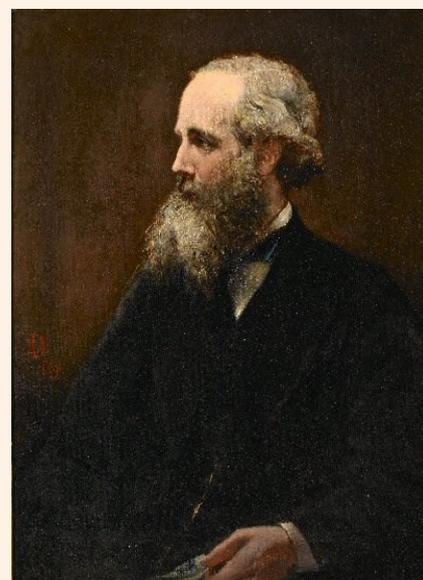
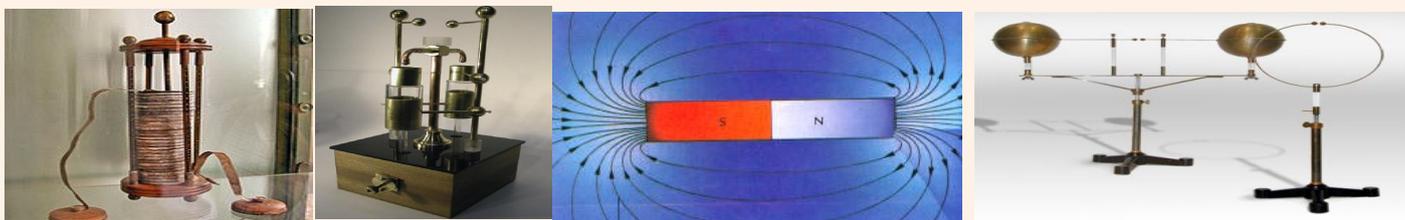


## **El siglo XIX en la Física**



**MATERIAL DIDÁCTICO RECOPIADO Y  
ELABORADO POR:  
DULCE MARÍA DE ANDRÉS CABRERIZO**



## ÍNDICE

Numeración	Epígrafe	Página
1	El desarrollo de la Física en el siglo XIX.	3
2	La aparición de la Electrodinámica.	4
3	Las ondas luminosas.	8
4	La edad heroica de la Espectroscopia.	11
5	La Termodinámica.	13
6	Los grandes hombre de la Electricidad.	19
7	La Astronomía en el siglo XIX.	25
8	Actividades.	28





## 1. El desarrollo de la Física en el siglo XIX.

La riqueza de ideas y descubrimientos que el siglo XIX aporta a todas las ramas de la investigación científica es tanta, que hasta oscurece el resplandor de las centurias de los dos siglos anteriores. En la Física, las primeras décadas del siglo XIX crean las ciencias de la Electrodinámica y del Electromagnetismo, se desarrolla en la Óptica la teoría ondulatoria y se abre el fuego en el terreno fronterizo con la Química la teoría atómica de la materia.

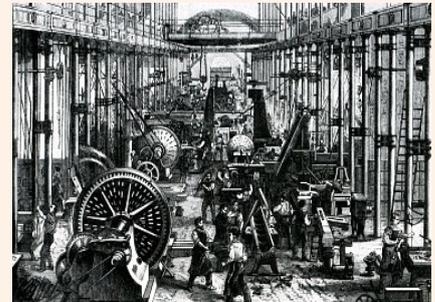
Como en muchas clasificaciones históricas, los comienzos de una época no son más que el continuo fluir de ideas y acontecimientos sin una clara separación con la época anterior; no obstante en el inicio del siglo XIX ocurre un hecho importante en el desarrollo de las ciencias físico-químicas: la invención de la pila voltaica, descrita por primera vez en una famosa carta de Volta, fechada el 20 de marzo de 1800, cuya invención anuncia los tiempos nuevos.

Hacia mitad del siglo nace la Termodinámica, al extender el principio de conservación de la energía a todos los fenómenos de la naturaleza, cuya fundamental unidad se concibe cada vez más claramente. El descubrimiento de la teoría electromagnética de la luz funde en uno los dominios de la Óptica y de la Electricidad.

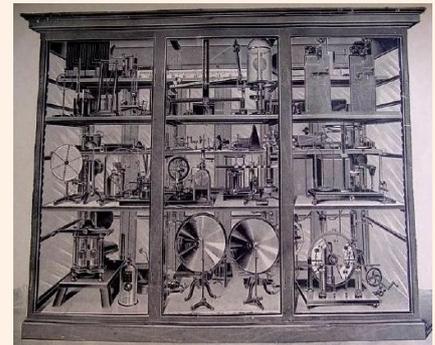
Hacia finales del siglo XIX, los fenómenos de descarga en el vacío abren el insospechado campo de las radiaciones. Por último, la estructura granular de la electricidad se afirma y el electrón, partícula de electricidad negativa, es puesto en evidencia.

El siglo XIX está lleno de eminentes físicos y de considerables descubrimientos. Las grandes figuras que llenan el siglo van desde Volta y Fresnel hasta Hertz y algunos como el experimentador Faraday o el teórico Maxwell soportan la comparación, por la originalidad y el peso de sus contribuciones con los sobresalientes genios del siglo XVII como Galileo o Newton.

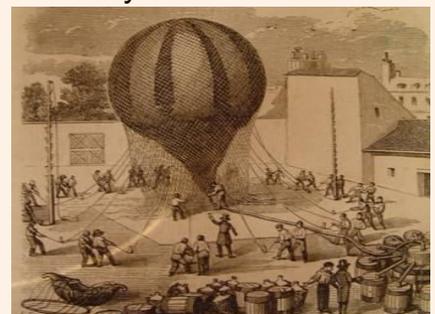
La belleza y armonía del edificio que se levantó a lo largo del todo el siglo XIX produce sobre los pensadores de la época, hacia el 1900, la impresión de que en sus rasgos fundamentales el armazón es definitivo y que podrá resistir indefinidamente los embates de los siglos venideros, por lo que se puede afirmar que en el siglo XIX concluye la magna obra de la Física Clásica, empezada en el siglo XVII.



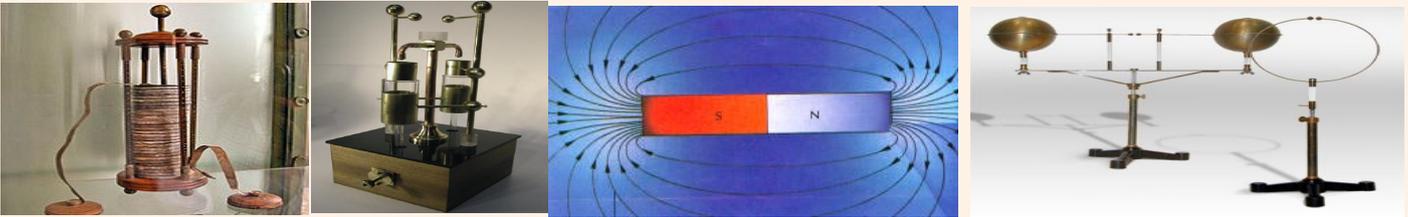
El siglo XIX está marcado por un gran desarrollo de la actividad industrial en base a los nuevos conocimientos científicos realizados en esa época.



Material de laboratorio de Física de un gabinete de un Instituto de Enseñanza Media a finales del siglo XIX.

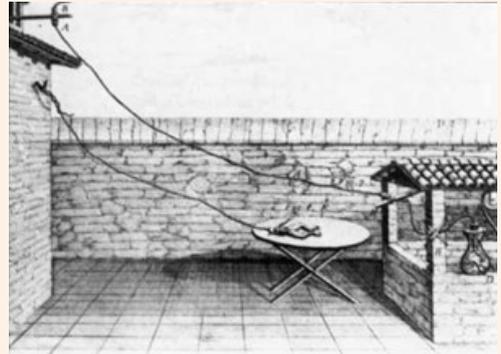


Demostración de una ascensión en globo en el siglo XIX.



## 2. La aparición de la Electrodinámica.

Hacia la última parte del siglo XVIII existe interés por estudiar las descargas eléctricas en animales. Así, el profesor de anatomía de la Universidad de Bolonia, el italiano Luigi Galvani (1737-1798) sabía que cuando se sacaban chispas de un generador, como una botella de Leyden, y se tocaban simultáneamente las patas de una rana con un bisturí, éstas se contraían. La contracción ocurría sólo cuando una carga eléctrica pasaba por la pata y llegó a la conclusión de que si se formaba un circuito cerrado entre dos metales que pasara por la pata, se generaba una corriente eléctrica que circulaba por el circuito. Sin embargo, Galvani creyó que la fuente de la electricidad estaba en lo que llamó "electricidad animal". Galvani realizó diversos experimentos con diferentes animales y creyó que había descubierto la veracidad de la electricidad animal, pero con el tiempo se comprobó que su hipótesis no era correcta.



Experiencia de Galvani con ranas, tomando como fuente de electricidad las descargas eléctricas en un pararrayos.

Alessandro Volta (1745-1827), profesor de la Universidad de Pavía, repitió las experiencias de Galvani y no aceptó su explicación. Volta se dio cuenta de que para lograr el efecto descubierto por Galvani se necesitaba los metales y el líquido del tejido muscular. Hizo una serie de experimentos muy cuidadosos, utilizando alambres de diferentes materiales y descubrió que si usaba cinc y cobre en un ácido líquido el efecto era mucha mayor.



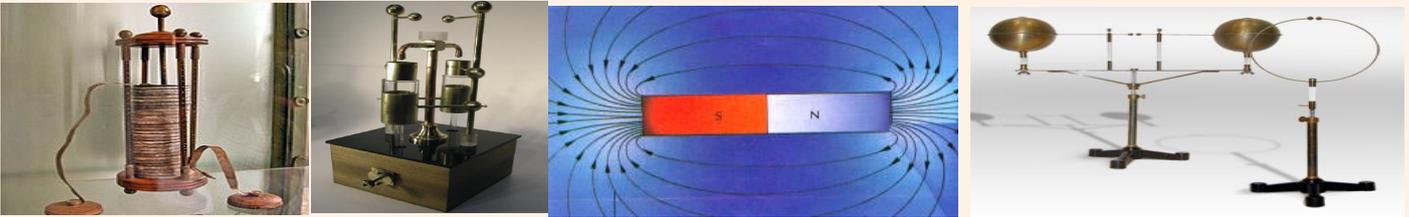
Pila de Volta.



Demostración de Volta a Napoleón en 1801 de su pila en presencia de miembros de la Academia francesa de las Ciencias.

De esta manera llegó a la conclusión de que el efecto descubierto por Galvani no tenía nada que ver con la "electricidad animal" sino que se debía a una acción química entre el líquido, llamado electrolito, y los dos metales.

Es así como Volta construyó lo que posteriormente se llamó pila voltaica, que fue el primer dispositivo electroquímico que sirvió como fuente de electricidad. Para Volta la naturaleza de la corriente producida por la pila era idéntica a la de la electricidad estática, al lograr cargar un electroscopio por medio de una pila.



La explicación de las reacciones químicas que ocurren en la pila voltaica se dio muchos años después, ya que en la época de Volta la Química apenas empezaba a desarrollarse como ciencia moderna. Volta recibió en vida muchos premios y agasajos. En 1881 el Congreso Internacional de Electricistas decidió honrarlo dando su nombre a la unidad de diferencia de potencial: el voltio, a la que se suele también llamar de manera más familiar, voltaje.

La posibilidad práctica de construir pilas voltaicas produjo una revolución en el estudio de la electricidad. Hay que mencionar que en muchos laboratorios era muy poco factible construir las máquinas de electricidad por fricción, por ser bastante caras; sin embargo, las pilas eran relativamente baratas. Es por ello que el descubrimiento de Volta suscitó un interés muy grande y en Inglaterra, el joven Humphry Davy (1778-1829) dirigió su atención a los procesos químicos de la pila, comenzando una serie de experimentos en el campo de la electrólisis, con la obtención de diversos elementos químicos (el sodio, el potasio o el bario) y bosquejando una teoría de la electrólisis que posteriormente Faraday la completó.

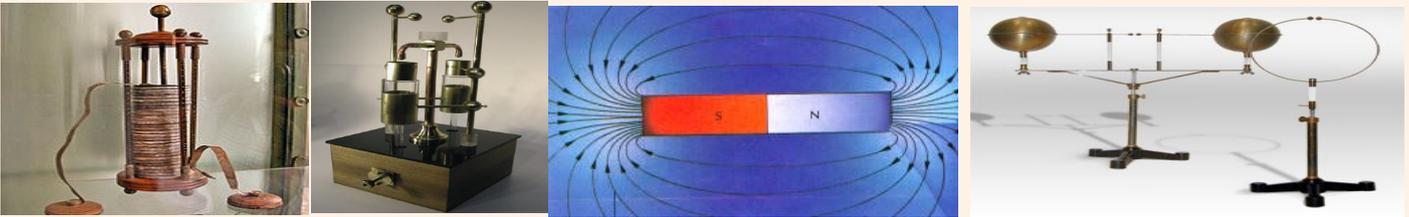
No obstante, mucho antes del descubrimiento de la corriente eléctrica, los físicos se preguntaron si los fenómenos eléctricos y magnéticos eran esencialmente distintos. El danés Hans Christian Oersted (1777-1851), profesor de la Universidad de Copenhague, inició en 1807 sus investigaciones sobre los efectos de la electricidad en la aguja magnética de una brújula. Entre ese año y 1812 publicó varios ensayos en los que argüía que la electricidad y el magnetismo debían estar relacionados. Sus argumentos se basaban en la creencia de la unidad de todas las fuerzas de la naturaleza, pero no presentó un resultado experimental que verificara su conclusión.



