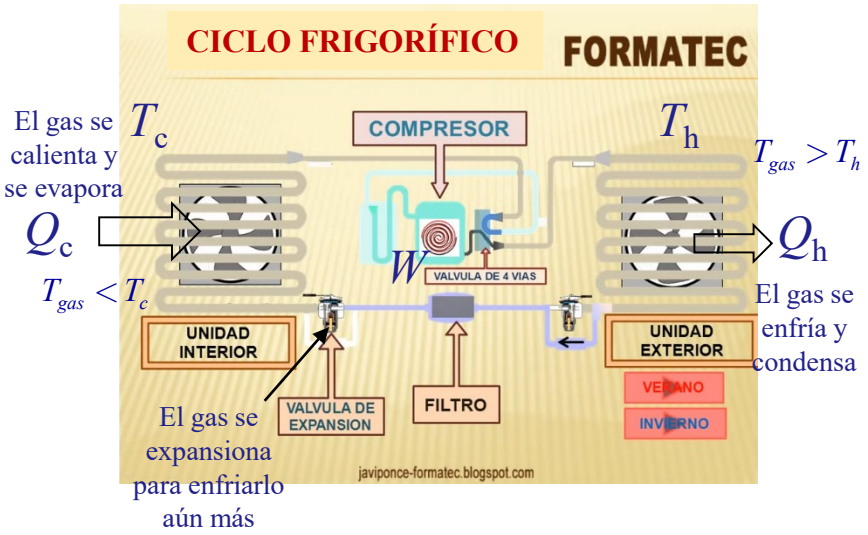


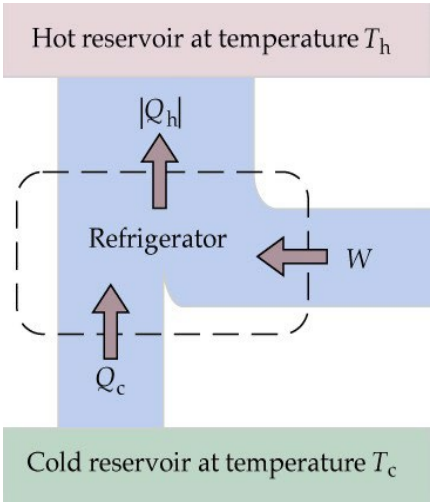
Ejemplos de máquinas térmicas: Ciclo frigorífico.



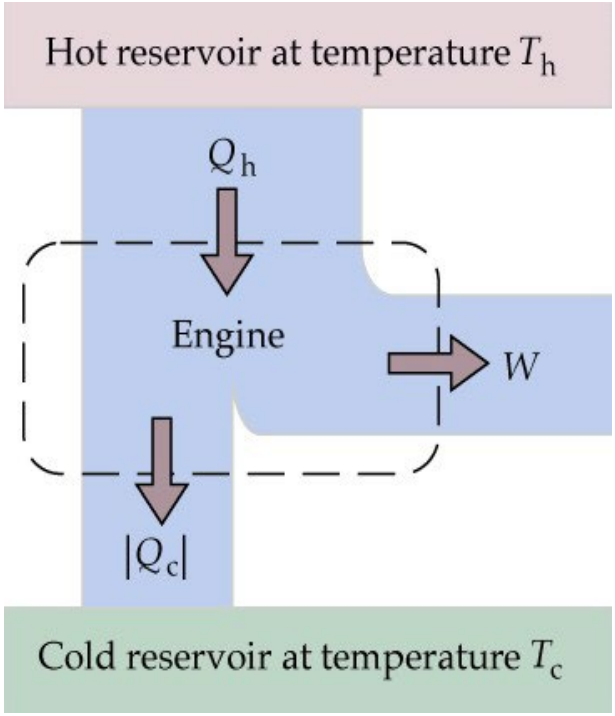
Ejemplos de máquinas térmicas: Ciclo frigorífico.



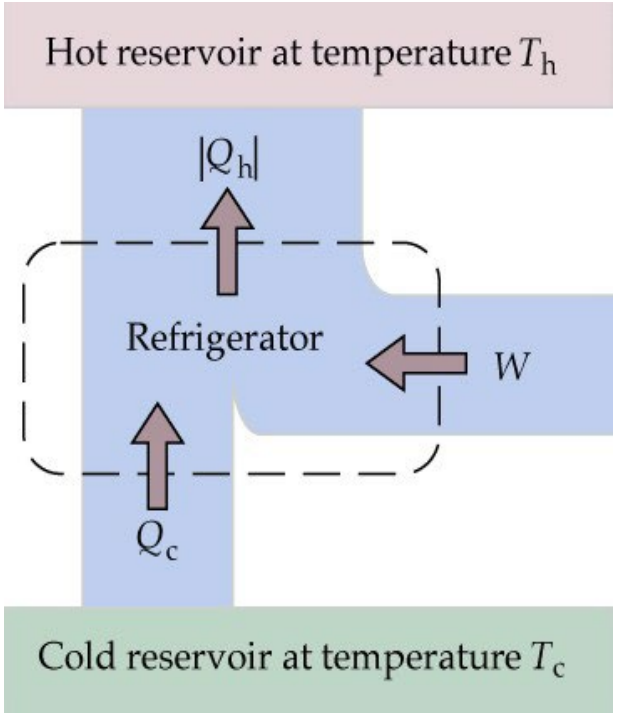




Resumen de los tipos de máquinas térmicas.



Motor



Frigorífico o bomba de calor

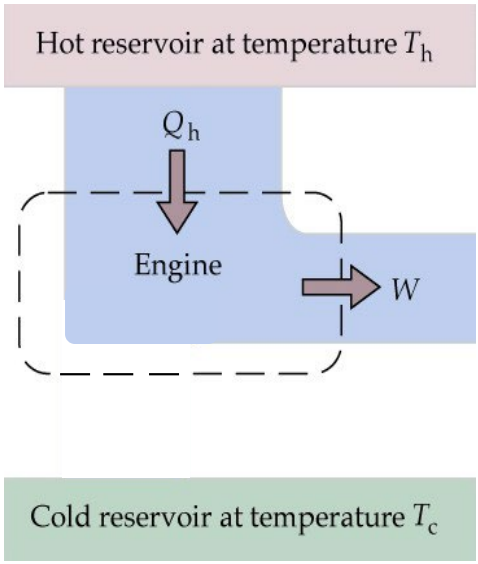
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

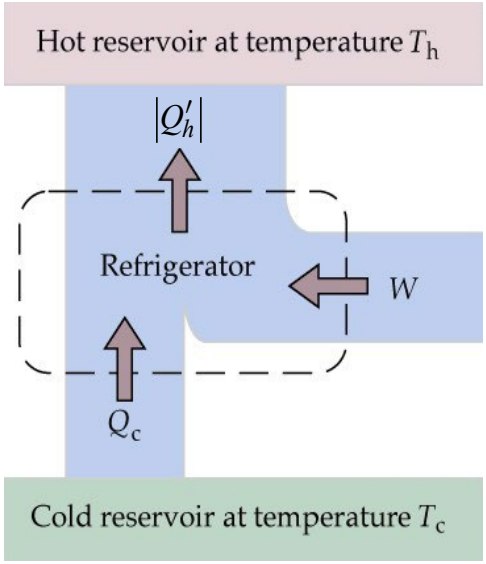
Enunciado de Kelvin

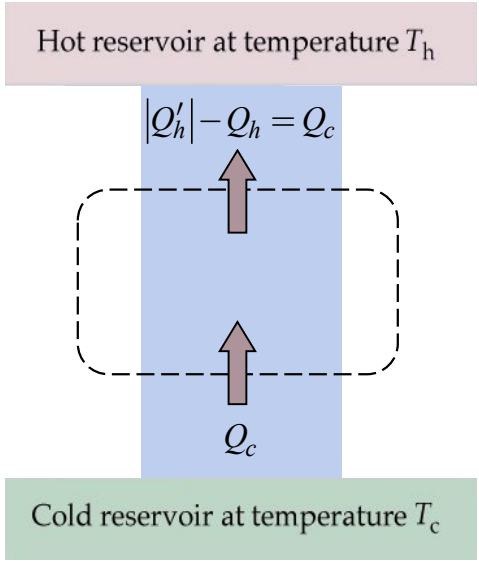
Admitiendo que el enunciado de Kelvin es falso podemos construir un motor en el que el calor cedido a la fuente fría sea cero.

