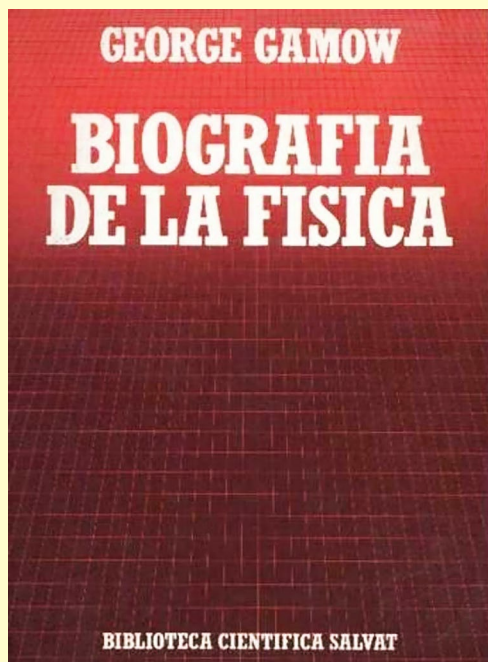




Leyendo a...

Biografía de la Física de George Gamow

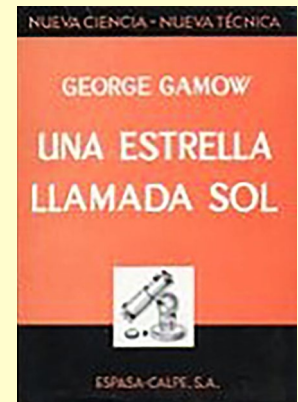
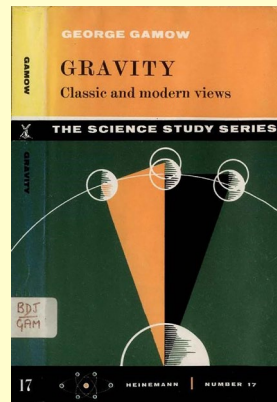
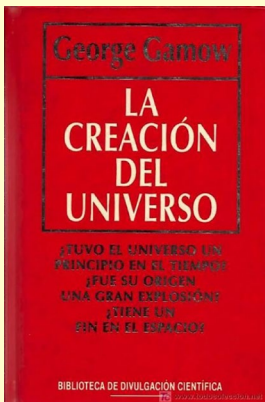
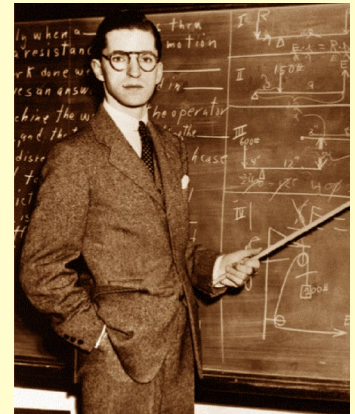


George Gamow (Rusia, 1904, Estados Unidos, 1968). Físico estadounidense de origen ruso conocido por sus trabajos en diversos temas, incluyendo el núcleo atómico, la formación estelar, la nucleosíntesis estelar y la formación de elementos químicos, cosmogénesis y el código genético. En la Universidad de Leningrado obtuvo la licenciatura en 1926 y el doctorado en 1928. Estudió también en la Universidad de Gotinga, en Copenhague, junto a Niels Bohr, y en Cambridge con Lord Rutherford. Fue profesor en la Universidad de Leningrado, entre 1931 y 1933.