Hans Christian Oersted.

Oersted era consciente de esta falla en su argumentación y durante muchos años no obtuvo ningún resultado positivo, en gran parte debido a que las fuentes de corriente de que disponía eran pilas voltaicas de muy baja intensidad. Después de muchos años, en 1820, durante una clase en la que estaba presentando a sus alumnos ciertos experimentos eléctricos, produjo el efecto de la desviación en la brújula bajo la influencia de una corriente producida por una pila.

Los experimentos de Oersted se repitieron en el Congreso de Investigadores Suizos que se llevó a cabo en Ginebra en el verano de 1820, al que asistió el científico francés François Arago (1786-1853). A su regreso a París, Arago comunicó a la Academia de Ciencias lo que presenció en Ginebra. Sus miembros oyeron estos resultados pero se mostraron muy escépticos, y sólo se convencieron hasta que presenciaron una demostración el 11 de septiembre. Una persona que estuvo presente en esa sesión fue André-Marie Ampère (1775-1836), amigo de Arago, profesor suplente en la Sorbona y gran matemático, que comprende inmediatamente el sentido de las experiencias de Oersted y establece los principios de la corriente eléctrica con su conocida regla del generador.



En 1826 publica Ampère su magistral tratado "Teoría matemática de los fenómenos electrodinámicos", gracias al cual los fenómenos electrodinámicos se pueden deducir de una única fórmula.

En el pensamiento de Ampère, la corriente es asimilable a un imán y demuestra la certeza de su idea mediante un solenoide, su éxito le conduce a la hipótesis de que el magnetismo es el resultado de minúsculas corrientes que circulan en torno a las moléculas, explicando el proceso de la imanación, el ferromagnetismo y el magnetismo del globo terrestre, comparando a la Tierra con un inmenso solenoide.

De la misma época es la formulación matemática de Jean Baptiste Biot (1779-1862) y Félix Savart (1719-1841) de tipo newtoniana de los fenómenos electromagnéticos, que afirma que la intensidad del campo magnético generado por una corriente eléctrica rectilínea en un punto situado fuera de ella es directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente proporcional a la distancia desde el punto hasta el conductor.



André-Marie Ampère.

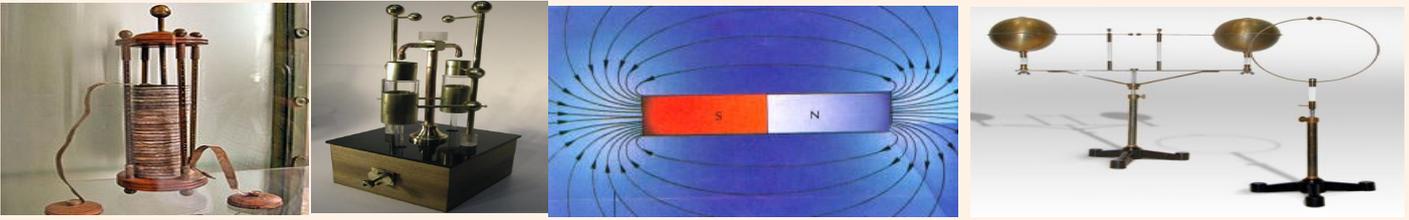
Por otro lado, en 1825, el alemán Georg Simon Ohm (1787-1854) empieza a publicar los resultados de sus experimentos sobre mediciones de corriente eléctrica, donde observa la disminución de la fuerza electromagnética que pasa por un cable a medida que éste es más largo.

En 1827, Ohm publica el libro "Die galvanische Kette, mathematisch bearbeitet", donde introduce la noción de caída de tensión o potencial y enuncia su ley, sensiblemente idéntica a la actual: caída de potencial directamente proporcional a la intensidad de la corriente, aunque ello ya fue observado 46 años antes en Inglaterra por el brillante Henry Cavendish.



Georg Simon Ohm.

En dicho libro, Ohm expone toda su teoría sobre la electricidad, donde cabe destacar que comienza enseñando una base matemática con el propósito de que el lector entienda el resto del libro, y es que para la época incluso los mejores físicos alemanes carecían de una base matemática apropiada para la comprensión del trabajo y, por ello, no llegó a convencer totalmente a los más veteranos físicos alemanes, quienes no creían que el acercamiento matemático a la Física fuese el más adecuado, por lo que criticaron y ridiculizaron su trabajo.



El también físico alemán Rudolf Hermann Arndt Kohlrausch (1809-1858) comprobó la veracidad experimental de la ley de Ohm y de las observaciones de los fenómenos galvánicos, estableció el sistema de unidades eléctricas absoluto y en 1848 introdujo el concepto de resistividad.

Su trabajo fue continuado por su hijo Friedrich Wilhelm Georg Kohlrausch (1840- 1910), que realizó el desarrollo matemático de las leyes de las corrientes eléctricas. Otros de sus trabajos de investigación versaron sobre la ionización en disoluciones electrolíticas.

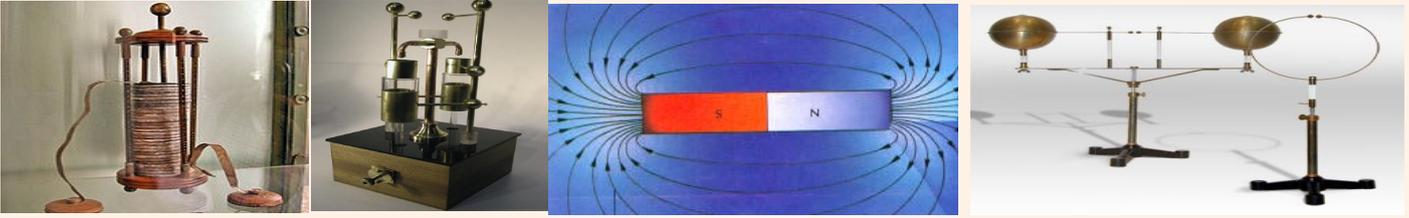
En 1840, el inglés Charles Wheatstone (1802-1875) mide la velocidad de propagación de la corriente eléctrica en los conductores metálicos. Inventa los reóstatos, resistencias variables, que utiliza en 1843, en un instrumento, consistente en un circuito eléctrico mediante el cual se puede comparar las resistencias empleando la ley de Ohm, que recibe el nombre de puente de Wheatstone.

La ley de Ohm es fundamental en los circuitos eléctricos, pero para analizar el más simple circuito se requieren dos leyes adicionales formuladas en 1847 por el físico alemán Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), que fijó la repartición de la corriente distribuida sobre una red de varios conductores y estableció la ley de los nudos y la ley de las mallas de la teoría clásica de circuitos eléctricos, que se denominan leyes de Kirchhoff.



Charles Wheatstone.

La importancia del circuito del puente de Wheatstone se debe a que hasta entonces las medidas de las tensiones y de las resistencias se llevaban a cabo de forma indirecta, por lo que los resultados obtenidos tenían un error importante debido a que la intensidad también fluía por el instrumento de medida. Ello quedaba resuelto con el puente pues permitía la determinar la magnitud a medir en el momento en el que no pasa corriente mediante la acción de un reóstato en una rama paralela respecto a la que se efectúa la medición.



### 3. Las ondas luminosas.

En el siglo XVII ya el físico holandés Christian Huygens explicó las leyes de la reflexión y la refracción en base a la consideración de la luz como un movimiento ondulatorio semejante al del sonido.

Ahora bien, como los físicos de la época consideraban que todas las ondas requerían de algún medio que las transportaran en el vacío, para las ondas lumínicas se postuló como medio a una materia insustancial e invisible llamada éter, pero la presencia de este éter elástico como medio de transporte de ondas requeriría que éste reuniera alguna característica sólida, pero que a su vez no opusiera resistencia al libre tránsito de los cuerpos sólidos, pues las ondas transversales sólo se propagan a través de medios sólidos.

En 1803 el inglés Thomas Young (1773-1829) inicia sus experimentos de interferencias luminosas y en su explicación resucita la fecunda idea de Huygens de la luz como oscilación. Young explica el hecho de que la suma de dos fuentes luminosas puede producir menos luminosidad que por separado, lo cual era algo paradójico para la teoría corpuscular. Young imputa dicho hecho a una interferencia en base a la idea de la luz como un estado vibratorio de una materia insustancial e invisible, el éter.

Young compara la propagación de la luz con la del sonido y concibe las ondas luminosas como longitudinales, aunque no logra dar a su teoría una forma matemática y no puede explicar el fenómeno de la difracción, que era el problema estelar de la época, por el contrario el francés Etienne Louis Malus (1775-1812) en 1808 descubre la polarización y la explica de forma satisfactoria en base a la teoría corpuscular de Newton, con lo que la tesis ondulatoria de Young sufre un duro golpe.

En 1815, el francés Agustin Jean Fresnel (1788-1827) estudia la difracción y en sus conclusiones da respuestas en base a la teoría ondulatoria de la luz y así explica los fenómenos de la difracción y la reflexión y aplicando su teoría a la refracción llega a la conclusión de que la velocidad de la luz es inferior en el agua y en el vidrio que en el aire, contrariamente a la opinión que mantuvo Newton y conforme a la tesis de Fermat.

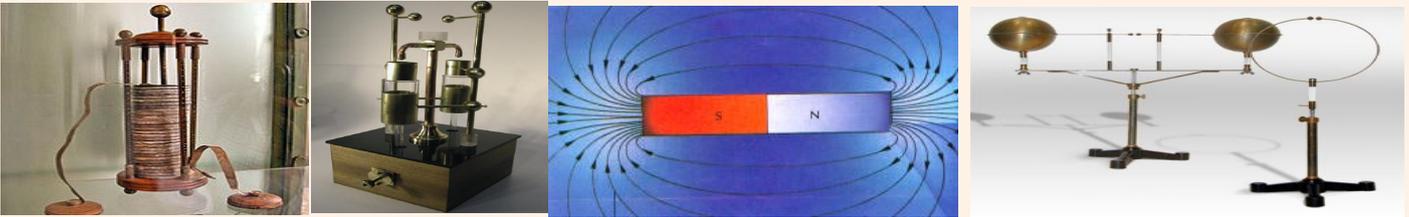


Thomas Young

Debido al prestigio de Newton, su teoría corpuscular de la luz fue aceptada por el mundo científico. En el siglo XIX, los experimentos de Thomas Young sobre los fenómenos de interferencias luminosas y los del Fresnel sobre la difracción son decisivos para que se retome la propuesta sobre la teoría ondulatoria de la luz de Huygens.

#### El éter

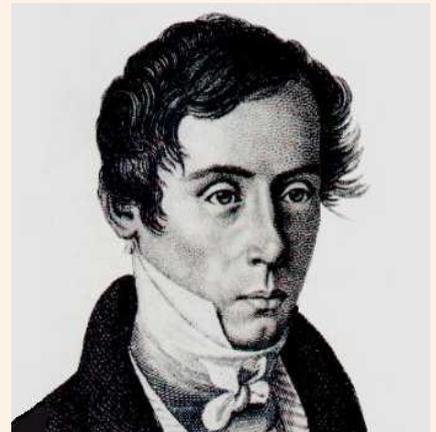
La presencia del éter fue el principal medio cuestionador de la teoría ondulatoria de la luz, pues era necesario equiparar las vibraciones luminosas con las elásticas transversales y no con las vibraciones longitudinales, como las del sonido. Es aquí donde se presenta la mayor contradicción en cuanto a la presencia del éter como medio de transporte de ondas.



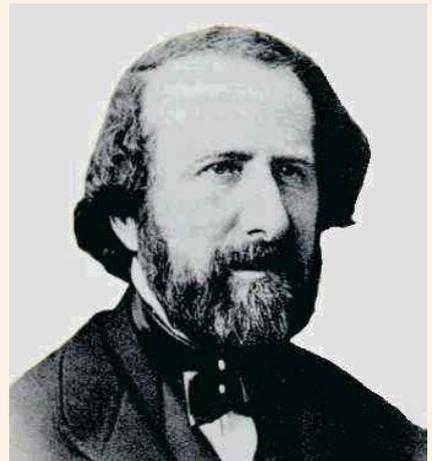
Sus estudios sobre la polarización le llevan a concluir que las vibraciones de la luz deben ser transversales (perpendiculares a la dirección de propagación) y no longitudinales (en dirección paralela a la propagación de la onda luminosa). Descubre la polarización circular, describe la polarización elíptica e interpreta la doble refracción. Pese a sus sagaces explicaciones, inmediatamente queda presentada una gran contradicción, ya que no es posible que se pueda propagar la luz en el éter por medio de ondas transversales, debido a que éstas sólo se propagan en medios sólidos.

Fresnel no vivió para ver triunfar sus ideas. La negativa de Laplace y Biot a adoptar la imagen fresneliana de las vibraciones transversales estaba motivada por las propiedades contradictorias que era menester atribuir al supuesto éter elástico portador de las ondas luminosas, pues las vibraciones transversales sólo se transmitían en cuerpos sólidos y no en líquidos y gases. Una larga discusión surgió en torno a las propiedades del éter y es el mismísimo Maxwell quien resuelve más tarde la cuestión al sustituir el definido éter elástico por su éter electromagnético.