Si a continuación construimos un frigorífico trabajando entre las dos misma fuentes de calor y que en cada ciclo absorbe un trabajo igual al que da el motor

Uniendo ambas máquinas podemos construir una máquina que ceda calor de una fuente fría a una caliente sin hacer trabajo sobre ella violando así el enunciado de Clausius.







No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Enunciado de Clausius

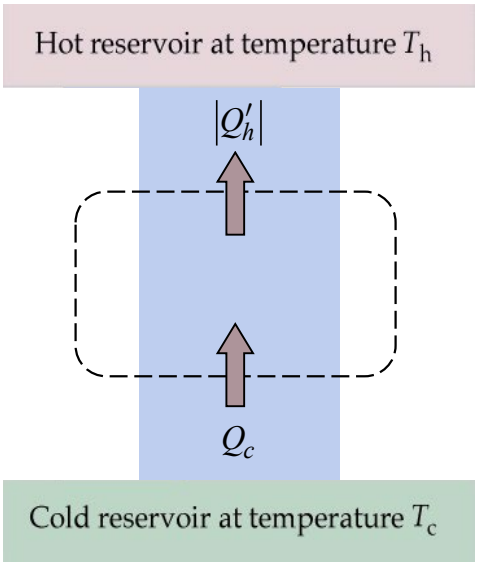
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

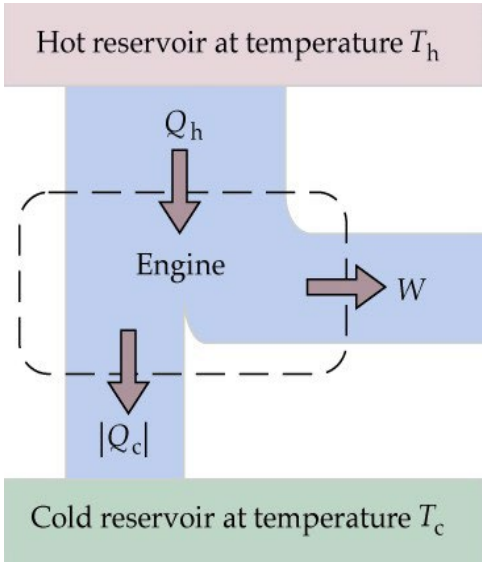
Enunciado de Clausius

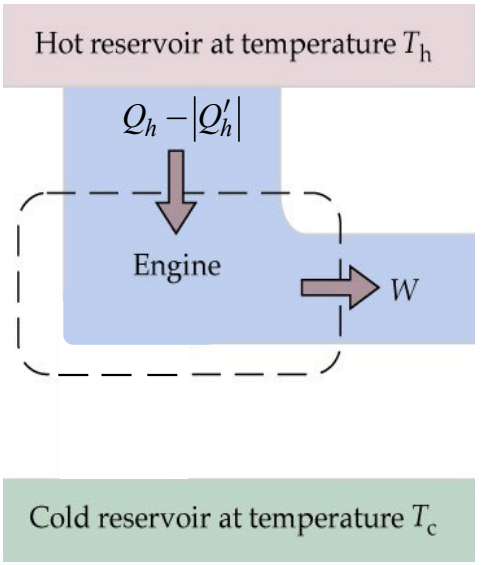
Admitiendo que el enunciado de Clausius es falso podemos construir un frigorífico que ceda calor a una fuente caliente sin hacer trabajo sobre él.

Si construimos un motor trabajando entre las dos misma fuentes de calor y que en cada ciclo ceda a la fuente fría la misma cantidad de calor que absorbe nuestro frigorífico ideal.

Uniendo ambas máquinas podemos construir una máquina cuyo que ceda calor de una fuente fría a una caliente violando así el enunciado de Clausius.

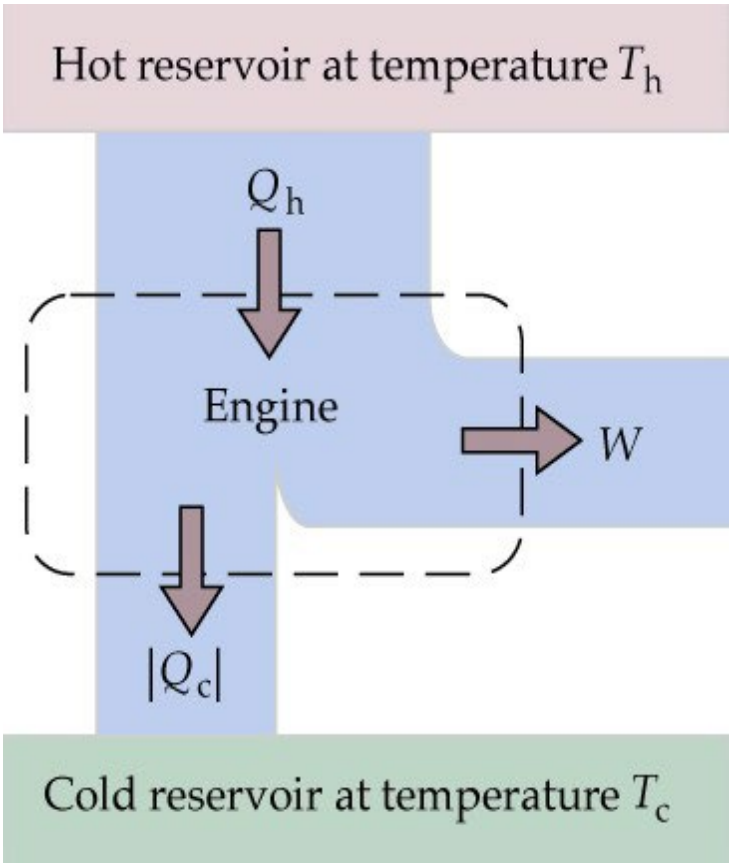






Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Motor Térmico.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$Q = Q_h - |Q_c| = \Delta U + W = W$$

Rendimiento del motor térmico.

$$\varepsilon = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - |Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} \Rightarrow \varepsilon < 1$$

$$\varepsilon_{\%} = 100\left(1 - \frac{|Q_c|}{Q_h}\right) \Rightarrow \varepsilon < 100\%$$

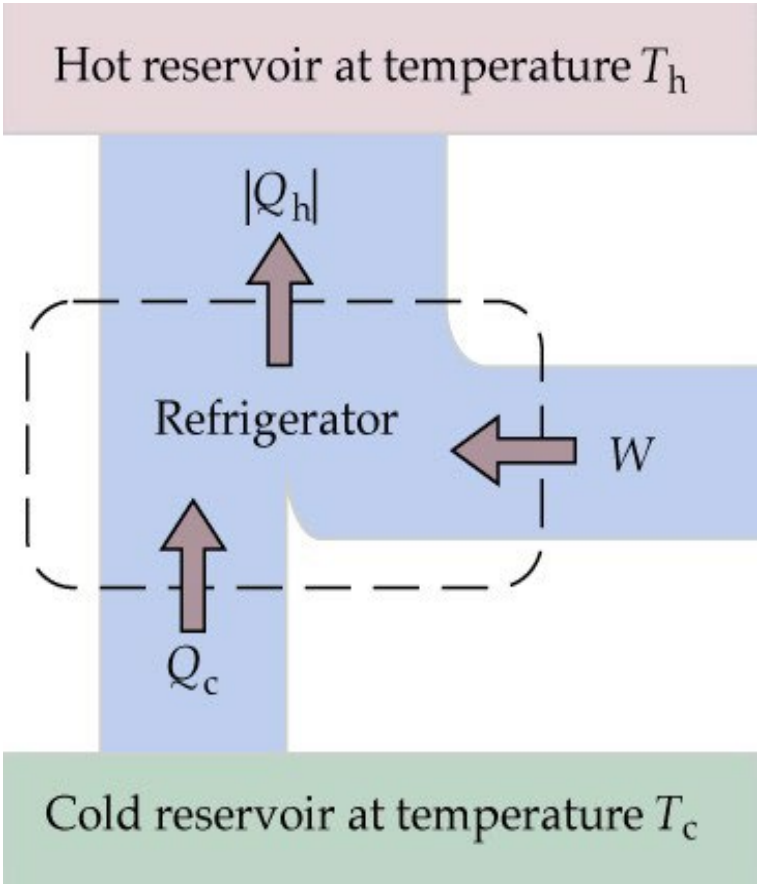
Es imposible extraer calor de un sistema a una sola temperatura y convertirlo en trabajo mecánico sin que el sistema o los alrededores cambien de algún modo.