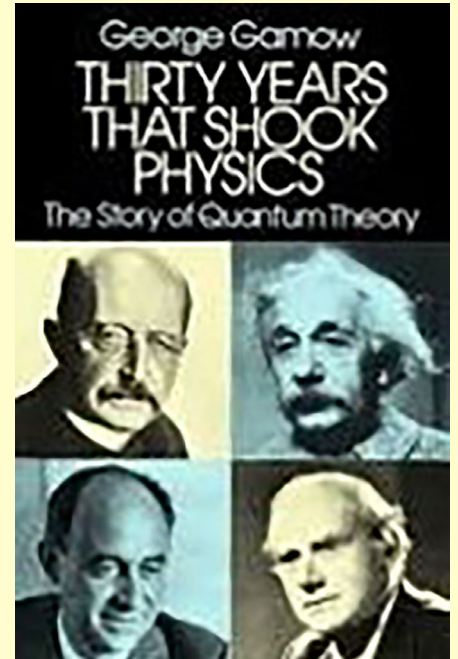
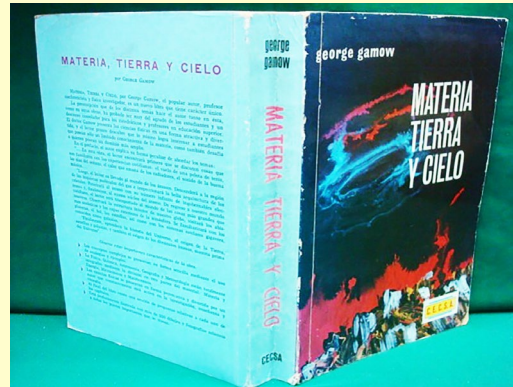
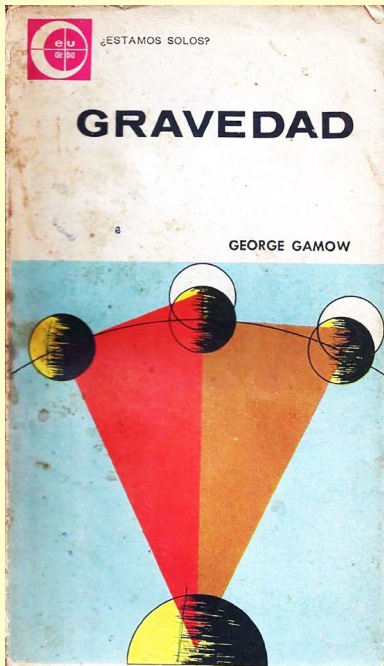
Eureka, Enseñanza de las Ciencias Físicas, julio 2016

George Gamow (Rusia, 1904, Estados Unidos, 1968). Físico estadounidense de origen ruso conocido por sus trabajos en diversos temas, incluyendo el núcleo atómico, la formación estelar, la nucleosíntesis estelar y la formación de elementos químicos, cosmogénesis y el código genético. En la Universidad de Leningrado obtuvo la licenciatura en 1926 y el doctorado en 1928. Estudió también en la Universidad de Gotinga, en Copenhague, junto a Niels Bohr, y en Cambridge con Lord Rutherford. Fue profesor en la Universidad de Leningrado, entre 1931 y 1933.

Gamow junto con Ralph Alpher desarrolló la teoría sobre la formación de los elementos químicos original, conocida como Big Bang, que Georges Lemaître formuló en 1931 y que él contribuyó a divulgar. Desarrolló la teoría denominada Gamow-Teller y profundizó en el descubrimiento de Hans Bethe sobre el ciclo que produce la energía estelar. Desde 1956 hasta 1968 fue profesor de Física Teórica en la Universidad de Colorado. En 1956 recibió el Premio Kalinga de la UNESCO, por su labor de divulgación de la Ciencia. Sus obras de divulgación más importantes son: En el país de las maravillas (1940); La investigación del átomo (1944); Un, dos, tres... infinito (1947); La creación del universo (1952); Materia, Tierra y cielo (1958); Treinta años que conmovieron la Física: La historia de la teoría cuántica (1966); Gravedad (1962); entre otros.



Dentro de la tradición de divulgación científica realizada por científicos, George Gamow, destacado físico teórico, ocupa un lugar sobresaliente. Entre sus aportes científicos destacan la propuesta de un modelo nuclear, el concepto de «barrera de Gamow» (o barrera de potencial en el interior del núcleo) y el modelo cosmológico del «Big Bang». En Biografía de la Física se expone la historia de esta disciplina con mucha sencillez y rigurosidad, pero también contando anécdotas, leyendas y aspectos de cómo funciona la ciencia respecto a los descubrimientos científicos y cómo se llegaron a establecer algunas de las leyes físicas. De los distintos capítulos se han extractado algunos temas de diferentes áreas de la Física. Para facilitar la selección, búsqueda posterior y realización de actividades propuestas, se han destacado las secciones de cada capítulo del cual se han extraído los párrafos, como también se mantiene el número de las ilustraciones adaptadas del texto.



El libro Biografía de la Física consta de los siguientes capítulos:

Prólogo del autor

1. La aurora de la Física
2. Las edades oscuras y el Renacimiento
3. Dios dijo: "Que Newton sea"
4. El calor como energía
5. La edad de la electricidad
6. La revolución relativista
7. La ley de los cuanta
8. El núcleo atómico y las partículas elementales

Eureka, Enseñanza de las Ciencias Físicas, julio 2016

1. La aurora de la Física

Las fuentes que dieron origen al gran río de la ciencia física estaban diseminadas por toda la superficie de la Tierra habitada por el homo sapiens, es decir, el hombre pensante. Parece, sin embargo, que la mayoría estaban concentradas en la punta sur de la península balcánica, habitada por el pueblo que ahora llamamos los "antiguos griegos" o al menos así nos parece a los que heredamos la cultura de estos primeros "intelectuales". Es interesante saber que, mientras otras naciones antiguas, como Babilonia y Egipto, contribuyeron en gran medida al temprano desarrollo de las matemáticas y la astronomía, fueron completamente estériles respecto al desarrollo de la física.