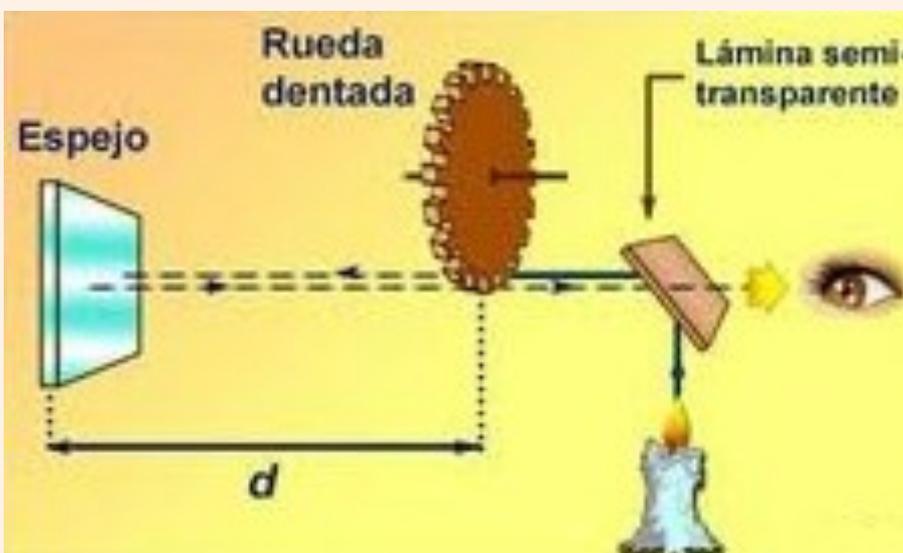
A mitad del siglo XIX la óptica fresneliana está universalmente aceptada y existe una carrera por lograr medir la velocidad de la luz con mayor exactitud que la permitida por las observaciones astronómicas. En 1849, el francés Hippolyte Fizeau (1819-1896) realiza su clásico experimento, al hacer pasar la luz reflejada por dos espejos entre los intersticios de una rueda girando rápidamente y determinó que la velocidad que tenía en su trayectoria era aproximadamente 300.000 km/s.



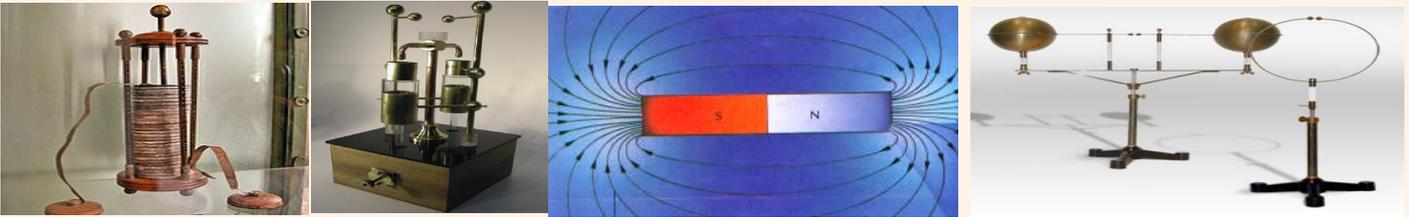
Fresnel murió con 39 años de tuberculosis.



Retrato de Fizeau.



Experimento de Fizeau.



En 1851, el también francés León Foucault (1819-1868) mide la velocidad de propagación de la luz a través del agua. Ello fue de gran interés, ya que sirve de criterio entre la teoría corpuscular y la ondulatoria. La primera requería que la velocidad fuese mayor en el agua que en el aire y lo contrario exige la segunda. En sus experimentos, Foucault logró comprobar que la velocidad de la luz cuando transcurre por el agua es inferior a la que desarrolla cuando transita por el aire. Con ello, la teoría ondulatoria adquiere preeminencia sobre la corpuscular y pavimenta el camino hacia la gran síntesis realizada más tarde por Maxwell.



William Herschel.

La siguiente cuestión suscitada tiene que ver con la relación entre la luz y el calor. En 1800 el astrónomo británico de origen alemán Frederick William Herschel (1738-1822) coloca un termómetro de mercurio en el espectro obtenido por un prisma de cristal con el fin de medir el calor emitido por cada color y descubre que el calor es más fuerte al lado del rojo del espectro y observa que allí no hay luz.

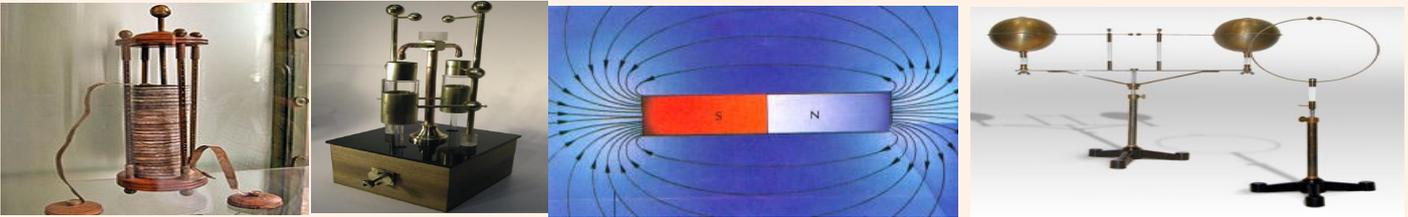
Esta es la primera experiencia que muestra que el calor puede transmitirse por una forma invisible de luz.

Herschel denomina a esta radiación "rayos calóricos", que dio paso al final al de radiación infrarroja y entrevé que los rayos calóricos obedecen las mismas leyes de la refracción de la luz, pero son Ampère y Biot los primeros en decir que los rayos luminosos y los calóricos son ondas del mismo éter y que las radiaciones del espectro son todas de la misma especie. En 1847 Fizeau y Foucault interfieren los rayos calóricos y despejan todas las dudas sobre su carácter ondulatorio.

Finalmente, la relación entre la luz y el sonido quedó resuelta por el austriaco Christian Doppler (1803-1853), al descubrir el efecto que hoy en día lleva su nombre. Su descubrimiento aseguró que es tanto válido para las vibraciones sonoras como para las luminosas y se ha convertido en uno de los instrumentos más valiosos de la investigación astrofísica.



Christian Doppler.



## 4. La edad heroica de la Espectroscopia.

En 1814 el alemán Joseph von Fraunhofer (1787-1826) tropezó con el descubrimiento de rayas verticales oscuras en el espectro de la luz solar obtenido mediante un prisma. Fraunhofer no se limitó a observar las fuentes luminosas celestes y estudió el espectro de rayas obtenido al interferir diversas sales en las llamas de bujías y lámparas de aceite, buscando analogías con el espectro solar. Fraunhofer no logró interpretar los resultados. Pasan tres decenios para que los alemanes Bunsen y Kirchhoff descifren el enigma y crean el análisis espectral. Tanto Robert Wilhelm von Bunsen (1811-1899) como Gustav Robert Kirchhoff eran profesores de la Universidad de Heidelberg, y trabajando en colaboración establecen los fundamentos del análisis espectral por emisión y en 1859 resuelven el enigma de la coincidencia de las líneas de Fraunhofer del espectro solar con la del espectro de una solución de una sal metálica y abren la posibilidad del análisis químico del sol.



Joseph von Fraunhofer.

También en 1859, Kirchhoff introduce la noción de cuerpo negro y enuncia su famosa ley, no obstante hasta 1895 el concepto de cuerpo negro no fue hecho técnicamente realidad por los también alemanes Wilhelm Wien (1864-1928) y Otto Lummer (1860-1925). Los avances tecnológicos se incorporan al primitivo espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen, destacando en ello la utilización de la red de difracción, y, de esta forma, Kirchhoff puede trazar un mapa del espectro solar, asignando a un gran número de líneas los elementos químicos que las engendran. De esta forma, el análisis espectral reveló la analogía química que existe entre los distintos astros, llegando, por tanto, a la demostración de la unidad material del cosmos. Una vez medidas un gran número de rayas espectrales y asignadas a cada elemento químico las suyas, surgió la cuestión de si la distribución de las líneas características de un elemento químico dado, dispersadas en toda la longitud del espectro, están o no sometidas a un orden rítmico.

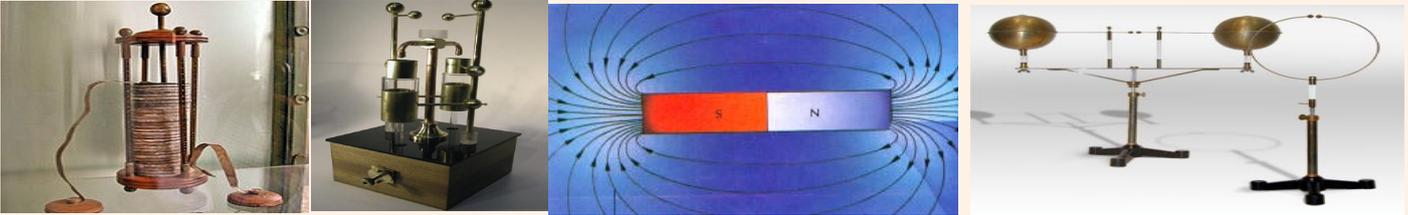
### Cuerpo negro

Cuerpo negro es aquel que tiene la propiedad de absorber íntegramente todas las radiaciones calóricas o térmicas que inciden sobre él, cualquiera que sea su longitud de onda.

### Espectroscopio

Es un aparato capaz de descomponer una radiación luminosa en las distintas radiaciones elementales que la componen en función de sus diferentes longitudes de onda.

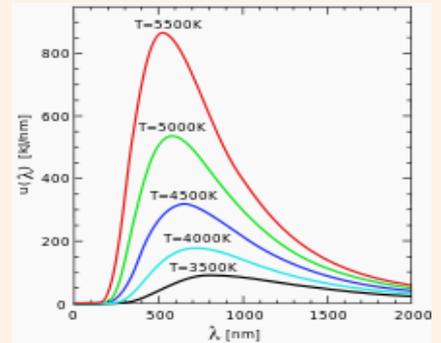
En 1885 el suizo Johann Jakob Balmer (1825-1898) tropezó con la relación numérica que rige las rayas del hidrógeno en la parte visible del espectro y en 1908 el también suizo Walter Ritz (1878-1909) adoptó la fórmula generalizada de la ley que permitía prever no sólo una, sino un conjunto de series de rayas del elemento químico hidrógeno en el ultravioleta y en el infrarrojo, y además reveló que las líneas de otros elementos químicos obedecen a fórmulas semejantes, aunque más complejas.



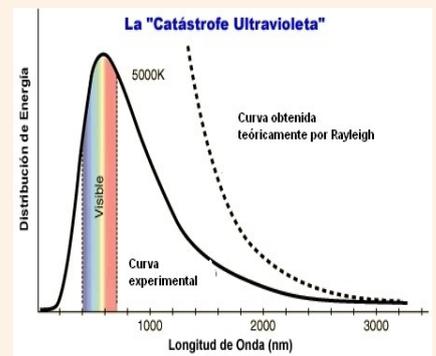
El austriaco Josef Stefan (1835-1893) establece en 1879 su ley empírica de que la radiación calórica total del cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. El también austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) dio el apoyo teórico a dicha ley conforme a la nueva teoría electromagnética de la luz de Maxwell, y establece en 1884 que la ley de Stefan sólo es válida para el cuerpo negro y la deduce teóricamente utilizando un modelo para la radiación del cuerpo negro semejante al modelo cinético de los gases.

El cómo se distribuye la radiación del cuerpo negro sobre las diferentes longitudes de onda del espectro lo estudia Wilhelm Wien, que en 1893 descompone con un espectroscopio y a una temperatura determinada la energía emitida por un cuerpo negro y halla que el espectro de la densidad de energía radiante frente a la longitud de onda tiene una distribución continua en forma acampanada. Por tanto, no hay saltos ni separaciones como en el caso de los espectros de líneas (discontinuos) de los átomos de los elementos químicos y encuentra la ley que especifica que hay una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro y su temperatura.

Para explicar este mecanismo de emisión de energía del cuerpo negro se partió del modelo ondulatorio de la luz. Se admitió que en la interacción luz-materia hay que aceptar la idea de que la materia está formada por partículas cargadas con las que pueden interaccionar las ondas luminosas, produciendo oscilaciones en dichas partículas. En junio de 1900, el inglés John William Strutt (1842-1919), conocido como Lord Rayleigh, aplica la idea de que la distribución de energía obtenida respecto a la longitud de onda, para una temperatura dada, es consecuencia de los distintos estados de vibración de las partículas microscópicas (osciladores) del objeto radiante y piensa que la energía de cada uno de esos osciladores puede tomar cualquier valor (continuidad de la energía), deduce una ecuación teórica de la distribución de energía. Al representar los valores obtiene una gráfica que no coincide con la curva experimental para valores pequeños de longitud de onda. El problema lo resuelve Max Planck (1858-1947) en diciembre de 1900 al considerar la emisión radiante como un proceso discontinuo, aclarando el enigma de la radiación del cuerpo negro y explica la ley de Wien. Finalmente, cuando Niels Bohr en 1913 introduce el cuanto de Planck en su modelo atómico da una explicación satisfactoria de la ley de Balmer-Ritz, y termina la edad heroica de la Espectroscopia.