Enunciado de Kelvin

Es imposible que una máquina térmica trabaje cíclicamente sin producir ningún otro efecto que extraer calor de un solo foco realizando una cantidad de trabajo exactamente equivalente.

Enunciado de la máquina térmica

Refrigerador.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$Q = Q_c - |Q_h| = \Delta U + W = W$$

$$W < 0$$

$$0 < Q_c < |Q_h| \Rightarrow \frac{|Q_h|}{Q_c} > 1 \Rightarrow 0 < \frac{|Q_h|}{Q_c} - 1$$

Coeficiente de eficacia.

$$\eta = -\frac{Q_c}{W} = \frac{Q_c}{|Q_h| - Q_c} = \frac{1}{\frac{|Q_h| - Q_c}{Q_c}} = \frac{1}{\frac{|Q_h|}{Q_c} - 1} > 0$$

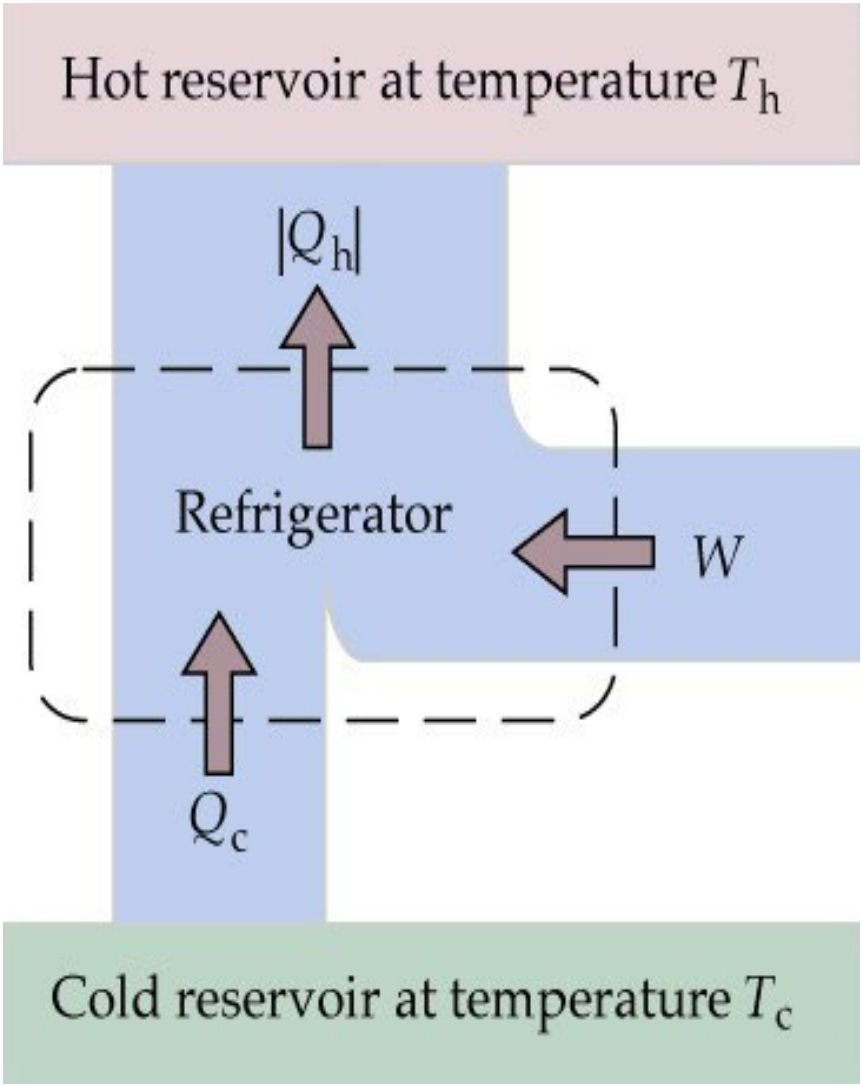
No es posible ningún proceso espontáneo cuyo único resultado sea el paso de calor (energía térmica) de un objeto, a otro de mayor temperatura.

Enunciado de Clausius

Es imposible que un refrigerador funcione cíclicamente sin producir otro efecto que la transferencia de calor de un objeto frío a otro caliente.

Enunciado del refrigerador

Bomba de calor.



Aplicación del Primer Principio de la Termodinámica.

La variación de energía interna en un ciclo es cero y por tanto

$$\left.\begin{array}{c} Q = Q_c - |Q_h| = \Delta U + W = W \\ \Delta U = 0 \end{array}\right| \Rightarrow Q_c - |Q_h| = W \Rightarrow$$

$$W < 0 \Rightarrow Q_c - |Q_h| < 0 \Rightarrow 0 < Q_c < |Q_h| \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 < \frac{Q_c}{|Q_h|} < 1 \Rightarrow -1 < \frac{Q_c}{|Q_h|} - 1 < 0 \Rightarrow$$

$$0 < 1 - \frac{Q_c}{|Q_h|} < 1$$

Coeficiente de eficacia.

$$\eta = -\frac{|Q_h|}{W} = \frac{|Q_h|}{|Q_h| - Q_c} = \frac{1}{\frac{|Q_h| - Q_c}{|Q_h|}} = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{|Q_h|}} > 1$$

Según el segundo principio de la termodinámica no existe un motor térmico con un 100% de rendimiento. Entonces, ***¿cuál es el rendimiento máximo posible para esta máquina?***

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.

Enunciado del ***teorema de Carnot***

Máquina térmica reversible es aquella máquina térmica en la que todos los procesos son reversibles

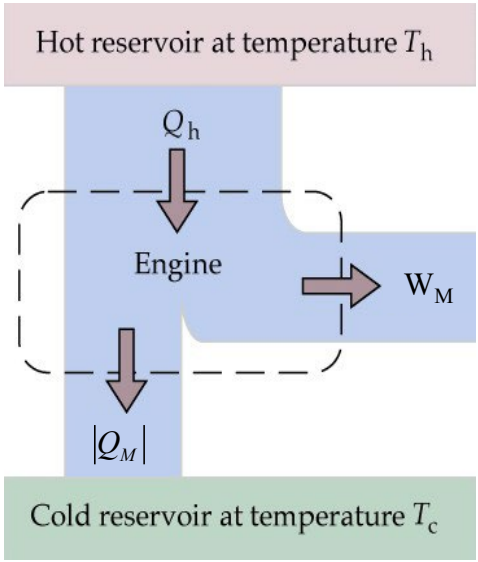
Definición de máquina térmica reversible

Se dice que un proceso es reversible cuando se puede hacer que el sistema vuelva a su estado original, sin variación neta del sistema ni del medio

Definición de proceso reversible

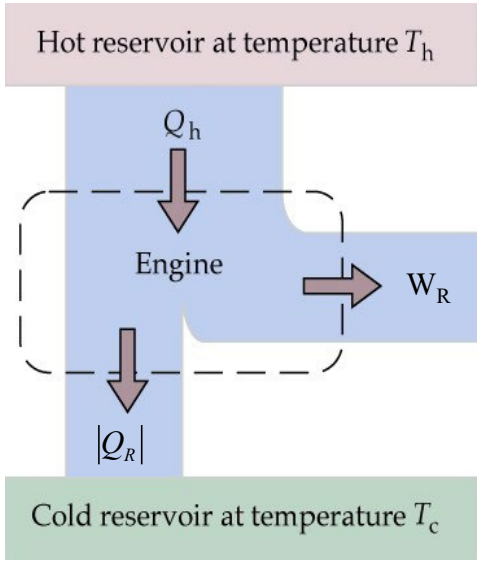
Enunciado del teorema de Carnot

Ninguna máquina térmica que trabaje entre dos focos térmicos dados puede tener un rendimiento mayor que una máquina reversible que trabaje entre los dos mismos focos.