En este capítulo, el autor lo divide en las siguientes secciones: La ley pitagórica de las cuerdas; Demócrito el atomista; La filosofía aristotélica; La ley de la palanca de Arquímedes; La ley de Arquímedes de los cuerpos flotantes; Arquímedes, consejero militar; La escuela alejandrina.

La ley pitagórica de las cuerdas

Mientras que estos legendarios descubrimientos difícilmente encontrarían base para un litigio legal sobre la prioridad, el descubrimiento del filósofo griego Pitágoras, que vivió a mediados del siglo VI antes de Cristo está bien documentado. Convencido de que el mundo está gobernado por los números, investigó la relación entre las longitudes de las cuerdas en los instrumentos musicales que producen combinaciones armónicas de sonidos.

A este propósito empleó el llamado "monocordio", es decir, una sola cuerda cuya longitud se puede variar y someter a diferentes tensiones producidas por un peso suspendido a su extremo. Usando el mismo peso y variando la longitud de la cuerda, vio que los pares de sonidos armónicos se producían cuando las longitudes de la cuerda estaban en relaciones numéricas sencillas. La razón de longitud 2:1 correspondía a lo que hoy llamamos "octava"; la razón 3:2 a una "quinta", la razón 1:3 a una "cuarta". Este descubrimiento fue probablemente la primera formulación matemática de

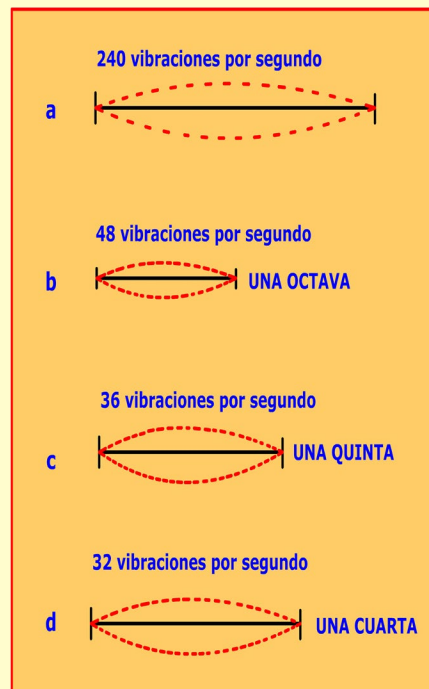
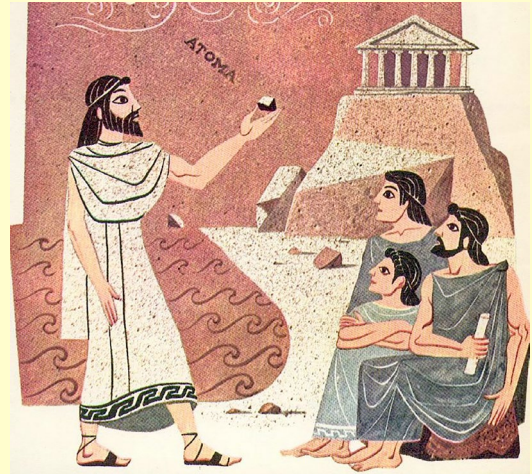


Figura 1.
Ley pitagórica de las cuerdas.

una ley física y se puede muy bien considerar como el primer paso en el desarrollo de lo que hoy conocemos como física teórica. En la moderna terminología física podemos formular de nuevo el descubrimiento de Pitágoras diciendo que la frecuencia, es decir, el número de vibraciones por segundo de una cuerda determinada, sujeta a una tensión dada, es inversamente proporcional a su longitud.(Fig. 1)

Demócrito, el atomista

Otra importante teoría física que en la moderna terminología podría ser llamada "una teoría sin ninguna base experimental" pero que resultó un "sueño que se torna realidad", fue propuesta por otro griego antiguo, el filósofo Demócrito, que vivió, pensó y enseñó hacia el año 400 antes de Cristo. Demócrito concibió la idea de que todos los cuerpos materiales son agregados de innumerables partículas tan pequeñas que no son visibles por los ojos humanos. Llamó a estas partículas átomos o indivisibles (ἄτομος) en griego, porque creía que representaban la última fase de la división de los cuerpos materiales en partes cada vez más pequeñas. Creía que hay cuatro clases diferentes de átomos: los átomos de la piedra, pesados y secos; los átomos de agua, pesados y húmedos; los átomos de aire, fríos y ligeros, y los átomos de fuego, fugitivos y calientes. Por una combinación de estas cuatro diferentes clases de átomos se suponía que están hechas todas las materias conocidas. El suelo era una combina-



Demócrito y el átomo.

ción de átomos de piedra y agua. Una planta que crece desde el suelo bajo la influencia de los rayos solares consistía en átomos de piedra y agua del suelo y los átomos del fuego procedían del Sol.