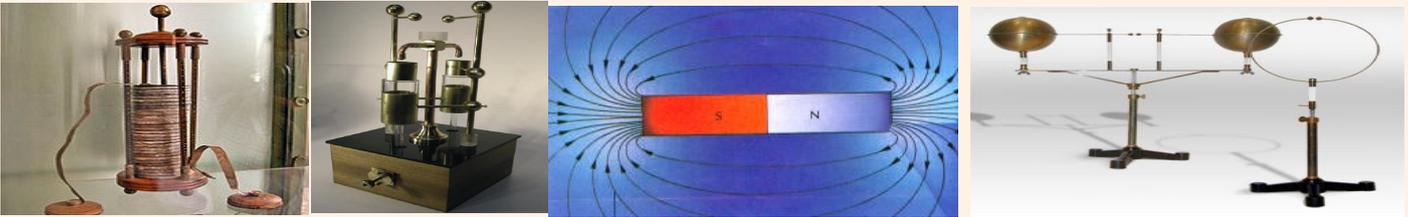


Ley del corrimiento de Wien.



Catástrofe del ultravioleta: Mientras que la curva en campana obtenida experimentalmente presenta un máximo, cuya posición está bien determinada por la ley de Wien, la teoría exigía una curva cuyas ordenadas debían crecer hasta el infinito cuando la longitud de onda disminuye.

Se puede observar que hay buena coincidencia entre los valores experimentales y los teóricos obtenidos por Lord Rayleigh para longitudes de onda grandes, pero no en la zona de las pequeñas longitudes de onda, lo cual fue llamado "catástrofe del ultravioleta" y es una consecuencia directa del fracaso de la aplicación de la Física Clásica al estudio microscópico de la materia.



## 5. La Termodinámica.

A comienzos del siglo XIX es reconocido el valor de la obra de James Watt y despierta el deseo de profundizar en el conocimiento de las leyes que ligan la expansión del vapor y de los gases con la temperatura. Así surge la labor del inglés John Dalton (1766-1844), que en 1801 da una serie de conferencias sobre la constitución de las mezclas gases, sobre la presión de vapor del agua y otros vapores a diferentes temperaturas, y sobre la expansión térmica de los gases, que fueron publicadas en 1802.

Dalton comprobó que los vapores no saturados de distintos gases obedecen la ley de Boyle-Mariotte, y midiendo las dilataciones de los gases observó que la intensidad de la dilatación es igual para todos los gases. Sin conocer las investigaciones de Dalton, el francés Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850) llegó a la conclusión de que el coeficiente de dilatación es independiente de la temperatura, presión y naturaleza química del gas. Posteriormente en 1840, el alemán Heinrich Gustav Magnus (1802-1870) determinó el valor de dicho coeficiente igual a  $1/273$ . En realidad, las conclusiones de Dalton, Gay-Lussac, Boyle y Mariotte, sólo se verifican de una primera aproximación y definen un estado gaseoso ideal. Posteriormente, el francés Henri Victor Regnault (1810-1878) determinó la dilatación y compresión particular de cada gas y sus diferencias con las leyes teóricas establecidas por sus predecesores.



Henri Victor Regnault.

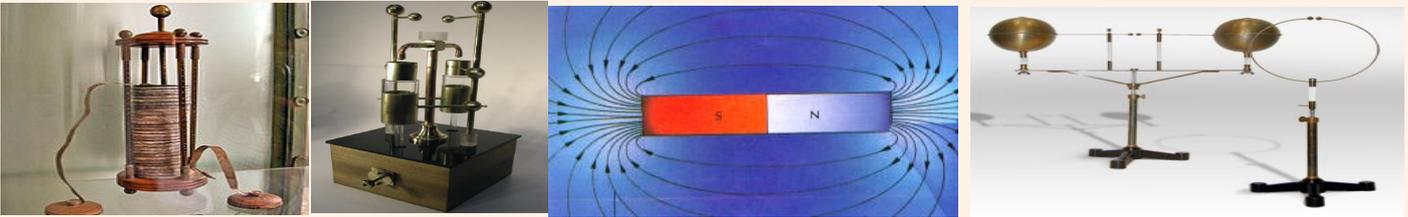
El coeficiente de dilatación de los gases permitió establecer la temperatura absoluta, sin punto de partida artificial y llamado por Dalton el cero absoluto, en el que los gases no ejercen ninguna presión sobre las paredes de sus recipientes. Como su idea del cero absoluto, muchas otras proezas de Dalton no revelaron su gran valor hasta un tiempo más tarde. Finalmente, Dalton reconoció con más claridad que sus predecesores el carácter accidental de los tres estados de agregación de la materia y su dependencia general de la temperatura.

Problema más difícil es la conducción del calor en sólidos,. El matemático francés Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) describió este fenómeno sin recurrir a ninguna hipótesis sobre el proceder íntimo de la transmisión térmica y sin la necesidad de realizar una suposición sobre la naturaleza del calor, llegando en 1822 a obtener su ley de conducción de Fourier, que lejos de limitarse a los fenómenos calóricos sirve también para describir la difusión entre líquidos y se puede aplicar asimismo a la conducción eléctrica, que es lo que hizo Ohm al establecer su ley, al adaptar la ley de Fourier.



Jean Baptiste Joseph Fourier.

En los razonamientos de Fourier, el calor posee la propiedad de fluir, y es comparable a la caída de agua, imagen que recogió más tarde Carnot en sus estudios sobre el transporte de la energía calorífica.



La ley de la conducción del calor de Fourier se publicó en un libro llamado "Teoría analítica del calor", y es la aplicación de su famoso teorema matemático al estudio del flujo del calor. También hay que recordar que Fourier en su Teoría analítica del calor sienta su análisis de dimensiones para el uso de ecuaciones científicas.

El valor del teorema de Fourier es que introduce en la ciencia la figura de "modelo" y se pasa de la concepción newtoniana donde la naturaleza se expresa a través de unas leyes a una figura en la que es la capacidad de creación y abstracción de una mente humana la que concibe unos conceptos y un marco de leyes, que pueden ser conscientemente no reales pero que sirven para interpretar la naturaleza y que se comporten como si fueran ciertas en lo fundamental. Desde esta perspectiva la teoría física no es ya un descubrimiento de la naturaleza sino una creación humana que se convierte en instrumento útil para el estudio de aquella.

Aunque la historia no lo recoja así, desde la perspectiva del siglo XX y del XXI la noción de modelo de Fourier ha tenido un éxito claro, y se puede afirmar que las tres principales teorías de la Física Moderna son las de Newton, Fourier y la teoría electromagnética de Maxwell.

Siguiendo avanzando en la historia de la Termodinámica hay que referirse al también francés Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832), el cual buscando las condiciones de rendimiento máximo de la máquina de Watt llega en 1824 a su famosa conclusión, relacionando el rendimiento de la máquina térmica con la diferencia de temperatura entre las dos fuentes, caliente y fría entre las que se verifica el intercambio de energía, pero aunque realiza un atractivo análisis, emplea la engorrosa teoría calórica. Carnot niega la existencia del móvil perpetuo o "perpetuum mobile", pero no queda claro si se trata de un principio axiomático o de un hecho empírico deducido de las numerosas tentativas infructuosas realizadas para producir el movimiento eterno. Carnot no logra alcanzar el principio de conservación de la energía, el obstáculo que le separa es su adhesión a la hipótesis de que el calor es un fluido indestructible, hipótesis compartida entonces por muchos físicos de la época. ¿Cómo fue posible que Carnot, desconociendo la metamorfosis del calor en trabajo, llegase a conclusiones exactas? La respuesta es fácil. Carnot sólo considera las cantidades de calor que entran y salen a la temperatura del foco superior, sin decir nada de lo que ocurre en el foco inferior de temperatura; así se produce el milagro de que Carnot llegue a un resultado cierto aunque su punto de partida no es válido.

### Análisis de Fourier

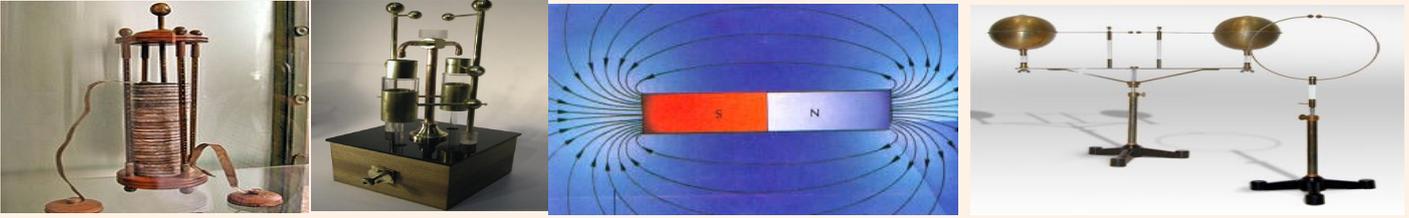
El teorema de Fourier fue enunciado y publicado en 1807. Es la base del análisis armónico y sirve para expresar en forma de serie matemática cualquier oscilación periódica por complicada que sea. El teorema de Fourier tiene muchas aplicaciones, puede ser utilizado en el estudio de la luz y del sonido y desde luego en cualquier fenómeno ondulatorio.

El teorema de Fourier afirma que toda función de una variable  $x$  definida entre los límites  $-\pi \leq x \leq \pi$  que se repita periódicamente y que tenga un número finito de discontinuidades puede ser representada mediante una serie de Fourier:

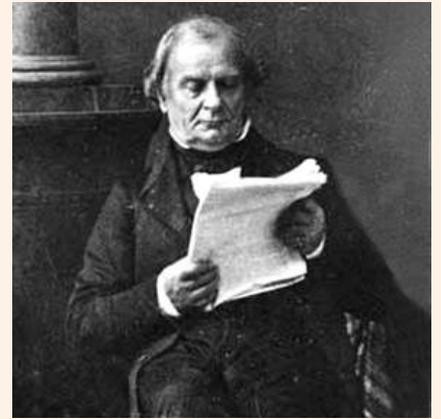
$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(nx) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin(nx)$$



Sadi Carnot.



La precoz y repentina muerte de Carnot le impidió completar su labor y es el también francés Benoit Clapeyron (1799-1864), quien en 1834 contribuye a la creación de la Termodinámica moderna, al publicar un documento titulado: "Puissance motrice de la chaleur", en el que desarrolla el trabajo de Carnot sobre el motor térmico de una forma analítica. En 1843 Clapeyron extendió la idea de proceso reversible, ya sugerida con anterioridad por Carnot, y realizó la enunciado definitivo del principio de Carnot, conocido también como Segunda Ley de la Termodinámica, pero son finalmente Lord Kelvin y el alemán Clausius quienes recogen más tarde el pensamiento inicial de Carnot y coronan su obra.



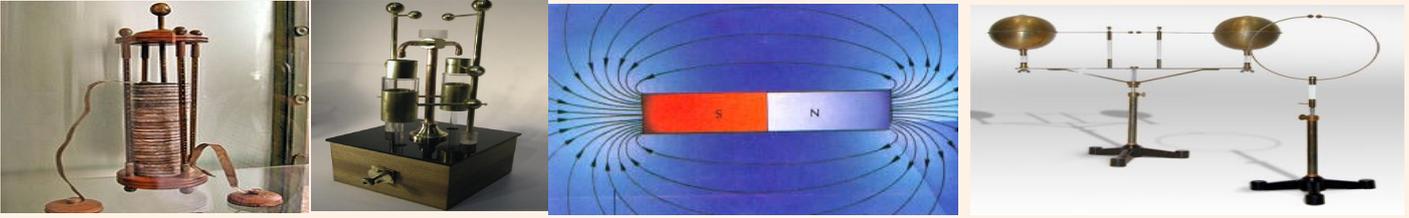
Benoit Paul Emile Clapeyron.  
Clapeyron presentó la obra de Carnot de una forma accesible y gráfica, que mostraba el famoso ciclo de Carnot como una curva cerrada en una gráfica de la presión en función del volumen, que más tarde tomaría el nombre de diagrama de Clapeyron.

Volviendo al principio de conservación de la energía, a menudo la historia prueba que un gran descubrimiento es realizado simultáneamente por varios hombres, y este es el caso. De los tres investigadores, Mayer, Joule y Colding, el primero, el alemán Julius Robert Mayer (1814-1878) se adelanta a sus rivales y tiene la incuestionable prioridad de la idea, expuesta en 1842 en su memoria: "Observaciones acerca de las fuerzas de la naturaleza inanimada", llegando a la conclusión de que calor y trabajo mecánico son dos aspectos de la misma realidad física, transformables el uno en el otro. En oposición a Carnot, Mayer ve que en la máquina de vapor no es la caída del calórico, sino su transformación lo que produce trabajo. En suma, las formas de energía pasan por perpetuas metamorfosis, y sólo su cantidad permanece constante a través de todos los cambios.

Mayer no emplea la palabra energía, la llama fuerza. El inglés John Macquorn Rankine (1820-1872) introduce en la sexta década del siglo la palabra energía y anterior es la expresión "trabajo mecánico", creada por los franceses Gaspard de Coriolis (1792-1843) y Jean Victor Poncelet (1788-1867) en 1825. Además Coriolis es el primero en dar una definición del trabajo como la fuerza que se emplea por la distancia recorrida venciendo la resistencia. Poncelet es quien propuso como unidad de trabajo mecánico el kilográmetro. La obra de Mayer es el fruto de su intuición, sin ayuda experimental comprobatoria. Hay que esperar al inglés James Prescott Joule (1818-1891), para encontrar la confirmación experimental de la ley de Mayer y en 1843 determina el valor numérico del equivalente mecánico del calor y anteriormente, en 1840, estableció su ley de obtención de la cantidad de calor desprendido por un conductor en función de la intensidad de la corriente. El danés Ludwig August Colding (1815-1889) enuncia en 1843 la ley de la conservación de la energía en su generalidad, al afirmar que los fenómenos del mundo físico no son más que metamorfosis de una fuerza única que permanece siempre igual en cantidad.