Motor normal

$$\eta_M = 1 - \frac{|Q_M|}{Q_h}$$

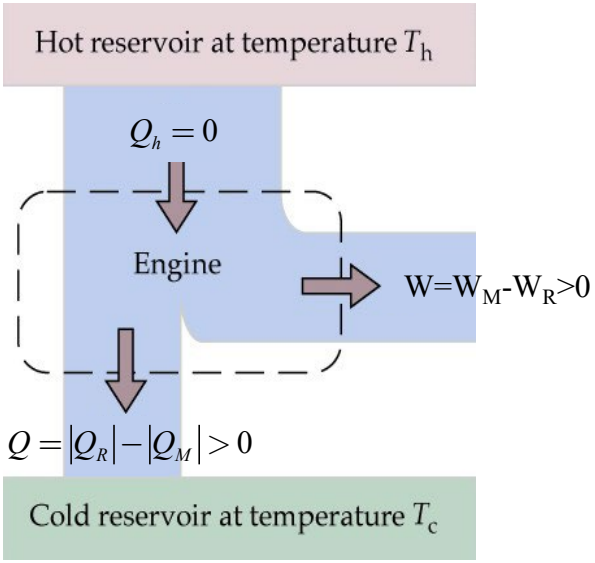


Motor reversible

$$\eta_R = 1 - \frac{|Q_R|}{Q_h}$$

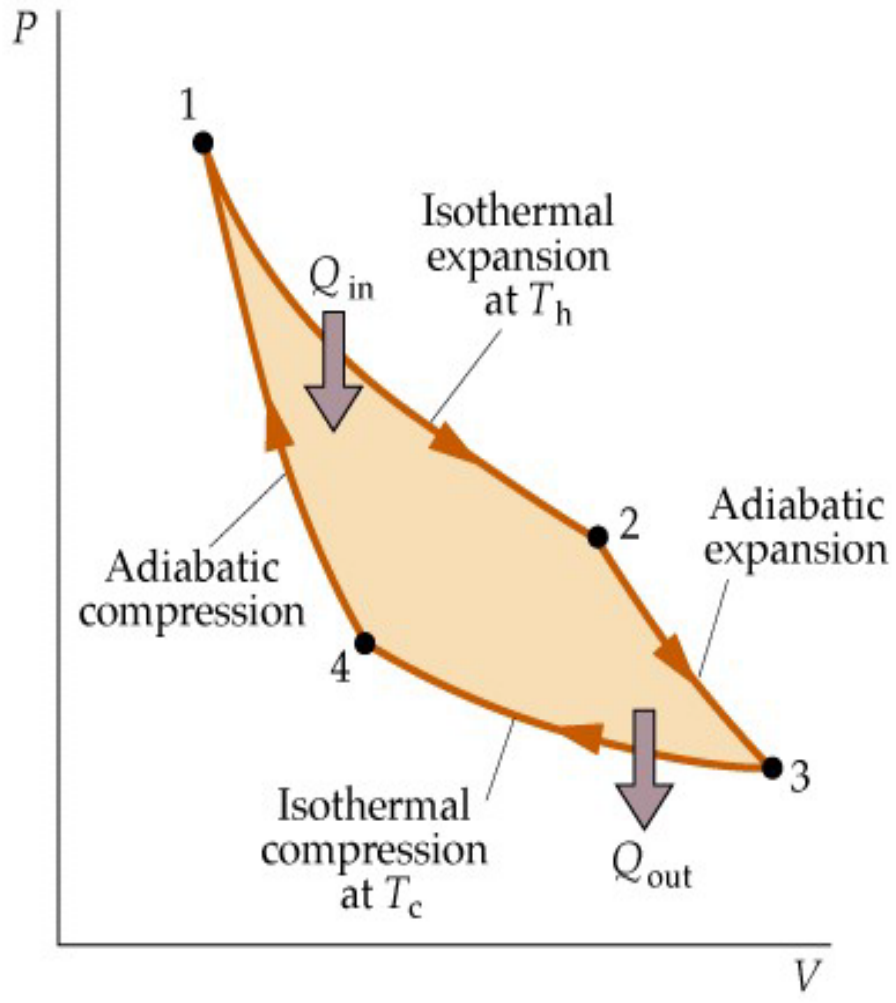
$$\text{Si } \eta_M > \eta_R \Rightarrow \begin{vmatrix} |Q_M| < |Q_R| \\ W_M > W_R \end{vmatrix}$$

Si invertimos el funcionamiento de la máquina reversible y le sumamos el motor normal, tenemos:



Se viola el enunciado de Kelvin.

Ciclo de Carnot.



Rendimiento máximo de un motor térmico.

$$\varepsilon = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Coeficiente de eficiencia máximo de un frigorífico.

$$\eta = \frac{1}{\frac{T_h}{T_c} - 1} = \frac{T_c}{T_h - T_c}$$

Coeficiente de eficiencia máximo de una bomba de calor.

$$\eta = \frac{1}{1 - \frac{Q_c}{|Q_h|}} = \frac{1}{1 - \frac{T_c}{T_h}} = \frac{T_h}{T_h - T_c}$$

Ejemplo.- Una sociedad ofrece acciones para construir una central térmica diseñada de modo que absorbe 100 kW del foco caliente (800 K), cede 20 kW al foco frío (200 K) y suministra una potencia de 80 kW; ¿compraría acciones de esta sociedad?

Ejemplo.- Una sociedad ofrece acciones para construir una central térmica diseñada de modo que absorbe 100 kW del foco caliente (800 K), cede 20 kW al foco frío (200 K) y suministra una potencia de 80 kW; ¿compraría acciones de esta sociedad?

$$\varepsilon \leq 1-\frac{T_c}{T_h}=1-\frac{200}{800}=0.75 \Leftarrow \varepsilon\% \leq 75\%$$

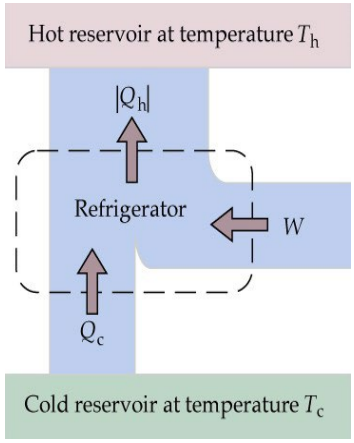
$$\varepsilon = 1-\frac{|Q_c|}{Q_h}=1-\frac{20\ \text{kW}}{100\ \text{kW}}=1-0.2=0.8 \Rightarrow \varepsilon\% = 80\%$$

Ejemplo.- ¿Cuál es el mejor sistema de calefacción que podemos utilizar para calentar la casa?

Fuente energética	Eficiencia energética	Precio del combustible	
Gasoil			
Gas			
Brasero			
Bomba de calor			

Ejemplo.- ¿Cuál es el mejor sistema de calefacción que podemos utilizar para calentar la casa?

Fuente energética	Eficiencia energética	Precio del combustible	
Gasoil	10 Kwh/l	1.5 €/l	1.5/(10·0.92)=0.16 €/Kwh
Gas	8.5 Kwh/m^3	0.68 €/m3	0.68/(8.5·0.8)=0.1 €/Kwh
Brasero			0.13 €/Kwh
Bomba de calor			0.13/10=0.013 €/Kwh



$$\frac{|Q_h|}{W} = \frac{T_h}{T_h - T_c} = \frac{298}{20} \approx 15$$

Desarrollo histórico de la Óptica

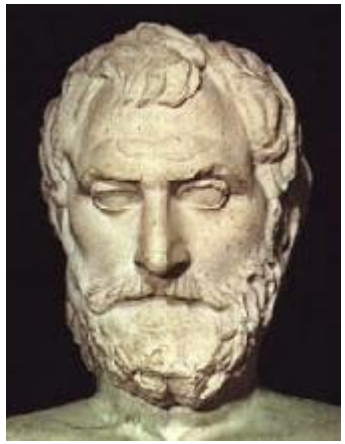
Junto con el movimiento y la percepción de los procesos térmicos, los fenómenos ópticos son los más fáciles de ser observados al no ser necesario en muchos casos ningún aparato especial para ello. Por ello la óptica fue una de las ramas pioneras de la Física.