La ley de la palanca de Arquímedes

Otro gran griego de la Antigüedad, que vivió un siglo después de la época de Aristóteles fue Arquímedes, padre de la ciencia mecánica, que nació en Siracusa, capital de la colonia griega de Sicilia. Como hijo de un astrónomo, se interesó muy pronto por las matemáticas, en las que adquirió una gran destreza y en el transcurso de su vida hizo una serie de contribuciones muy importantes en las diferentes ramas de la matemática. Su obra más importante en el dominio de la matemática pura fue el descubrimiento de la relación entre la superficie y el volumen de una esfera y el cilindro que la circunscribe; en efecto, de acuerdo con su deseo, su tumba está señalada por una esfera inscrita en un cilindro. En su libro titulado Psammites (o calculadores de arena) expone el método de escribir números muy largos dando a cada cifra un "orden" diferente según su posición¹ y aplicándolo al problema de escribir el número de granos de arena contenidos en una esfera del tamaño de la Tierra.

En su famoso libro Sobre el equilibrio de las superficies (en dos volúmenes) desarrolla las leyes de la palanca y discute el problema de encontrar el centro de gravedad de cualquier cuerpo dado.... Arquímedes formulaba las leyes fundamentales de la "estática" (es decir, el estudio del equilibrio) comenzando por formular los "postulados" y derivando de ellos cierto número de "proposiciones".

Veamos ahora la prueba de la proposición sexta, modernizándola ligeramente en obsequio del lector:

Eureka, Enseñanza de las Ciencias Físicas, julio 2016

6. Dos pesos se equilibran a distancias recíprocamente proporcionales a sus pesos.

Supongamos que los pesos A y B son conmensurables (es decir, que la relación de los dos pesos está representada por una fracción racional como 5/3 o 117/32) y los puntos representan sus centros de gravedad (Figura 2 a). Tracemos la línea $\alpha\beta$ dividida en γ , de modo que

$$A : B = \beta\gamma : \gamma\alpha$$

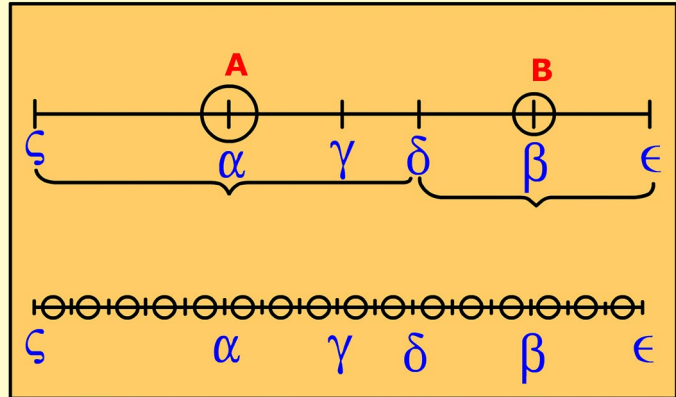


Figura 2. Prueba de Arquímedes de la ley de la palanca.

Tenemos que probar que γ es el centro de gravedad de los dos pesos tomados en conjunto. Como A y B son conmensurables, también lo serán $\beta\gamma$ y $\gamma\alpha$. Supongamos que $\mu\sigma$ es la medida común de $\beta\gamma$ y $\gamma\alpha$. Hagamos $\beta\delta$ y $\beta\epsilon$ igual a $\alpha\gamma$, y $\alpha\sigma$ igual a $\gamma\beta$.

Entonces $\alpha\delta = \gamma\beta$, puesto que $\beta\delta = \gamma\alpha$. Por tanto, $\alpha\delta$ está dividida en dos partes iguales en α como lo está $\delta\epsilon$ en β . Así pues, $\sigma\delta$ y $\delta\epsilon$ deben contener cada una a $\mu\nu$, un número par de veces.

Tomemos un peso Ω tal que Ω esté contenido varias veces en A como $\mu\nu$ está contenido en $\sigma\delta$, de donde: $A : \Omega = \sigma\delta : \mu\nu$; pero $B : A = \gamma\alpha : \beta\gamma = \delta\epsilon : \sigma\delta$

Por tanto, *ex aequalis* $B : \Omega = \delta\epsilon : \mu\nu$, o sea, que Ω está contenido varias veces en B como $\mu\nu$ es contenido en $\delta\epsilon$. Así pues, Ω es una medida común de A y B.