James Prescott Joule.



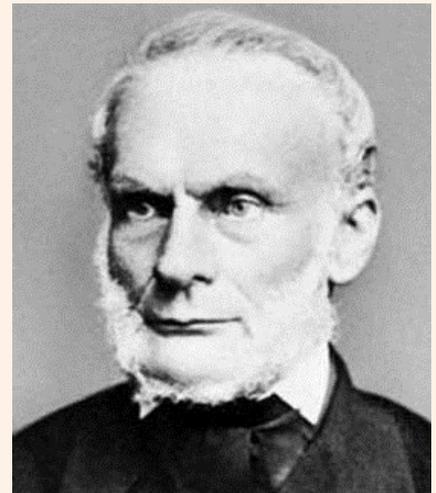
El alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) da la estructura matemática al principio de conservación en su clásica disertación de 1847: "Sobre la conservación de la fuerza" y lo contrasta con numerosas experiencias y lo ve garantizado por un concluyente hecho empírico: la imposibilidad de la existencia de los mecanismos con movimiento perpetuo.



Hermann von Helmholtz.

Helmholtz reconoce también la relación que hay entre la conservación de la energía y el principio de la mínima acción del matemático irlandés William Rowan Hamilton (1805-1865), quien, en 1834 lo había revestido de una sugestiva forma matemática, sin aplicarlo al mundo físico. En realidad este principio completa la ley de constancia energética, pues según afirma Helmholtz en 1886, el principio de la mínima acción prescribe la evolución del sistema: el sistema selecciona entre los procesos posibles que podrían conducirlo de un estado a otro, aquel por el cual la diferencia de energía cinética y potencial tenga, durante el tránsito, el menor valor posible.

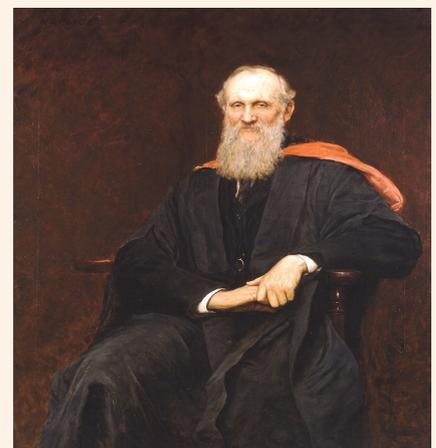
La conservación de la energía es el gran principio que abarca la totalidad de los procesos físicos y químicos, ya sean reversibles o irreversibles. Según Helmholtz, la ley que separa los fenómenos reversibles de los irreversibles es el principio de la mínima acción, que únicamente tiene aplicación en los reversibles. Sin embargo, la ley de conservación de la energía no es suficiente para determinar, sin ambigüedad, los procesos de la naturaleza, se contenta con afirmar la equivalencia cuantitativa de la energía entre dos estados de un sistema cerrado, sin revelar si el paso de uno a otro es igualmente posible en ambos sentidos.



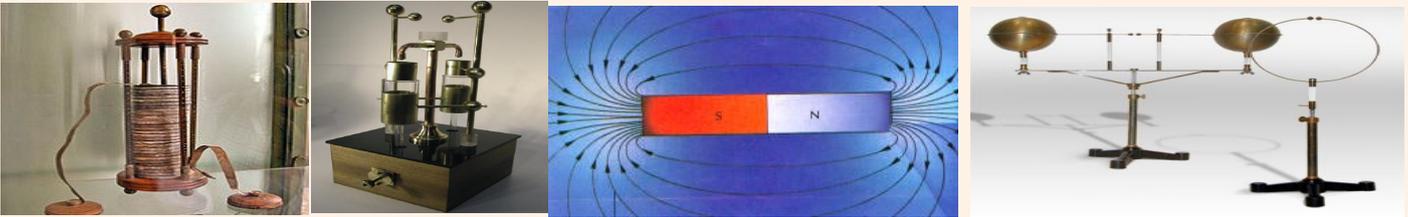
Rudolf Clausius.

El alemán Rudolf Clausius (1822-1888) introduce la noción de entropía al tratar matemáticamente las conclusiones de Carnot como medida del desorden que experimenta un sistema en su evolución natural y en su memoria de 1850 enuncia su ley, considerada hoy en día como el Segundo Principio de la Termodinámica, siendo lógicamente el Primero el de conservación de la energía. Carnot vio el valor de la nueva magnitud, la entropía, y Clausius enunció su ley o segundo principio basado en el ciclo de Carnot en términos de la variación de la entropía.

El escocés William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), extiende las consecuencias del valor asignado a la entropía a los cambios del universo e introduce la noción de muerte térmica del universo, de esta forma las ideas de Kelvin y Clausius coinciden en dos aspectos importantes: 1º: La energía del universo es constante. 2º: La entropía del universo tiende hacia el máximo.



Lord Kelvin.



Desde otro punto de vista, Lord Kelvin, además de eminente teórico, fue un hábil experimentador dando soluciones a numerosos problemas prácticos. Sus instrumentos para mediciones eléctricas contribuyeron poderosamente al desarrollo de la Electrotécnica. Otra de sus felices aportaciones es la escala termodinámica o absoluta de temperaturas, fundada en el Segundo principio de la Termodinámica y en su escala pone el punto cero en el mismo cero absoluto que Dalton y Gay-Lussac, cincuenta años antes, dedujeron del coeficiente de dilatación de los gases. Finalmente, Lord Kelvin es también el promotor del sistema cegesimal de unidades con arreglo a su proposición de 1871.



Réplica de un diseño de 1907 de un generador electrostático de Lord Kelvin.

Hay que resaltar que la naturaleza íntima del calor es desconocida en los dos principios de la Termodinámica, pues sólo se contentan con tratar al calor como una forma de energía, por lo que el estudio de la naturaleza del calor estuvo reservada a la teoría cinética de los gases. El claro reconocimiento de que el calor puede transformarse en trabajo mecánico, o sea en movimiento, debía sugerir la suposición de que el calor mismo no es otra cosa que energía en movimiento, como Daniel Bernoulli lo había vislumbrado más de cien años antes y el conde de Rumford lo había demostrado en el crepúsculo del siglo XVIII.

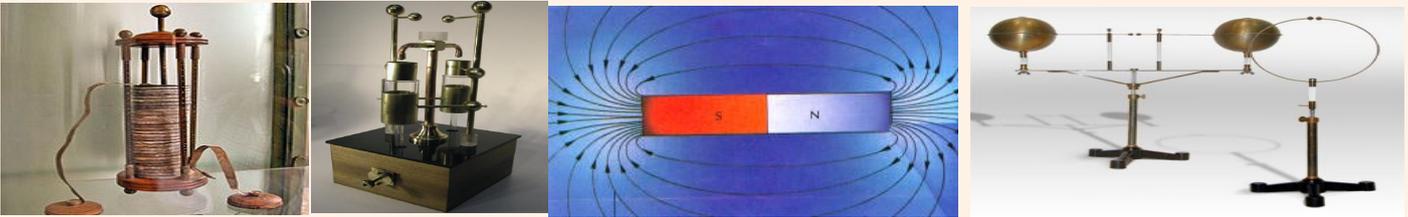
Las ideas de Joule y Lord Kelvin hicieron resucitar el modelo de bolas elásticas de Bernoulli para explicar la ley de Boyle-Mariotte e incluso la de Gay-Lussac o también conocida como ley de Charles-Gay-Lussac, pues Jacques Alexandre Charles (1746-1823) fue el primero en realizar la medida del grado de expansión de los gases, pero como no publicó sus experimentos, Gay-Lussac se adelantó al publicar sus observaciones en 1802.



Jacques Alexandre Charles.

En 1859 el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), en el marco de sus aportaciones en el desarrollo de la teoría del Electromagnetismo, recoge las ideas de Joule y Lord Kelvin en el campo de la Termodinámica y las depura al establecer su ley de reparticiones de las velocidades, que es la base de la teoría cinética y resultó ser en su tiempo una de las más hermosas aplicaciones del cálculo de probabilidades al mundo de la Física. En 1860, Maxwell dedujo el recorrido libre medio de las moléculas, siendo ésta una magnitud accesible a la medición y, por tanto, su conocimiento permite hacer conjeturas sobre el tamaño de las moléculas y de su número en la unidad de volumen.

El gran valor de la teoría cinética es el de encontrar interdependencias entre fenómenos hasta entonces aislados como frotamiento, difusión y conductividades calóricas, sino que también condujo a encontrar inesperadas relaciones como la de la presión y frotamiento y el holandés Jacobus Van't Hoff (1852-1911) extiende la teoría cinética a los líquidos y en 1885 descubre su famosa ley sobre la presión osmótica.

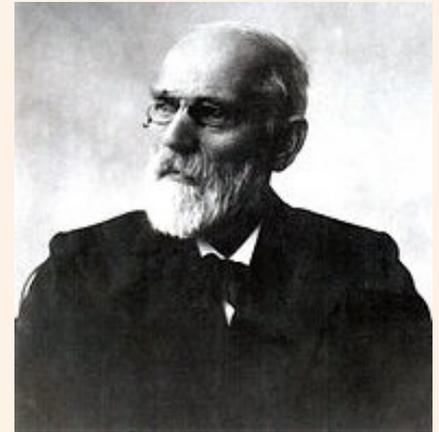


Por otro lado, las desviaciones de las leyes de Boyle-Mariotte y Gay-Lussac dejaron de ser enigmáticas al definirse el comportamiento real de los gases, cuyo volumen molecular no es ya despreciable frente al volumen total del gas y aparece el concepto de las fuerzas intermoleculares, introducido por el holandés Johannes Van der Waals (1837-1923) en su famosa ecuación de estado de 1873, donde considera el volumen propio de cada molécula. De esta forma sólo los denominados gases ideales obedecen las leyes de Boyle-Mariotte y Gay-Lussac y se dejan definir por la famosa ecuación de Clapeyron:  $p \cdot V = R \cdot T$ .

En 1862 Joule y Lord Kelvin demuestran que cuando se permite a un gas dilatarse libremente, su temperatura desciende, esta observación se conoce hoy en día como efecto Joule-Thomson y fue el factor decisivo para lograr la licuación de los gases permanentes y emprender una carrera por la consecución del cero absoluto, siendo el alemán Walter Nernst (1864-1944), quien apoyándose en hechos químicos niega en 1906 el que se pueda alcanzar el cero absoluto, agregando con ello a los dos principios de la Termodinámica un tercero.

Por otra parte, la realidad de la agitación molecular en el seno de la materia se manifestó de modo espectacular en los líquidos, gracias a un fenómeno ya conocido en los tiempos de Clausius y Maxwell, sin que hubiera atraído su atención, el movimiento browniano, descrito en 1827 por el alemán Robert Brown (1773-1858). Son el físico y matemático alemán Ludwig Christian Wiener (1826-1896) en 1863 y el químico escocés William Ramsay (1852-1916) en 1866 los primeros en encontrar una explicación de tal fenómeno en base a la teoría cinética, confirmando esta interpretación en 1889 el francés Louis Georges Gouy (1854-1926).

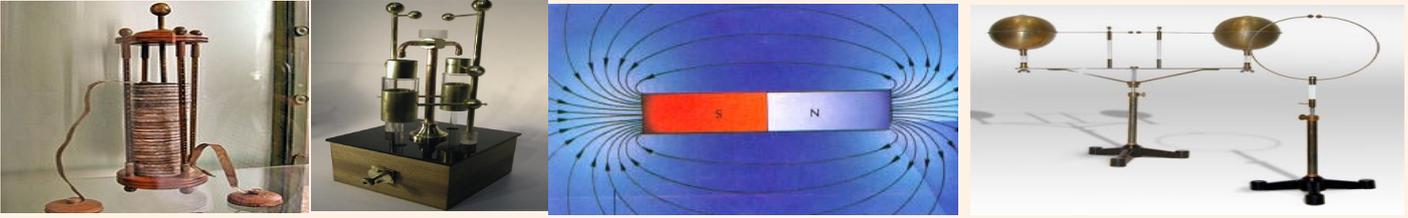
El movimiento browniano, como todos los fenómenos estudiados a la escala molecular, deja al segundo principio de la Termodinámica sin una verdadera última explicación. Clausius y Lord Kelvin habían dejado abierto el problema del porqué del misterioso aumento de la entropía. En la última década del siglo XIX, Ludwig Boltzmann llega a su famosa ecuación en la que relaciona la entropía con el logaritmo de la probabilidad y de esta forma la entropía pierde su carácter misterioso al relacionarla con el cálculo estadístico. La entropía es, pues, un aspecto del azar que rige el mundo macroscópico, sometido a la ley del gran número, por tanto la entropía sólo opera sobre el pavoroso conjunto de moléculas del sistema, abriendo de esta forma Boltzmann una escisión, por primera vez en la historia de la Física, entre las leyes macroscópicas y las microscópicas. Al penetrar en el interior atómico en el siglo XX, dicha dualidad se volverá aún más profunda e inquietante.



Johannes Van der Waals.



Tumba de Boltzmann en Viena. Sobre su busto se puede leer su ecuación:  $S = k \log W$ .



## 6. Los grandes hombres de la Electricidad.

El primero es el inglés Michel Faraday (1791-1867), quien en 1831 descubre la inducción electromagnética de la forma siguiente: Construye una bobina de inducción, cuyos conductores del primario y secundario se enrollan en una bobina de madera, uno al lado del otro y aislados entre ellos. El circuito del cable primario se conecta a una batería o pila de aproximadamente 100 celdas. En el cable del secundario se inserta un galvanómetro. Al hacer su primera prueba no observa ningún resultado, el galvanómetro permanece en reposo, pero al aumentar la longitud de los conductores se da cuenta de una desviación del galvanómetro en el conductor del secundario cuando el circuito del conductor primario se abre y cierra. Esta es la primera observación del desarrollo de la fuerza electromotriz por inducción electromagnética.