Las nociones que tenemos de la óptica en la antigüedad, son muy escasas y mal documentadas, lo que no permite hacer afirmaciones concretas sobre el tema. Sin embargo en el siglo XV antes de Cristo, durante el reinado de Tutmes III (XVIII dinastía de Egipto), aparecen los primeros vasos de vidrio y esmaltes artísticos de este material siendo la relación entre el vidrio y la óptica importantísima. Por otro lado, en el año 1928, el arqueólogo Beck encuentra lentes planos convexas y biconvexas, procedentes de la Antigua Mesopotamia de más de 3000 años antes de Cristo y en Creta se hallan lentes biconvexas de una antigüedad, comprendida entre los años 3000 y 1200 antes de Cristo. En ambos casos eran utilizadas como objetos sagrados para encender fuego.

En el siglo V a. C. los griegos y los romanos conocían las propiedades de los espejos, cauterizaban las heridas con lentes positivas y para encender fuego usaban unas esferas de vidrio llenas de agua llamadas "cristales encendedores". Quizá la primera lente que hubo en el mundo fue la que construyó Aristófanes en el año 424 a. C. con un globo de vidrio soplado, lleno de agua. Arquímedes (287-212), según cuenta la tradición, defendió su ciudad natal, Siracusa, empleando espejos "ustorios", que son espejos cóncavos de gran tamaño, para concentrar los rayos del Sol en los barcos enemigos y quemar las naves de los romanos. Hace unos 4 años científicos británicos realizaron un experimento para comprobar si era posible y descubrieron que para que un barco se incendiara se necesitaba un espejo de 420 metros cuadrados, espejo que era totalmente imposible construir en su época.

Los Griegos son también los primeros (aproximadamente en el 500 a.C.) en intentar explicar los procesos ópticos. Así los griegos pensaban que la percepción visual de los objetos distantes requería un "algo" que enlazara nuestra alma con el objeto visto, y, así, la escuela atomística ; según escritos atribuidos a Leucipo (hacia el 450 a.C.), sostenía que la visión se producía porque los objetos emitían "imágenes", especies de sombras o simulacros materiales que revestían a los cuerpos, y que, desprendiéndose de ellos, venían a través de los ojos a nuestra alma con sus formas, colores y demás cualidades.



Leucipo

La escuela pitagórica sostenía, por el contrario, según escritos de Apuleyo (430-365 a.C.), que la visión se producía por medio de un "fuego invisible" que saliendo de los ojos, a modo de tentáculo, iba a tocar y explorar los objetos, poniéndonos de manifiesto su forma y color; algo análogo a lo que hace el sentido del tacto. Basándose en esta teoría, hacia el año 300 a.C., Euclides da a los problemas de la luz un nuevo rumbo introduciendo, dado su espíritu matemático, razonamientos de tipo geométrico. En los catorce postulados de su "Óptica" introduce el concepto de *rayo* - sobre el supuesto de que lo emite el ojo -, la propagación rectilínea y diversas condiciones geométricas de la visión, como son tamaños de imágenes, ángulos, etc. En los siete postulados de la "Catóptrica" establece, entre otras cuestiones de orden geométrico, la **ley de la reflexión**.



Euclides



Alhacen de Basora

La llegada de la Edad Media supuso una parada importante en el avance del conocimiento de forma que hasta trece siglos después, con el árabe Alhazen de Basora (965-1039), no hay indicio del menor progreso, salvo que Galeno (130-201 d.C.) da a conocer la anatomía del ojo. Alhazen es el primero en apuntar la idea de que la luz procede de los objeto o que va del Sol a los objetos y de estos a los ojos, comportándose como un proyectil, y, basándose en las leyes del choque elástico, obtiene de nuevo la ley de la reflexión que aplica al estudio de la formación de imágenes en los espejos. Además Alhazen plantea su teoría sobre la visión binocular, haciendo interesantes estudios sobre la reflexión y la refracción de la luz, realizando experimentos que se aproximaron al descubrimiento de las propiedades ópticas de las lentes. Importantes aportes hace también Averroes en el siglo XII y Vitelio, referente a los rayos luminosos y a la óptica en general.

En el siglo XIII, empiezan a aparecer las primeras lentes provistas de cristales convergentes, como ayuda a los présbitas, al parecer en el norte de Italia, en la región Veneciana. En un comienzo fueron lupas de forma plano convexas, las cuales se colocaban sobre la lectura, permitiendo ver las letras más grandes. A esta primera lupa, se le agregó un mango, haciendo más fácil su manejo. Uniendo dos de estas lupas, se llegó a una lente manual que se denominó "Lentes de Remache", que se extendió por todas partes. A varios estudiosos se les ha atribuido el hecho de ser los inventores de las lentes, entre ellos al monje franciscano inglés Roger Bacon del siglo XIII, también a Alejandro della Spina, otro monje franciscano del mismo siglo, ya que fue el primero en comunicar el secreto de la fabricación de las lentes que él hacia para su uso y para sus amistades.

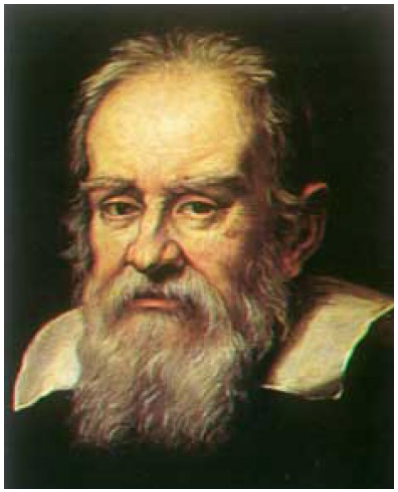
Rivalta, un monje florentino, en un sermón que predicó en 1305, dice que "*no hace 20 años que se inventó el arte de fabricar lentes"*, uno de los más maravillosos artes. Todo lo antes expuesto, nos lleva a la convicción de que las lentes ópticas hacen su aparición a fines del siglo XIII, o a comienzos del XIV en la región de Venecia, y que parecen proceder de los monjes de algún monasterio desconocido. Las primeros lentes se fabricaron para la presbicia y eran convexas. Un siglo después aparecieron las lentes cóncavas para la miopía. Petrarca en 1364, dice que debió usar anteojos debido a su edad. En 1461, el poeta francés Villon, legó sus lentes de lectura para los pobres. En la iglesia de San Nicolás de Treviso, existe el primer cuadro de una persona con lentes, se trata del cardenal Hugo de Provenza, pintado por Tomás de Módena en 1352.

En el año 1436, cuando Gutenberg inventa la imprenta, se produce una verdadera revolución en la lectura de libros, y con ello una mayor demanda de lentes. Fue entonces cuando aparecen los primeros talleres dedicados a fabricarlas, dejando de ser un arte monacal. Estos primeros talleres se ubicaron en Núremberg, Haarlem y Venecia, fundándose en Núremberg, en el año 1438, el primer gremio de maestros fabricantes de lentes ópticos.

A finales del siglo XVI y principios del XVII comienza una gran actividad en el campo de la óptica. En esta época, sin que se sepa exactamente cuándo, se generaliza el uso de las lentes y espejos, a lo que dio gran impulso la obra del napolitano Juan Bautista Laporta (1535-1615). También en este periodo se generaliza el uso de los instrumentos ópticos después de las conquistas de Kepler (1571-1630) y Galileo (1565-1642).



Johannes Kepler



Galileo Galilei

En 1621 el holandés Snelius descubre experimentalmente la ley de la refracción, aunque su descubrimiento permanece ignorado hasta que finalmente, en 1638, Descartes (1596-1650) publica su '**Optica**' en la que definitivamente aparecen establecidas **las leyes de la reflexión y refracción** sobre la base de que la luz se comporta como un proyectil, pero sin pronunciarse sobre su naturaleza.