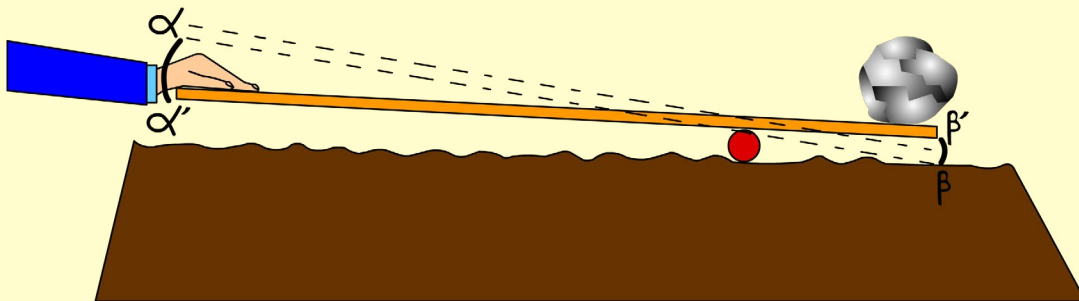


Figura 3. Si el brazo izquierdo de la palanca es tres veces más largo que el derecho, el movimiento del extremo izquierdo ($\alpha\alpha'$) es tres veces mayor que el movimiento del brazo derecho ($\beta\beta'$).

El principio de la palanca desempeña un papel importante en todos los caminos de la vida, desde el labrador que emplea una barra de hierro para mover un pesado peñasco, hasta la complicada maquinaria empleada en la ingeniería moderna. La ley de la palanca formulada por Arquímedes nos permite introducir el importante concepto mecánico de trabajo desarrollado por una fuerza actuante. Supongamos que tratamos de levantar una piedra pesada (fig. 3) usando una palanca de hierro con una relación entre sus brazos de $\alpha\gamma : \gamma\beta = 3 : 1$. Podemos, por presión sobre el extremo de la palanca, hacerlo con una fuerza tres veces menor que la fuerza de gravedad que actúa sobre la piedra. Es claro que cuando se eleva la piedra, por ejemplo, una pulgada, el extremo de la palanca desciende 3 pulgadas ($\beta\beta'$). Así, deducimos que el producto de la fuerza con la que presionamos sobre el extremo multiplicado por su desplazamiento hacia abajo es igual al peso de la piedra multiplicado por su desplazamiento hacia arriba. El producto de la fuerza por el desplazamiento del punto a que se aplica es el trabajo efectuado por la fuerza. Así, de acuerdo con la ley de la palanca de Arquímedes, el trabajo efectuado por la mano que empuja hacia abajo el extremo largo de la barra de hierro es igual al trabajo efectuado por su extremo corto al elevar la piedra. Esta tesis puede ser generalizada a todo género de trabajo mecánico; así, por ejemplo, el trabajo realizado por los mozos de mudanzas subiendo un gran piano tres pisos es igual al trabajo de subir tres grandes pianos tan sólo un piso.