En pocos meses Faraday descubre experimentalmente prácticamente todas las leyes y hechos actualmente conocidos sobre la inducción electromagnética y la inducción magnetoeléctrica.

En 1834 el ruso Heinrich Lenz (1804-1865) establece su ley que permite prever el sentido de la corriente eléctrica en todos los casos de la inducción y el norteamericano Joseph Henry (1797-1878), con sus numerosos experimentos con electroimanes, se le puede considerar como el padre de la autoinducción y el divulgador de las corrientes inducidas engendradas por otras corrientes inducidas, fenómeno éste antes observado a mediados del siglo XIX por el escocés Fleeming Jenkin (1833-1885), que fue profesor de ingeniería de la Universidad de Edimburgo y es conocido mundialmente por ser el inventor del teleférico en 1882.

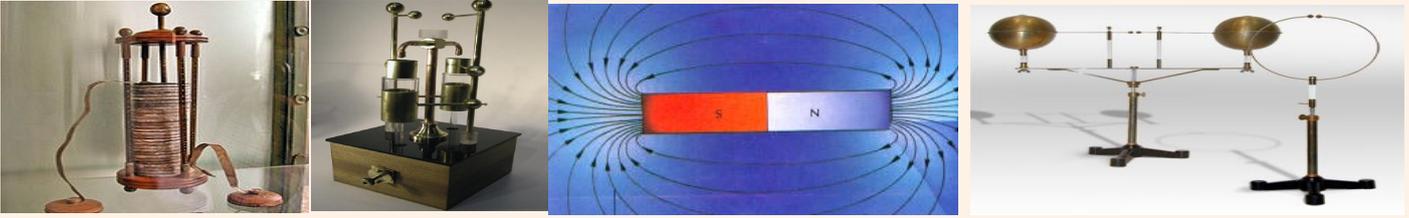
En 1834 inicia Faraday sus investigaciones sobre las acciones químicas de la corriente eléctrica. A él se debe la nueva nomenclatura como los términos anión, catión, ion y electrólito, y desde sus experimentos llega a vislumbrar la naturaleza granular de la electricidad, proposición cardinal de la moderna teoría atómica. Aunque, desde las investigaciones de Faraday, el electrón está virtualmente presente en la Física y cuando al fin, en los fenómenos de descarga en el vacío, se manifiesta su existencia, no causa ninguna sorpresa. Faraday no dio nombre a la carga eléctrica elemental, fue el irlandés Johnstone Stoney (1826-1911) quien la llamó electrón en 1891.



Joseph Henry inventó el telégrafo, pero no lo patentó, y la gloria se la llevó el norteamericano Samuel Morse (1791-1872), que fue un inventor que contribuyó a la invención del telégrafo y del método de transmisión código Morse.

**La dinamo** es un generador eléctrico destinado a la transformación de la energía del movimiento de rotación en energía eléctrica mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, generando una corriente eléctrica continua.

El 17 de enero de 1867, Siemens anuncia en la Academia de Berlín el invento de su dinamo, que emplea electroimanes en lugar de imanes permanentes. En ese mismo día, Charles Wheatstone lee en la Royal Society un documento en el que describe un diseño similar con la diferencia de que en la dinamo de Siemens los electroimanes del estator están en serie con el rotor de la dinamo, pero en el diseño de Wheatstone están en paralelo.



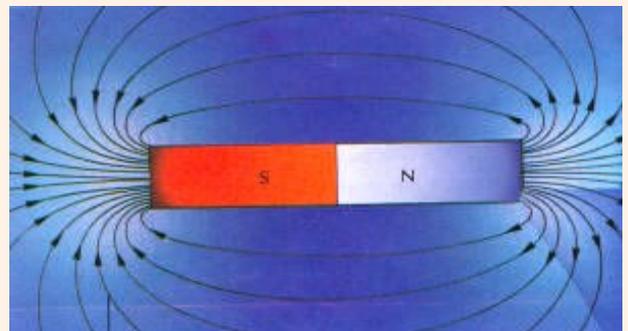
En 1867 el alemán Werner von Siemens (1816-1892), industrial fundador de la actual empresa Siemens construye su dinamo basada en el fenómeno de la inducción electromagnética y en 1876 el escocés Alexander Graham Bell (1847-1922) logra la patente del invento del teléfono. Además de los descubrimientos de Faraday, son muy importantes sus interpretaciones. Así, en 1837 da con la imagen de las líneas de fuerza. Faraday es sobre todo un físico intuitivo, no piensa con fórmulas, piensa con imágenes. Sus conocimientos matemáticos no sobrepasan el álgebra elemental pero esta limitación, consecuencia de su destino que le había cerrado el camino de la formación universitaria, se convierte en ventaja, ya que le impide construir teoremas analíticos y lo dirige hacia la representación geométrica e intuitiva.



Michel Faraday.

El concepto de líneas de fuerza se conocía antes de Faraday, pero mientras que para Laplace el concepto existía dentro de la teoría de campos con un sentido más bien matemático y, por tanto, las líneas de fuerza eran sólo ficciones cómodas sin realidad física. Por el contrario, para Faraday las líneas de fuerza son tan reales como los objetos sensibles mismos.

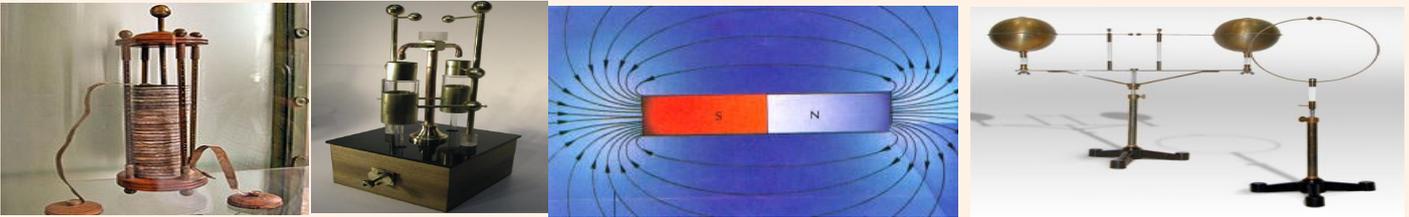
Faraday no admite la acción de fuerzas eléctricas a distancia y razona de la siguiente forma: si el medio que interviene en los experimentos causa diferencias en la transmisión de la acción eléctrica, ésta no puede ser una acción a distancia como en la acción gravitatoria y debe transmitirse punto a punto a través del medio circundante, siendo estos puntos los que forman las líneas de fuerza. Más tarde, el genial Maxwell da armadura matemática a la doctrina de Faraday de las líneas de fuerza.



Líneas de fuerza magnéticas en un imán.

La representación física de las líneas de fuerza le permitió a Faraday encontrar la influencia de los aislantes sobre los efectos eléctricos, midiendo para una serie de sustancias la "capacidad inductora específica", que es la magnitud que caracteriza al medio en los fenómenos eléctricos y que en 1873 recibió de Maxwell el nombre de constante dieléctrica.

Una vez determinado el papel de los diferentes dieléctricos en el campo eléctrico, Faraday examina el comportamiento de las diferentes sustancias en campos magnéticos, distinguiendo entre cuerpos paramagnéticos y diamagnéticos y concluye que el magnetismo es una propiedad general de toda la materia. Finalmente su intuición también le conduce a sugerir que las líneas de fuerza de un campo magnético deben actuar de un modo u otro sobre la luz. Sus conjeturas se verifican una tras otra y en 1896 el holandés Pieter Zeeman (1865-1943) pone en evidencia la actuación del campo magnético sobre la luz.



Hay que abandonar Gran Bretaña para encontrar en Alemania la continuidad de la obra del genial Faraday, pero antes hay que citar el trabajo de Friedrich Gauss (1777-1855), gran matemático cuya aportación al mundo de la Física es su célebre memoria de 1832 sobre la intensidad del magnetismo terrestre, donde introduce el sistema de unidades absolutas.

Apoyado en la ley de Coulomb, Gauss indicó como la unidad de magnetismo se deduce de las unidades fundamentales, al acudir sólo a las leyes de la Física con exclusión de factores arbitrarios. Su colaborador Wilhelm Weber (1804-1891) aplica su idea a todas las magnitudes eléctricas. Inventó los instrumentos requeridos y a ejecutar, con precisión inigualada hasta entonces, las mediciones para establecer las unidades de amperio, culombio, ohmio y voltio, introducidas en 1891 por el Congreso de Electricistas reunido en París.

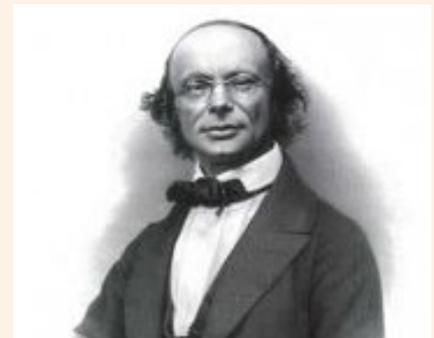
Como teórico, Weber englobó en una fórmula las acciones mutuas de cargas eléctricas en reposo o en movimiento, pues la ley fundamental de Ampère sólo da cuenta de los fenómenos electrodinámicos. Finalmente el también alemán Franz Neumann (1798-1895) establece las leyes cuantitativas de la inducción, al admitir que la fuerza electromotriz que actúa en un circuito esta determinada por el número de líneas de fuerza que el circuito gana o pierde por segundo.

Volviendo a Gran Bretaña nos encontramos con el escocés James Clerk Maxwell (1831-1879), alumno de Faraday y el más imaginativo de los físicos teóricos del siglo XIX. Su curiosidad de investigador le arrastró durante algún tiempo hacia la teoría cinética de los gases, pero los fenómenos eléctricos son los que verdaderamente cautivaron su imaginación.

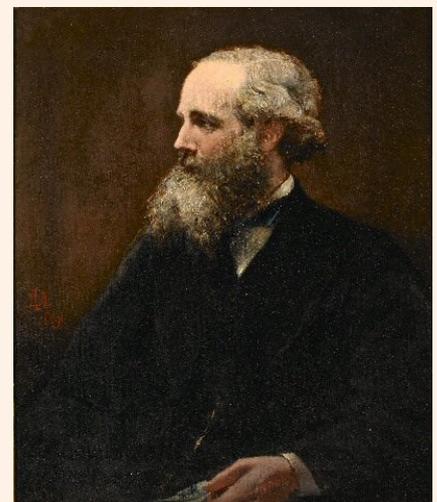
Maxwell construye la ciencia del Electromagnetismo entre los años 1864 y 1873. Con poderosa síntesis logra reunir en cuatro ecuaciones, la ley de Coulomb, la teoría laplaciana del potencial, los descubrimientos de Oersted y Ampère, la ley de Ohm y los resultados de los experimentos de Faraday. Sus ecuaciones prevén además la existencia de ondas eléctricas y magnéticas, análogas a las ondas luminosas y establece una unión entre el Electromagnetismo y la Óptica, concluyendo que la luz es una perturbación electromagnética que se propaga en el éter, por lo que las ondas electromagnéticas y las ondas luminosas son fenómenos idénticos.



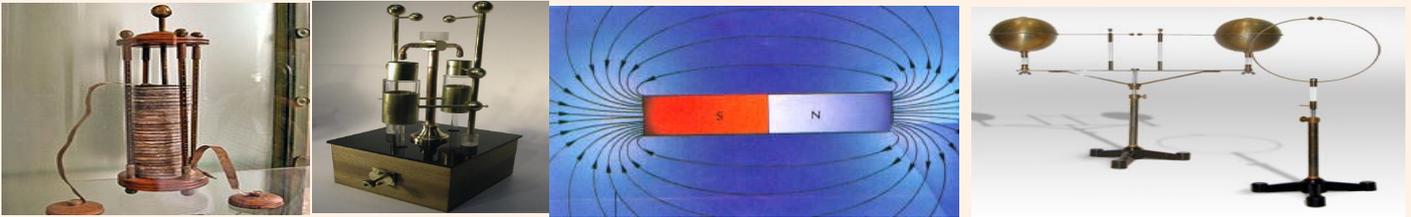
Friedrich Gauss.



Wilhelm Weber.



James Clerk Maxwell.



Consecuencia inmediata de la teoría de Maxwell es el establecer una inesperada relación entre dos propiedades características, la constante dieléctrica y el índice de refracción de una sustancia dada. Obtiene que la constante dieléctrica es igual al cuadrado del índice de refracción. Esta igualdad fue demostrada por Boltzmann al verificar su cumplimiento en 1873, pocos meses después de la publicación de la obra del gran pensador escocés.

Esta fue la primera señal experimental de la certidumbre de la teoría maxweliana. Además, enseguida se vio claramente que la nueva teoría suprimía la mayoría de las dificultades que planteaban las concepciones mecánicas de Fresnel.

Pero no todas las dudas desaparecen inmediatamente, tiene que ser el alemán Heinrich Hertz (1857-1894) quien despeje todas las dudas y prueba con una serie de experiencias concluyentes, no sólo la realidad de las ondas electromagnéticas, sino también el perfecto acuerdo de sus características con las previstas por las lúcidas conclusiones del gran escocés.