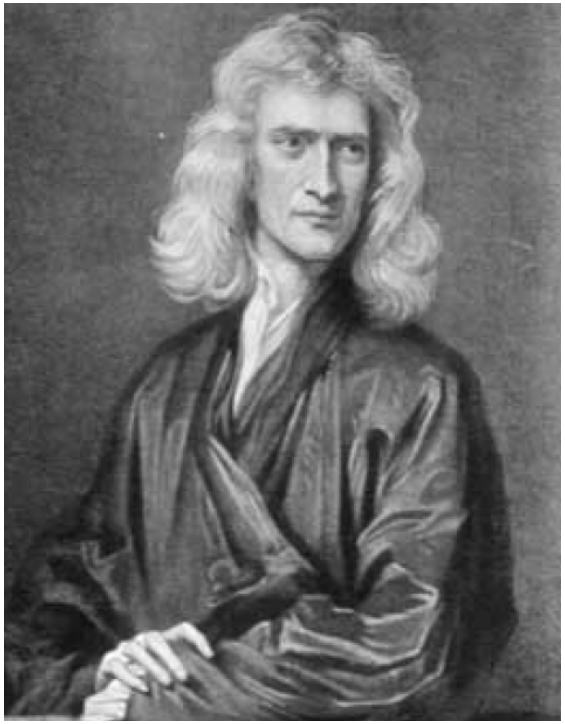


Willebrord Snell



René Descartes

Newton (1642-1726) reemprende los trabajos sobre la luz sentando el 'modelo corpuscular'. Para Newton la luz estaba constituida por *partículas materiales* que, lanzadas a gran velocidad por los cuerpos emisores, se propagaban en línea recta constituyendo los rayos de luz. Los colores, que hasta entonces se creían consecuencia de que la luz blanca se "contaminaba" al atravesar o chocar con los objetos coloreados, fueron interpretados por Newton después de descubrir la dispersión en el prisma.



Isaac Newton

Para él la luz blanca se componía de luces simples de distintos colores, y esto era consecuencia de que las partículas de luz correspondientes a cada color tenían distinta masa .

Con su modelo corpuscular explicó la refracción , suponiendo que las partículas eran atraídas hacia la superficie de separación con lo que aumentaba su velocidad normal, mientras la componente tangencial quedaba inalterada, lo que conducía a la relación de Descartes sen E/sen E' = v'/ v = cte, pero le implicaba que la luz en el medio más denso debía tener mayor velocidad.

Esta contradicción con el sentido común (y con algunas evidencias experimentales) no tuvo mayor trascendencia, toda vez que las leyes de la refracción en lo que a direcciones respecta eran acordes con la experiencia. Sin embargo, en 1849, el francés Foucault midió en el laboratorio la velocidad de la luz poniendo de manifiesto que era menor en los cuerpos más densos.



Pierre Fermat

Con todo ello, el modelo corpuscular de luz, que pudiéramos llamar "geométrico", estuvo vigente, pese a sus contradicciones, por espacio de un siglo, durante el cual la óptica geométrica alcanzó un desarrollo completo sobre la base del principio de Fermat (1601-1665) del cual se deducen las leyes de la reflexión y la refracción.

LEYES DE LA ÓPTICA GEOMÉTRICA O DE DESCARTES

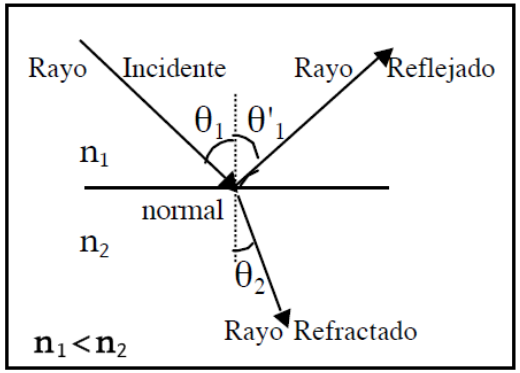
1.- Las trayectorias en los medios homogéneos e isótropos son rectilíneas (rayo de luz).

2.- El rayo incidente, el refractado y la normal están en un mismo plano.

3.- Ley de la refracción de Snelius. Cuando un rayo de luz pasa de un medio de propagación a otro sufre una desviación que viene dada por:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

4.- Ley de la reflexión. Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie y se refleja los ángulos que el rayo incidente y el reflejado forman con la normal son iguales. $\theta_1 = \theta_1'$



5.- Los rayos de luz no interaccionan entre si (se ignora el carácter ondulatorio dela luz).

Contemporáneo de Newton fue el holandés Ch. Huygens (1629-1695), quién propuso el "modelo ondulatorio de la luz". Para él la luz era un fenómeno ondulatorio de tipo mecánico, como el sonido, que se propagaba en un medio muy particular: el *éter,* especie de fluido impalpable que lo llenaba todo, incluso el vacío, donde la luz también se propagaba.

Debido a la gran autoridad científica de Newton, la teoría ondulatoria no pudo progresar hasta el primer cuarto de siglo XIX en que el inglés T. Young (1773-1812) explicó sobre su base, en 1802, las interferencias, midiendo por primera vez y por este medio las longitudes de onda correspondientes a distintos colores espectrales. El francés A. Fresnel (1788-1827) explicó la difracción descubierta por el P. Grimaldí (1618-1663), y los fenómenos de propagación y polarización en los medios anisótropos basándose en la misma teoría.

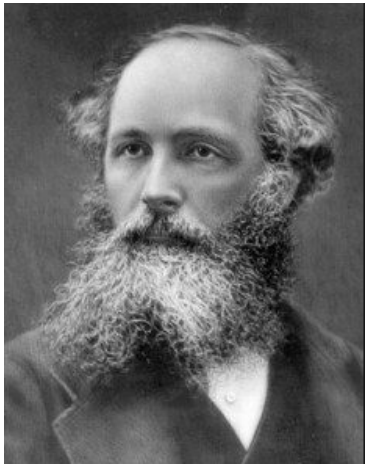
La teoría ondulatoria, que, aun cuando tuvo grandes éxitos, apareció llena de contradicciones en sus principios básicos, fue finalmente afirmada por el inglés J.C. Maxwell en 1864 al descubrir que la luz era en realidad ondas electromagnéticas en lugar de mecánicas, dando así origen a la teoría electromagnética de la luz, que fue confirmada experimentalmente por Hertz en 1888.



Christiaan Huygens



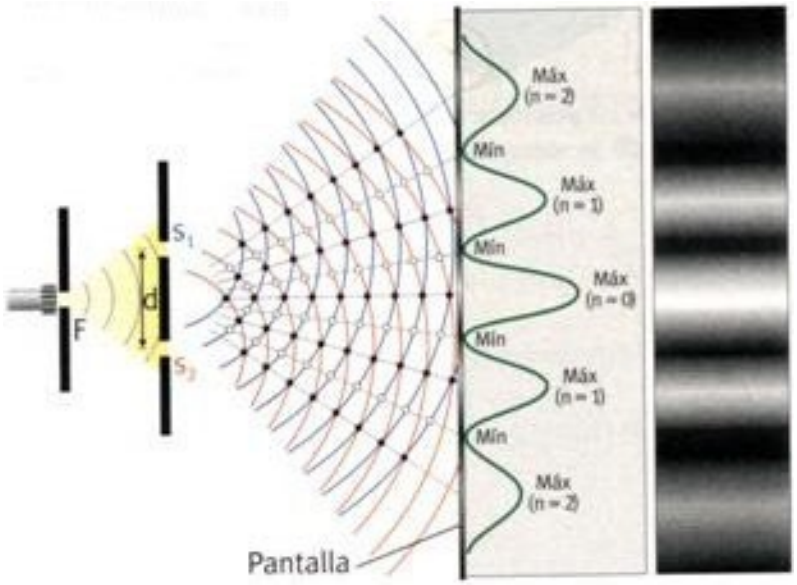
Thomas Young



J.C. Maxwell

COMPORTAMIENTOS ONDULATORIOS EXIBIDOS POR LA LUZ

1.- Refracción de la luz al pasar por una rendija y por el que se forma un patrón de interferencias.