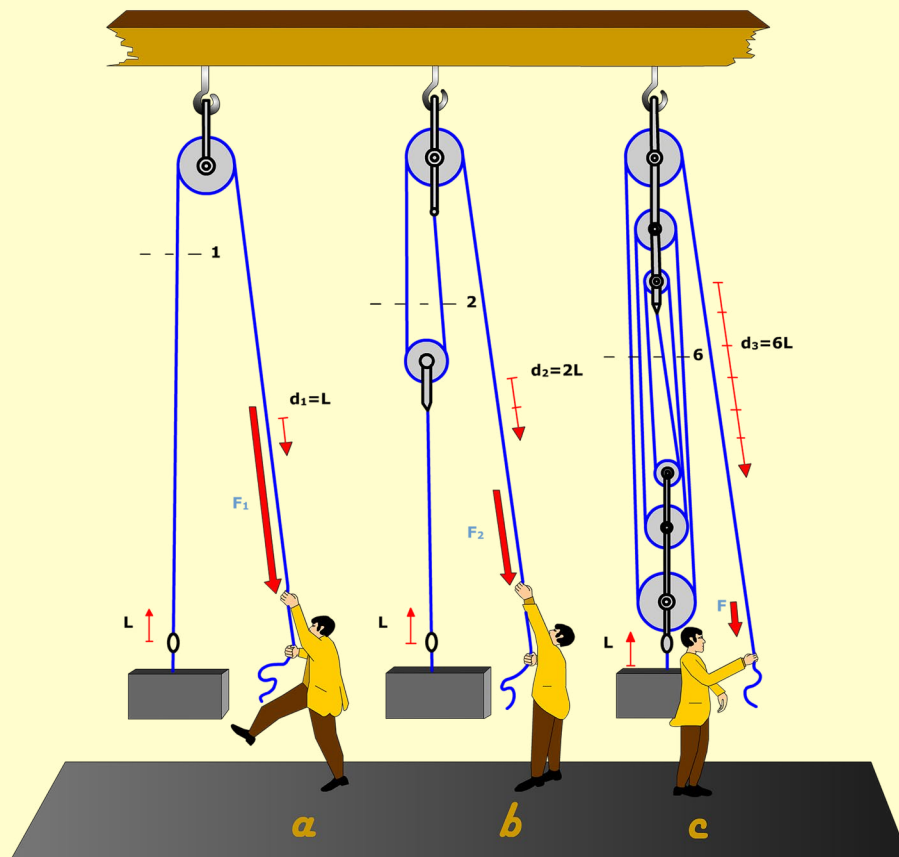


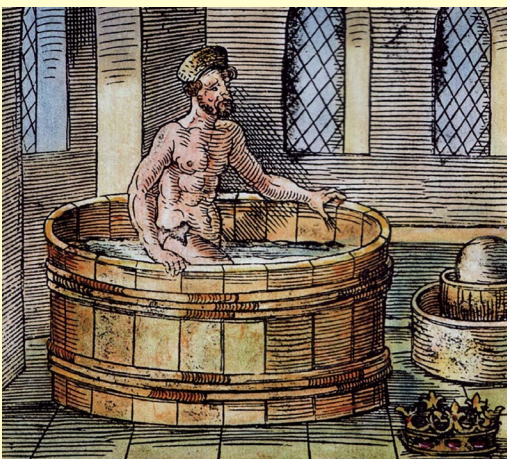
Figura 4. El principio de la polea.

El principio del trabajo igual, realizado por los dos brazos de palanca puede ser aplicado también a otro aparato análogo, la polea, empleado por Arquímedes para mover un pesado barco con gran sorpresa del rey Hierón. Si para elevar un gran peso, hacemos correr una cuerda atada a él a través de una rueda fija en una viga de madera (Figura 4a), el peso será elevado la distancia (l) igual a la longitud (d) de la cuerda cobrada, y la fuerza (F_1) aplicada al extremo será igual al peso. Pero si disponemos dos ruedas en la forma indicada en la Figura 4b, habremos cobrado dos veces la longitud de la cuerda y la fuerza que hemos de aplicar será tan solo la mitad del peso. En la disposición mostrada en la Figura 4c, la fuerza necesaria para elevar el peso será únicamente de un sexto mientras que el peso no será elevado más que un sexto de la longitud cobrada de la cuerda.

La ley de Arquímedes de los cuerpos flotantes

Probablemente el descubrimiento más conocido de Arquímedes es su ley sobre la pérdida de peso que sufren los cuerpos sumergidos en un líquido. La ocasión que le llevó a su descubrimiento ha sido descrita por Vitruvio con las siguientes palabras:

En el caso de Arquímedes, aunque hizo muchos maravillosos descubrimientos de todo género, sin embargo, de todos ellos, el siguiente que vamos a relatar parece haber sido el resultado de una ilimitada ingeniosidad. Hierón, después de conquistar el poder real en Siracusa, resolvió como consecuencia de su feliz proeza colocar en cierto templo una corona de oro que había prometido a los dioses inmortales. Contrató el trabajo a un precio fijo y pesó una exacta cantidad de oro que dio al contratista. Este, en la fecha acordada, entregó con satisfacción del rey una pieza de orfebrería exquisitamente terminada y se vio que el peso de la corona correspondía exactamente al del oro entregado. Pero más adelante se formuló la acusación de que se había sustraído oro y se había añadido un peso equivalente de plata en la manufactura de la corona. Hierón, ofendido por haber sido engañado, y no sabiendo cómo probar el robo, requirió a Arquímedes para que estudiara el asunto. Arquímedes, preocupado siempre por el caso, fue un día al baño y al meterse en la bañera observó que cuanto más se sumía su cuerpo tanta más agua rebosaba de la bañera. Como esto indicaba la manera de resolver el caso en cuestión, sin demorarse un momento y transportado de alegría, saltó fuera de la bañera y corrió por la casa desnudo, gritando a grandes voces que había encontrado lo que estaba buscando: mientras gritaba repetidamente en griego: *ieureka, eureka!*



Eureka de Arquímedes

Eureka, Enseñanza de las Ciencias Físicas, julio 2016

Arquímedes, consejero militar

Además de ser un gran matemático y el fundador de la ciencia de la mecánica, Arquímedes sirvió también, dicho en términos modernos, como "consejero para la industria y las fuerzas armadas". La más conocida de sus invenciones de ingeniería es el llamado "tornillo de Arquímedes" (Figura 5), empleado para elevar agua. Este aparato, cuyo funcionamiento se comprende por sí solo, ha sido empleado ampliamente en los regadíos y para extraer de las minas el agua subterránea.