Con su oscilador logra en 1887 aplicar la idea de la resonancia para revelar la existencia de las ondas eléctricas y con su simple dispositivo encuentra, una tras otra, las características de la luz visible en sus ondas y verifica positivamente la predicción de Maxwell de que la velocidad de sus ondas es la de la luz, con lo que de esta forma la existencia de las ondas electromagnéticas es ya una realidad tangible.

La obra de Hertz termina la magnífica estructura del pensamiento de Maxwell al convertir sus hipótesis en hechos experimentales.

Aunque la teoría de Maxwell da una descripción global de los fenómenos, no penetra en su íntima naturaleza, así, si bien la teoría enseñó que la radiación consistía en ondas electromagnéticas, nada reveló del mecanismo emisor de las ondas luminosas, pues condujo a una interesante relación entre el índice de refracción de una sustancia y su constante dieléctrica, pero no explicó ni la dispersión de la luz, ni la doble refracción y permaneció extraña a las leyes de la electrólisis.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

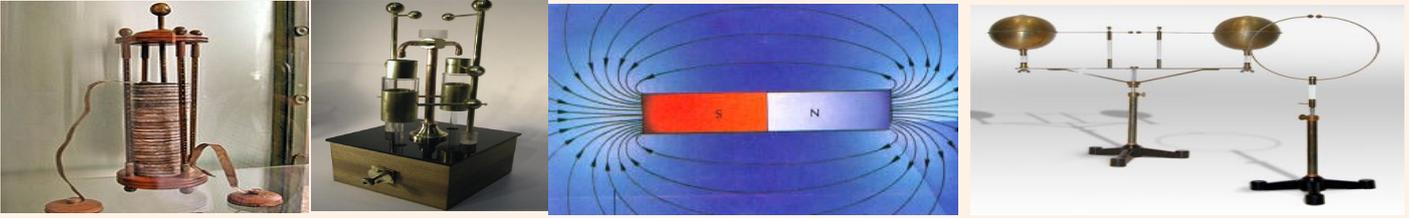
Ecuaciones de Maxwell.



Heinrich Hertz.



Instrumental con el que Hertz logró demostrar la teoría de Maxwell.



La limitación de la teoría de Maxwell tiene profundos motivos: Maxwell considera al éter portador de efectos electromagnéticos como un medio homogéneo y continuo. Sus ecuaciones no acuden a la estructura granular de la electricidad, cuya decisiva importancia para la representación de los fenómenos eléctricos y magnéticos no había escapado a Weber, a Helmholtz ni a Stoney.

Las ecuaciones de Maxwell describen en la escala macroscópica las interacciones entre los campos electromagnéticos por una parte y las cargas y corrientes eléctricas por otra. Para prever los fenómenos que transcurren en la escala microscópica, en el seno de la materia discontinua, y para penetrar en la vinculación entre los átomos radiadores y su radiación, es menester extrapolar las fórmulas de Maxwell, teniendo en cuenta la naturaleza corpuscular de la materia y de la electricidad.

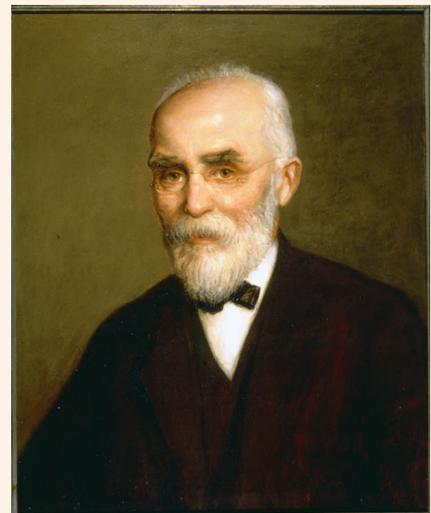
De tal penetración procede la obra del holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), que en 1892 publica su famosa memoria: "La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants", donde admite que el fluido eléctrico está formado por partículas elementales semejantes las unas a las otras y de una masa extremadamente débil. Supone que la carga de estas partículas es igual al cuanto de electricidad, cuya existencia habían ya revelado las leyes electrolíticas de Faraday.

Admite dos categorías de partículas elementales con signos contrarios. Atribuye a las negativas la función de los fenómenos eléctricos y ópticos y Stoney les da el nombre de electrones.

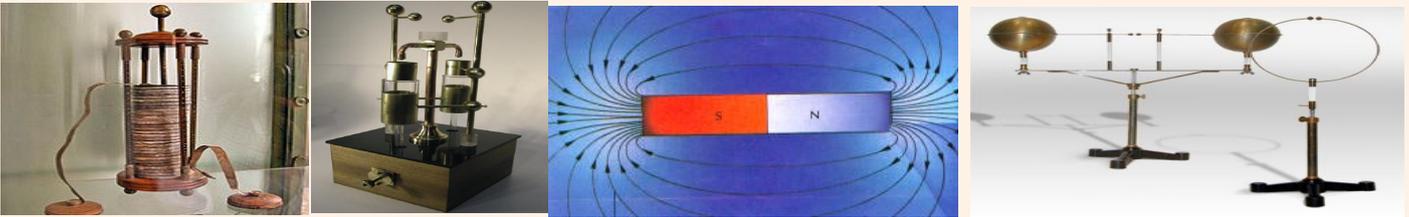
Lorentz demuestra el gran poder aclaratorio del nuevo concepto. Así, todo aquello que aparece bajo la forma de corriente eléctrica no es más que un desplazamiento conjunto de electrones por un conductor. También explica la polarización en los malos conductores y los fenómenos del magnetismo, éstos últimos como consecuencia de los movimientos de los electrones, que dan origen a minúsculas corrientes moleculares en el interior de los átomos de los imanes.

Cada electrón en movimiento lleva consigo a su alrededor un campo electromagnético microscópico y la suma de tales campos microscópicos son los que originan los grandes campos, los únicos que estamos en condiciones de observar y medir, sólo éstos últimos obedecen a las ecuaciones de Maxwell, las cuales son, por tanto, leyes estadísticas que abarcan, no sólo a los electrones aislados, sino a un ingente número de los mismos.

También afirma que las rotaciones de los electrones en el interior del átomo engendran radiación, de forma que si el movimiento es lo suficientemente rápido nacen los rayos luminosos, cuya frecuencia es igual a la de los electrones giratorios. Continúa afirmando, son los desplazamientos electrónicos en el interior atómico los que originan la emisión de las líneas espectrales. Lorentz supone que la trayectoria electrónica es circular y prevé que el campo magnético modifica la trayectoria de los electrones y la frecuencia de la luz que éstos producen.



Hendrik Antoon Lorentz.

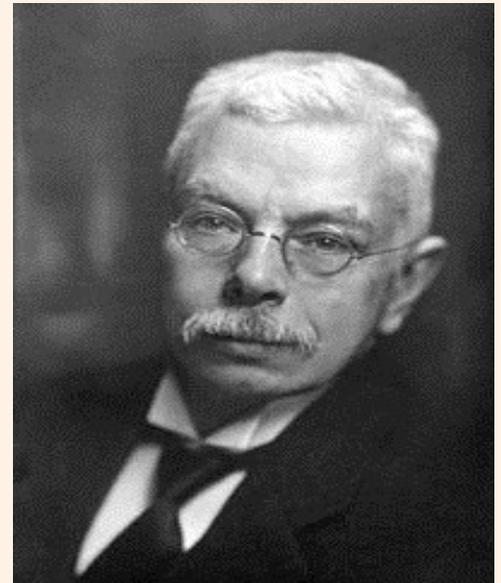


La prueba experimental de esta previsión la evidencia Pieter Zeeman en 1896 al comprobar que la famosa raya amarilla D de la llama de sodio, colocada en el interior de un intenso campo magnético, se divide en dos componentes.

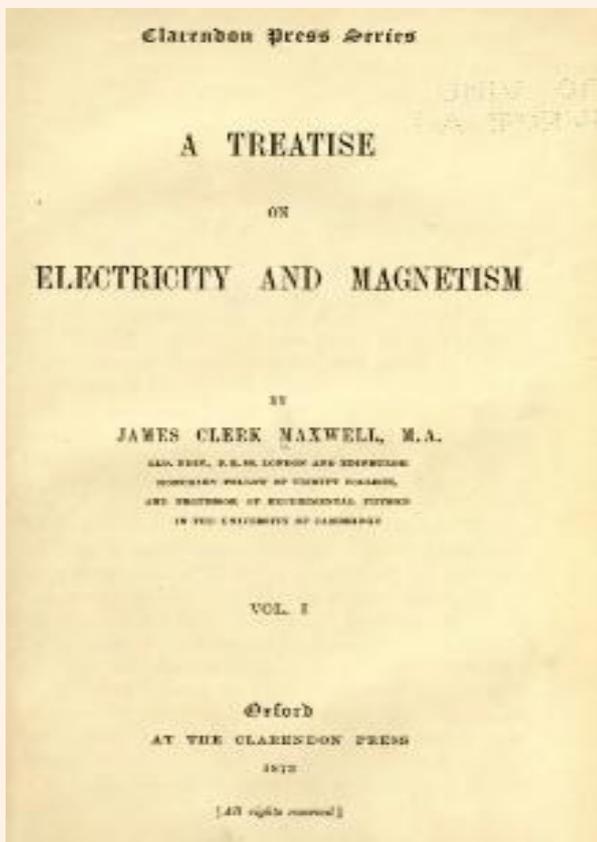
El efecto Zeeman es la primera evidencia experimental de la estructura electromagnética del átomo y, además, suministra los datos para calcular la magnitud carga/masa, conduciendo a la conclusión de que la masa del electrón es unas 1800 veces inferior a la de un átomo de hidrógeno.

Este resultado fue brillantemente confirmado por el estudio de los fenómenos de descarga en el vacío.

La teoría de Lorentz es la coronación de la Física Clásica, colocando al electrón en el proscenio de las investigaciones teóricas y experimentales. “La materia es un fenómeno eléctrico” es la idea capital de Lorentz.

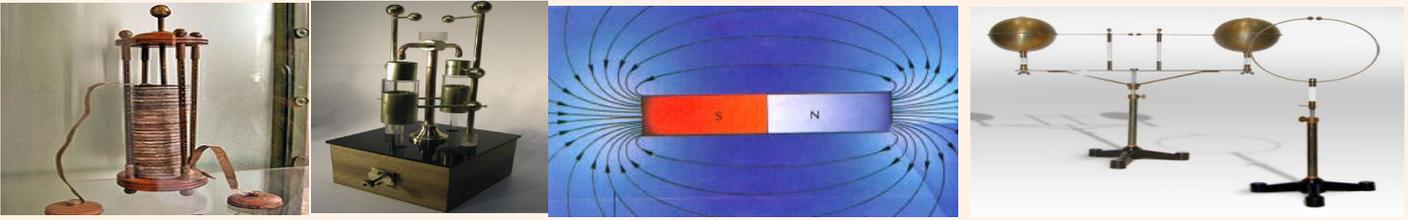


Pieter Zeeman.



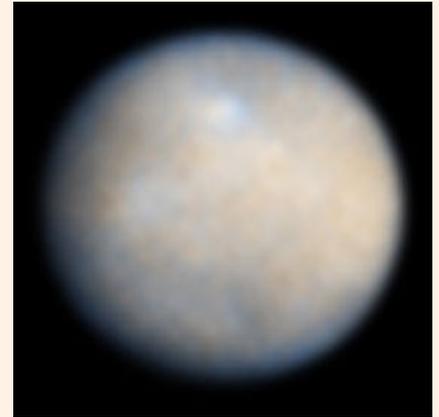
De esta forma se abandona el estudio de la Física en la Modernidad con la gran paradoja de que la obra de Maxwell, sintetizada en su tratado de 1873: “Treatise on Electricity and Magnetism” sirve, por un lado para culminar y sintetizar todo el desarrollo de los estudios eléctricos y ópticos, y, por otro lado, da lugar a que se abran nuevas interrogantes que conducen en el siglo XX al desmantelamiento de la Física Clásica que tan brillantemente iniciara el otro gran inglés del siglo XVII, Isaac Newton.

Treatise on Electricity and Magnetism de Maxwell.

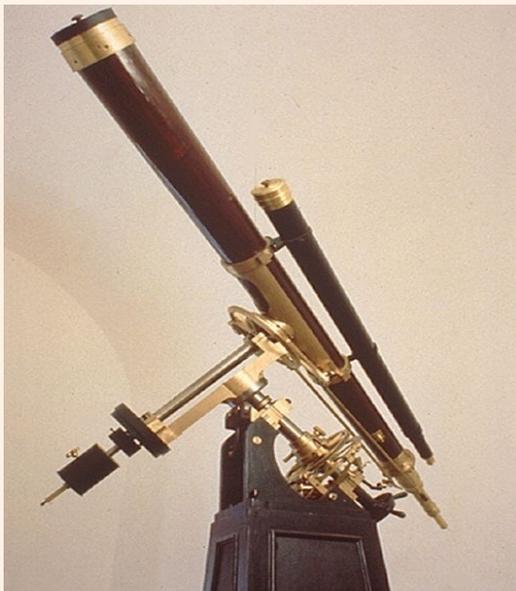


## 7. La Astronomía en el siglo XIX.

Entre 1799 y 1825, el gran astrónomo francés Pierre Simon Laplace (1749-1827) escribe una monumental obra de cinco volúmenes llamada "Tratado de mecánica celeste" en donde recopila la obra astronómica existente hasta entonces, y además, después de hacer un análisis de las perturbaciones del movimiento de los planetas y cometas alrededor del Sol y de la Luna sobre la Tierra, sienta los siguientes principios: 1º. La invariabilidad de las distancias medias de los planetas al Sol. 2º. La estabilidad del sistema planetario.