2.- La luz son ondas electromagnéticas (Maxwell 1864).

Desarrollo histórico del Electromagnetismo

El conocimiento de las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia data de las primeras civilizaciones, pero durante milenios ha permanecido como un interesante y misterioso fenómeno, sin una teoría que explique sus fundamentos. Así, por ejemplo, En la antigüedad ya estaban familiarizados con los efectos de la electricidad atmosférica, en particular, del rayo al que, en un principio, se le asignó una naturaleza divina.

Por otro lado, que el ámbar al ser frotado adquiere carga fácilmente es una propiedad conocida desde la prehistoria. Asimismo, textos de antes del 2750 a.C. acreditan que los antiguos egipcios conocían la existencia de peces eléctricos. La primera mención que se hace en texto antiguos del magnetismo indica que su descubrimiento tuvo lugar hace más de 2000 años en Asia Menor, en donde se descubrieron cierto tipo de rocas que se atraían unas a otras y además también atraían pequeños trozos de hierro. Debido a que estas rocas se encontraron en la región de Magnesia, recibieron el nombre de magnetos. Se comprobó que las propiedades de atracción exhibidas por las rocas de Magnesia (el magnetismo) era una propiedad permanente de las mismas y no se podía eliminar de la roca aún partiéndola en diferentes partes. La colección de fenómenos observados relacionados con la electricidad y el magnetismo fue aumentó a lo largo de los años pero los científicos fueron incapaces de ver la relación entre fenómenos eléctricos, magnéticos, y, mucho, menos electromagnéticos.

Hubo que esperar hasta el siglo XI en el que se descubrió la brújula magnética. El primero que escribió sobre ella fue el científico chino Shen Kuo (1031-1095) que mejoró la precisión de la navegación mediante el empleo del concepto astronómico de norte verdadero (señalado en 1088 d.C.). De esta manera, en el siglo XII los chinos eran conocidos por usar la piedra imán brújula para la navegación. Alexander Neckham en el año 1187 fue el primero en Europa en describir la brújula y su uso para la navegación.

El descubrimiento de la brújula permitió el avance del conocimiento de los fenómenos magnéticos durante la Edad Media. Así, en el siglo XIII Peter Peregrinus de Maricourt realizó experimentos sobre el magnetismo y escribió el primer tratado existente que describe las propiedades de los imanes y las agujas pivotantes de brújula.

El médico renacentista italiano Girolamo Cardano escribió acerca de la electricidad en De Subtilitate (1550) distinguiendo, tal vez por primera vez, entre fuerzas eléctricas y magnéticas. Hacia la última parte del siglo XVI un médico de la época de la reina Isabel, el Dr. William Gilbert, en De Magnete, amplió el trabajo de Cardano y acuñó la nueva palabra latina «electricus» de (Elektron), palabra griega que significa «ámbar». Aunque el primer uso de la palabra «electricidad» se atribuye a Sir Thomas Browne en su obra de 1646, «Pseudodoxia Epidemica». Gilbert emprendió un número de cuidadosos experimentos eléctricos, en el curso de los cuales descubrió que muchas otras sustancias distintas al ámbar, como el azufre, la cera, el cristal, etc, eran capaces de manifestar también propiedades eléctricas. Además, Gilbert también descubrió que un cuerpo calentado perdía su electricidad y que las sustancias electrificadas atraen a otras sustancias indiscriminadamente, mientras que un imán solo atrae el hierro. Muchos descubrimientos de esta naturaleza ganaron para Gilbert el título de fundador de la ciencia eléctrica.

Otro pionero fue Robert Boyle, que en 1675 declaró que la atracción y la repulsión eléctrica pueden actuar a través del vacío. Uno de sus importantes descubrimientos fue que los cuerpos electrizados en el vacío pueden atraer sustancias ligeras, esto indica que el efecto eléctrico no depende del aire como medio. También añadió la resina a la lista conocida hasta entonces de sustancias eléctricas.



Robert Boyle

Esto fue seguido en 1660 por Otto von Guericke, que inventó uno de los primeros generadores electrostáticos. A finales del siglo XVII, los investigadores habían desarrollado los medios prácticos de generación de electricidad por la fricción con un generador de electrostático, pero el desarrollo de máquinas electrostáticas no comenzó en serio hasta el siglo XVIII, cuando se convirtieron en instrumentos fundamentales en el estudio de esta nueva ciencia. Este desarrollo permitió el diseño de muchos experimentos nuevos y la comprensión de los fenómenos electromagnéticos.



Otto von Guericke

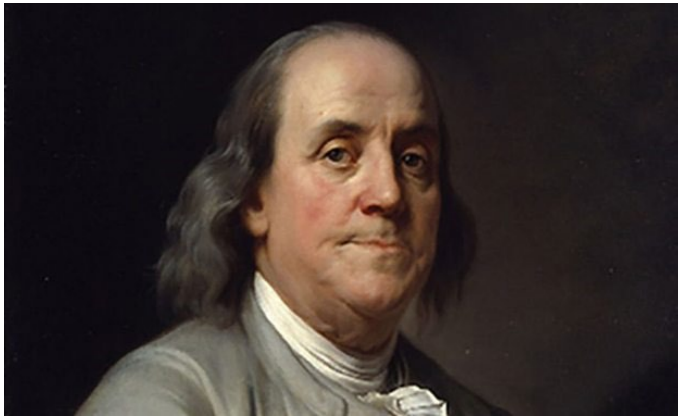
Así, en 1737, Du Fay y Hauksbee descubrieron de forma independiente que parecía haber dos clases de electricidad estática: una generada a partir del frotamiento del vidrio y otra por el frotamiento de la resina. De esto, Du Fay enunció la teoría de que la electricidad se compone de dos fluidos eléctricos, «vítrea» y «resinosa», que están separados por la fricción y que se neutralizan entre sí cuando se combinan. Esta teoría de los dos fluidos más tarde daría lugar al concepto de cargas eléctricas «positivas» y «negativas» ideado por Benjamin Franklin (1752).



Du Fay



Hauksbee



Franklin

Además de por el concepto de cargas positivas y negativas, Benjamin Franklin fue el que estableció que el origen de los fenómenos observados en máquinas eléctricas o por frotamiento era el mismo que el de los rayos.

En 1785 Charles-Augustin de Coulomb describe de forma matemática la ley de interacción entre cargas eléctricas.

Paralelamente a la identificación y cuantificación de los fenómenos eléctricos se descubrió que la materia se comportaba fundamentalmente de dos formas ante los fenómenos eléctricos, o eran conductores o aislantes.



Coulomb

El descubrimiento de que la electricidad podría ser transmitida a distancia enseguida despertó la idea de hacer un uso práctico de este fenómeno. Así, en 1774 se propuso el empleo de 24 conductores, aislados unos de otros y cada uno de ellos tenía una bolita conectado a su extremo final. Cada conductor representa una letra del alfabeto. Para enviar un mensaje, el conductor deseado era fue cargado momentáneamente con electricidad de una máquina eléctrica, con lo cual la bola conectada a ese alambre salía volando; y de esta manera se transmitirían los mensajes.

Si bien a lo largo del siglo XVIII se desarrollaron la generación de cargas eléctricas y su almacenamiento mediante diseños cada vez más sofisticados de máquinas eléctricas por frotación y condensadores, a finales de dicho siglo se dio un paso fundamental en la generación y almacenamiento de carga eléctrica. Volta, basándose en trabajos realizados por su amigo Galvani, descubre que las reacciones químicas pueden utilizarse para crear ánodos cargados positivamente y cátodos cargados negativamente y en 1800 construye la primera batería eléctrica capaz de producir una corriente eléctrica grande.



Alexandro Volta



Luigi Galvani



Hans Christian Oerster

Unos años después, de forma casual, el físico danés Hans Christian Oerster descubrió que al acercar un circuito eléctrico, por el que circulaba una corriente eléctrica, a las inmediaciones de una brújula está se desviaba y dejaba de apuntar hacia el norte magnético de la tierra. La conclusión inmediata fue (1820) que los fenómenos magnéticos eran consecuencia de las cargas eléctricas en movimiento o de la intensidades de corriente eléctrica. Al poco tiempo los físicos franceses Jean-Baptiste Biot y Félix Savart obtuvieron la expresión matemática que permite calcular el campo magnético que crea una intensidad de corriente.