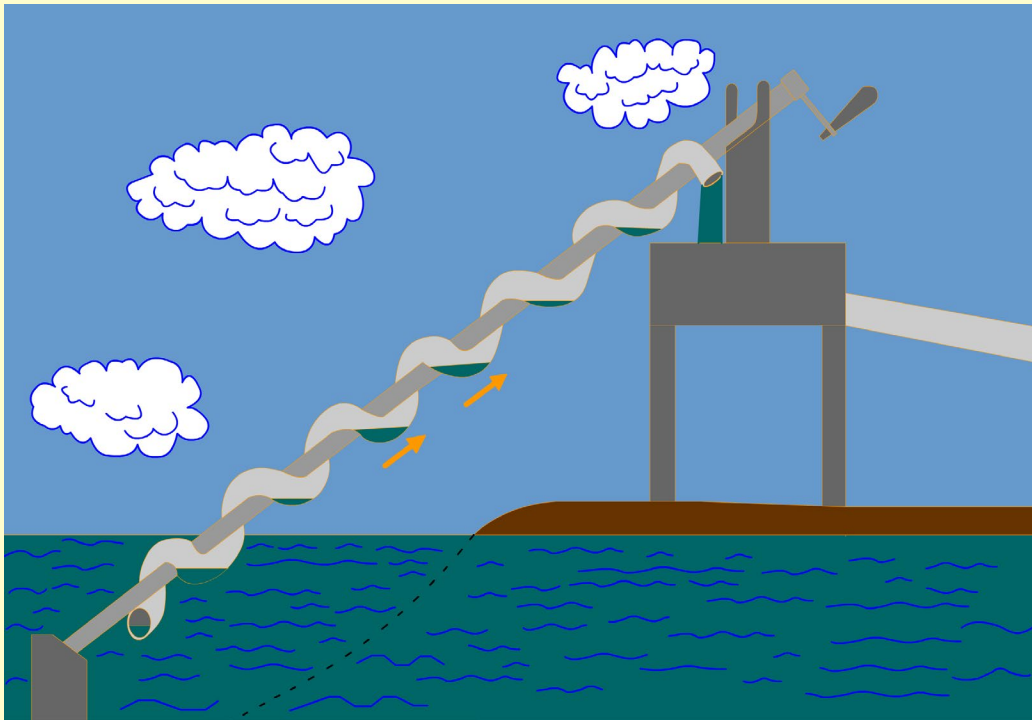


Figura 5. El tornillo de Arquímedes para elevar agua simplemente con hacerlo girar. Para comprender cómo trabaja, piénsese lo que ocurre en las partes bajas del tubo cuando gira y se verá que ascienden, no el tubo mismo, sino las posiciones del contenido "mínimo" de agua. Puede ayudar a la comprensión hacer una espiral con un alambre metálico y ver lo que ocurre cuando gira alrededor de su eje.

La escuela alejandrina

Herón escribió también un libro titulado *Catóptrica*, que contiene la teoría de los espejos y sus aplicaciones prácticas. Leemos en él:

La catóptrica es patentemente una ciencia digna de estudio y al mismo tiempo produce espectáculos que despiertan la admiración del observador. Porque con la ayuda de esta ciencia se construyen espejos que muestran el lado derecho al lado derecho y de modo análogo el lado izquierdo, mientras que los espejos corrientes tienen por su naturaleza la propiedad contraria y muestran los lados opuestos.

Otro gran alejandrino fue el astrónomo Claudio Ptolomeo (no confundirle con los miembros de la dinastía ptolemaica que reinó en Egipto muchos años antes de la era cristiana), que vivió y trabajó durante la primera mitad del siglo II después de Cristo. Las observaciones de Ptolomeo sobre las estrellas y planetas, reunidos en su libro conocido como el *Almagesto*, representan un importante añadido a los datos obtenidos por Hiparco dos siglos y medio antes. Su contribución

importante a la física está contenida en su libro *Óptica*, que nos ha llegado en una traducción latina de la última versión árabe del manuscrito griego original. En este libro, Ptolomeo discute entre otros casos la importante cuestión de la refracción de la luz al pasar de un medio a otro.

Explica el fenómeno de refracción por el sencillo experimento siguiente, mediante una moneda colocada en el fondo de una vasija llena de agua llamada un "baptistir" (Figura 6a).