Ceres.



Telescopio de Fraunhofer.  
 Fraunhofer era un vidriero de mucha inteligencia y de gran agudeza visual. Llegó a fabricar los espejos de telescopios más perfectos para su época.  
 En sus experimentos de 1814 dirigidos a corregir las aberraciones cromáticas de sus telescopios utilizó las líneas espectrales de la luz y se sintió fascinado por ellas. Detectó centenas de rayas verticales en el espectro del Sol e idénticas irregularidades en los espectros de la luz procedente de la Luna.

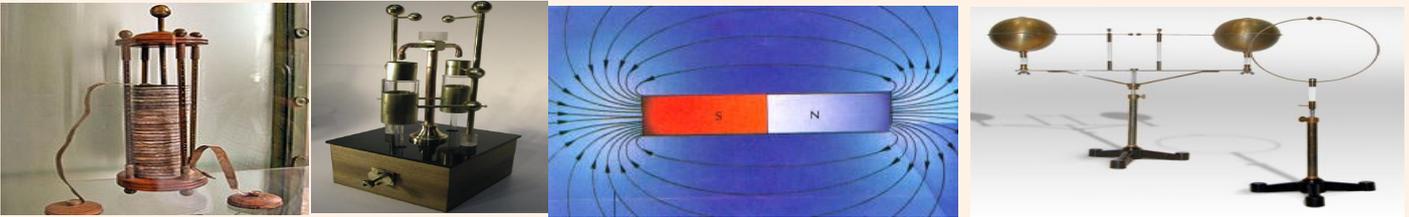
El avance de las observaciones astronómicas en el siglo XVIII permite afirmar que hacia 1800 se había fijado ya la escala del sistema solar, con sus planetas, pero la distancia de las estrellas seguía siendo una incógnita.

En la noche de fin de año de 1800 a 1801, el italiano Giuseppe Piazzi (1746-1826) descubre en el espacio entre Marte y Júpiter el primer pequeño planeta, al que se le llama Ceres. Posteriormente se van descubriendo más pequeños planetas que reciben el nombre de asteroides.

De esta forma, la primera mitad del siglo queda marcado por la determinación de las distancias de las estrellas, después de haber realizado las medidas de las distancias a los planetas, mediante el método de la paralaje. Así, en 1838 el alemán Friedrich Bessel (1784-1846) obtiene que la distancia a la estrella 61 de la constelación de Cisne es 11,4 años-luz, 11 años-luz con las correcciones posteriores. Dada la dificultad de medir la paralaje de objetos muy lejanos, como las estrellas, Bessel utilizó un heliómetro, instrumento que él mismo diseñó y que Fraunhofer se lo construyó para medir los mínimos desplazamientos de 61 de Cisne.

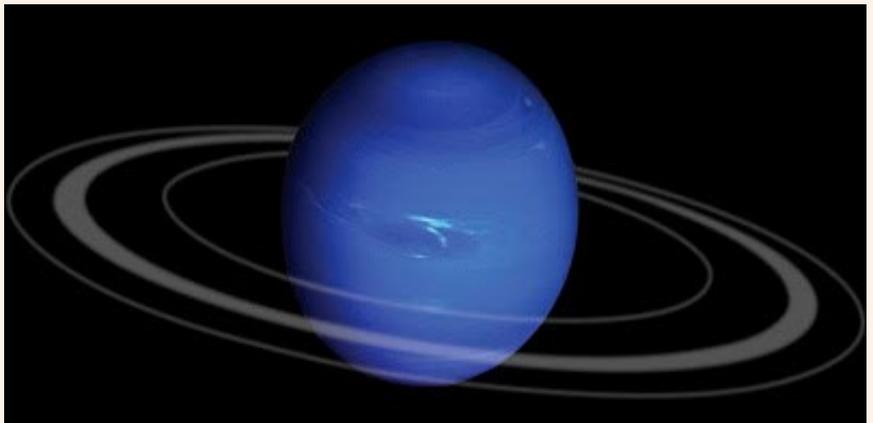
En 1839, el escocés Thomas Henderson (1798-1844), director del Observatorio del Cabo de Buena Esperanza, en el hemisferio sur, publica los resultados de la paralaje de las tres estrellas de Alfa Centauro y obtiene que el

conjunto de las tres estrellas se encuentra a 4,3 años-luz.



En 1840, el germano-ruso Friedrich Struve (1793-1864), director del observatorio de San Petersburgo dispone del mayor y mejor telescopio de refracción del mundo, construido por Fraunhofer, y obtiene la paralaje de la estrella Vega, que es de 27 años-luz. Por tanto, en 1840 la determinación de las paralajes de las primeras estrellas, conduce a afirmar que las estrellas más cercanas se hallan a unas distancias enormes, lo que lleva a la siguiente pregunta: ¿existe un límite geométrico para el Universo?

En 1844, Bessel comprueba que el movimiento propio de Sirio exige la presencia de una estrella compañera oscura y su existencia es confirmada en 1862 por el astrónomo norteamericano Alvan Graham Clark (1832-1897). En 1846, el inglés John Adams (1819-1892) y el francés Urbain Leverrier (1811-1877) demuestran, independientemente, la existencia del planeta Neptuno (llamado así por Leverrier) por las perturbaciones que sufre Urano mediante cálculo matemático, antes de que el alemán Johann Galle (1812-1910) lo observara por telescopio en el Observatorio de Berlín en el mismo año, duplicándose otra vez el diámetro conocido del sistema solar.



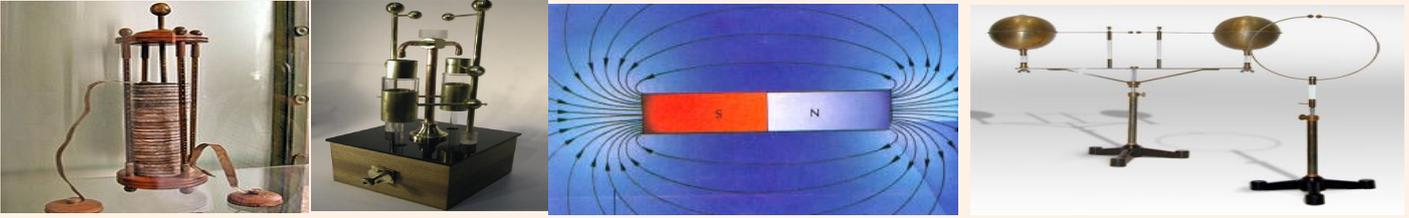
Neptuno.

Una técnica que se ha revelado muy importante en la Astronomía es la del análisis espectral, descubierta en 1814 por Joseph Fraunhofer, y desarrollada más tarde por Gustav Kirchhoff, al hacer pasar los rayos de luz procedente de una estrella a través de una ranura muy fina antes de atravesar un prisma, y obtener líneas, las líneas espectrales de los distintos elementos químicos existentes en la atmósfera de dicha estrella.



Anders Jonas Angström.

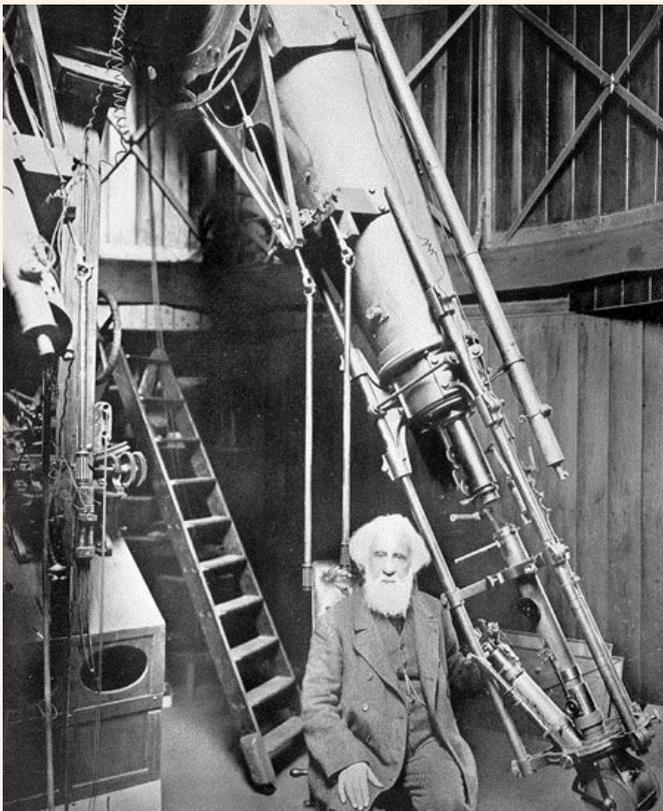
De esta forma, en 1861 el sueco Anders Jonas Angström (1814-1874) aplica la espectroscopia en la Astronomía y anuncia el descubrimiento de la existencia de hidrógeno en el Sol. En 1864, el italiano Giovanni Donati (1826-1873) estudia por primera vez el espectro de un cometa en la proximidad del Sol y, en 1866, el inglés William Huggins (1824-1910) es el primero que detecta por análisis espectral el gas hidrógeno en las estrellas, lo que conduce a la afirmación de que las estrellas en particular y el Universo en general consisten principalmente de hidrógeno.



Posteriormente, en 1868, Huggins localiza un pequeño desplazamiento en las líneas espectrales de Sirio, demostrando que se mueve alejándose del Sol (corrimiento hacia el rojo), lo que le permite hallar la velocidad de la estrella y dicha técnica facilitará más tarde, en el siglo XX, al astrónomo norteamericano Edwin Hubble establecer su noción de la estructura y extensión del Universo, aunque el problema de la extensión finita o infinita del Universo sigue vigente y es una cuestión aún no resuelta.



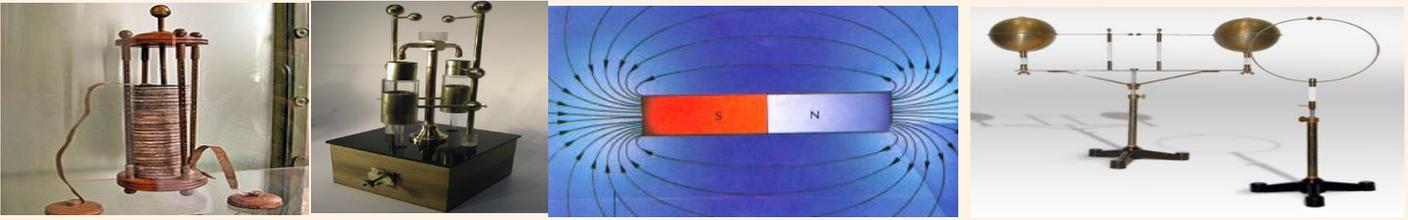
Espectro del hidrógeno.



Fotografía de Huggins con su telescopio.

Se puede concluir que lo caracteriza en el siglo XIX en el campo de la Astronomía es que la técnica instrumental a lo largo del siglo experimenta un gran avance y no sólo por la introducción de la técnica del análisis espectral, sino también por la aplicación de los métodos de la fotografía y los fotómetros en la segunda mitad del siglo XIX, lo que facilita enormemente la detección, el registro de las estrellas y el archivo de datos, dando origen a la Astrofísica, cuyo desarrollo tiene lugar en el siglo XX.

En 1875, Huggins es el primero que descubre métodos para fotografiar las radiaciones del espectro, lo que mejoró notablemente la técnica de obtención de los espectros de la luz de las estrellas.



## 8. Actividades.

1. ¿Qué quiere decir que los descubrimientos de Oersted son de carácter empírico?
2. ¿Por qué la formulación matemática de Biot y Savart es de tipo newtoniano?
3. ¿Qué diferencia hay entre las ondas luminosas de Young y de Fresnel?
4. Explica el experimento de Fizeau de la medida de la velocidad de la luz.
5. ¿A qué se llama rayos calóricos? y define cuerpo negro y espectroscopio.
6. ¿Cuál es la contribución de Balmer en el desarrollo de la espectroscopia?
7. ¿Qué dedujo Stefan sobre la radiación? y explica qué es la catástrofe del ultravioleta.
8. ¿Por qué es tan importante la aportación de Fourier en el desarrollo de Física Teórica?
9. ¿Quién es el autor del descubrimiento del principio de conservación de la energía?
10. ¿Cuál es el significado de la entropía?
11. Indica cual de los siguientes físicos es el autor del Tercer Principio de la Termodinámica: a) Lord Kelvin. b) Maxwell. c) Van der Waals. d) Nernst. e) Boltzmann.

12. Explica que ley estableció Lenz.

13. Pon un pie a las siguientes representaciones:

14. ¿Es Maxwell un físico teórico o experimental?

15. El gran físico y matemático del siglo XX Ri-

chard Feynmann afirmó: “Desde una perspectiva amplia de la historia de la Humanidad, hay muy pocas dudas de que el descubrimiento de las leyes del electromagnetismo de Maxwell será juzgado como el acontecimiento más significativo del siglo XIX.”. Da una explicación del porqué del sentido de dicha frase.

16. Explica el significado de la frase: “La belleza y armonía del edificio que se levantó a lo largo del todo el siglo XIX produce sobre los pensadores de la época, hacia el 1900, la impresión de que en sus rasgos fundamentales el armazón es definitivo y que podrá resistir indefinidamente los embates de los siglos venideros, por lo que se puede afirmar que en el siglo XIX concluye la magna obra de la Física Clásica, empezada en el siglo XVII.”