Unos años después, Ampere (1831), encontró otra expresión matemática que ligaba las corrientes eléctricas con los campos magnéticos que producían. Esta ley sería posteriormente modificada por Maxwell cerrando el conjunto fundamental de ecuaciones en las que se fundamenta el electromagnetismo clásico.



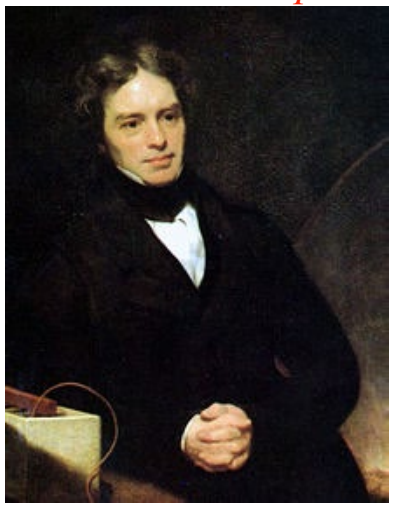
André-Marie Ampere

En 1835 Carl Friedrich Gauss obtuvo una ley general que establece una relación entre el campo vectorial sobre una superficie cerrada y la magnitud de las fuentes de dicho campo (propiedad de la materia que producen el campo) que hay en el interior de la misma superficie. La ley de Gauss aplicada al campo electrostático es equivalente a la ley de Coulomb. Por otro lado, aplicada al campo magnético se obtiene otra ecuación que se conoce con el nombre de ecuación de Gauss para el campo magnético.



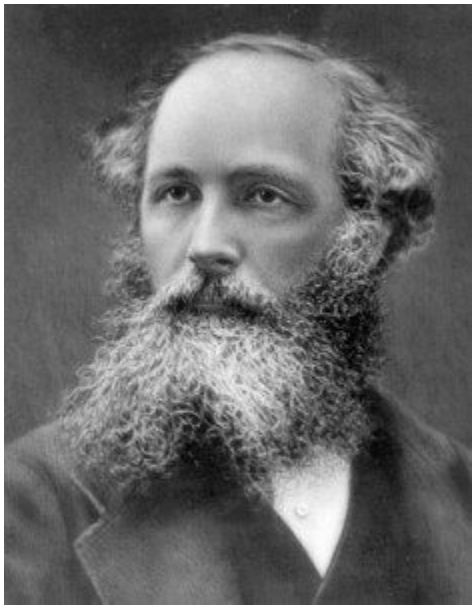
Carl Friedrich Gauss

En 1833, de forma casual, Michael Faraday descubrió que si movía un circuito eléctrico en las proximidades de un imán (campo magnético) en el circuito se inducía una corriente eléctrica. Esto lo llevo a deducir que los campos magnéticos variables con el tiempo generan campos eléctricos.



Michael Faraday

Finalmente, en el año Maxwell en el año 1865 pensó que si los campos magnéticos variables producían campos eléctricos (Ley de Faraday) era lógico pensar que, por simetría, los campos eléctricos variables en el tiempo produjesen campos magnéticos. Esto llevaba automáticamente a generalizar la ley de Ampere introduciendo el concepto de corriente de desplazamiento. Lo importante es que esta ley permitió describir todos los fenómenos relacionados con los campos eléctrico y magnético con sólo cuatro ecuaciones (Leyes de Gauss para el campo eléctrico y magnético, Ley de Faraday-Lenz, Ley de Ampere-Maxwell) conocidas con el nombre de ecuaciones de Maxwell debido a que este último investigador fue el que unificó todos los conocimientos recopilados en relación con el electromagnetismo.



James Clerk Maxwell



Heinrich Hertz

Las ecuaciones de Maxwell predecían la existencia de las ondas electromagnéticas cosa que fue experimentalmente comprobada por Hertz unos años después.

Además el propio Maxwell propuso que las ondas luminosas eran en realidad ondas electromagnéticas unificando así óptica y el electromagnetismo clásicos.

ECUACIONES DE MAXWELL

Todo los fenómenos electromagnéticos y el desarrollo de sus aplicaciones, desde el transporte de la energía eléctrica hasta el envío de información inalámbrica, se basan en las cuatro ecuaciones de Maxwell.

LEY DE GAUSS DEL CAMPO ELÉCTRICO $$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r},t) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

LEY DE GAUSS DEL CAMPO MAGNÉTICO $$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

LEY DE FARADAY-LENZ $$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

LEY DE AMPERE-MAXWELL $$\nabla \times \vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \left[\vec{J}(\vec{r},t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t} \right]$$

EXISTENCIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Vamos a comprobar que las ecuaciones de Maxwell predicen la existencia de ondas electromagnéticas en aquellas zonas del espacio donde no hay fuentes, es decir, cargas eléctricas

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r},t) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \left[\vec{J}(\vec{r},t) + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t} \right]$$

Si consideramos una región del espacio libre de fuentes de campo eléctrico y magnético (cargas eléctricas y corrientes)

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r},t) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

EXISTENCIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r},t) = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$\nabla \times$ y $\frac{\partial}{\partial t}$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \nabla \times \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \nabla \times \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A}(\vec{r},t) = \nabla\left(\nabla \times \vec{A}(\vec{r},t)\right) - \nabla^2 \vec{A}(\vec{r},t)$$

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r},t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(\vec{r},t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \vec{B}(\vec{r},t) = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t^2}$$

Ecuación de onda

$$\nabla^2 y = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

1.-

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

2.- El campo eléctrico y magnético tienen que ser obligatoriamente perpendiculares.

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r},t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r},t)}{\partial t}$$

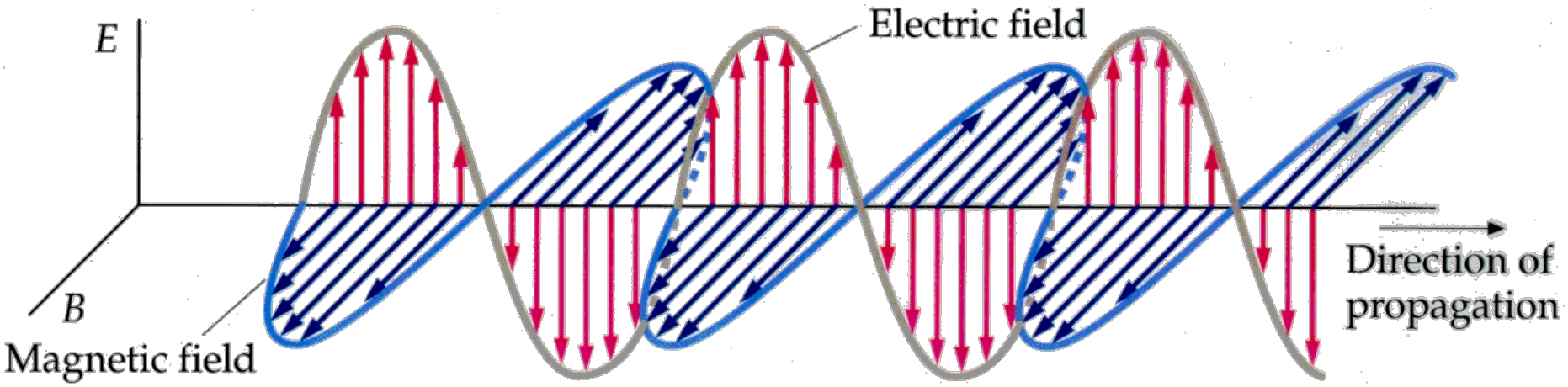
3.- Si consideramos una onda electromagnética plana propagándose en la dirección del eje x, las soluciones de las ecuaciones serán del tipo:

$$E_y = E_0 \sin(-\omega t + kx)\hat{x}$$

$$B_z = B_0 \sin(-\omega t + kx + \varphi)\hat{x}$$

$$\varphi = 0;\ E_0 = \frac{\omega}{k} B_0 = vB_0$$

EXISTENCIA DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS



Aspecto de la propagación de una onda electromagnética plana propagándose.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