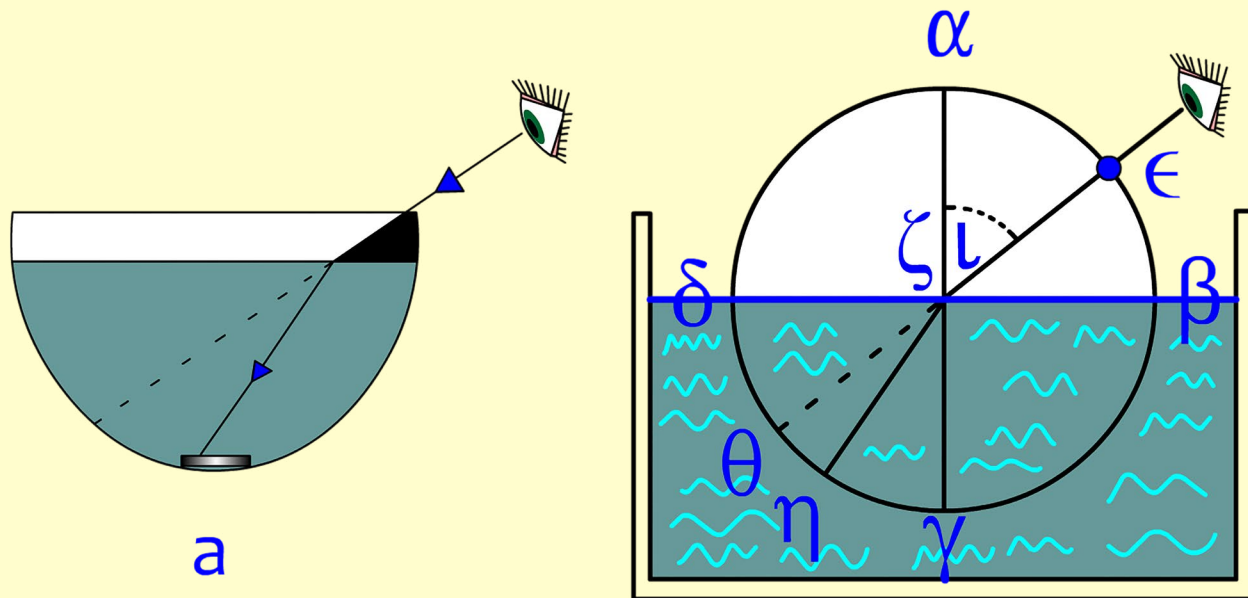
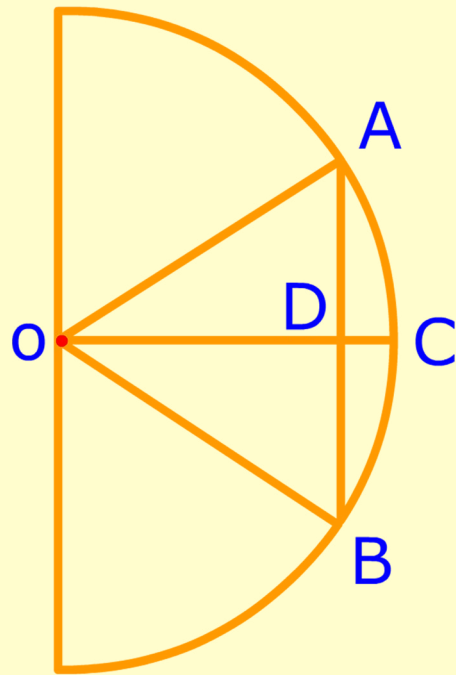


Figura 6. Experimentos de Ptolomeo sobre la refracción de la luz: a) La moneda en el fondo de una vasija llena de agua parece estar más alta que lo que está en realidad. b) El aparato para estudiar la refracción de la luz. Ptolomeo medía la relación entre el ángulo $\delta\zeta\eta$ en el agua y el ángulo $\alpha\zeta\epsilon$ en el aire y establecía la dependencia entre ellos.

Más tarde, en el texto, Ptolomeo describe un experimento encaminado a estudiar en detalle las leyes de la refracción de la luz. El grado de refracción que se produce en el agua y que puede ser observado se determina por un experimento como el que hemos realizado con la ayuda de un disco de cobre al examinar las leyes de los espejos. En este disco se traza un círculo $\alpha\beta\gamma\delta$ (fig. 6b) con el centro en σ y los diámetros $\alpha\sigma\gamma$ y $\delta\sigma\beta$ que se cortan en ángulo recto. Dividimos cada cuadrante en noventa partes iguales y colocamos sobre el centro una marca roja muy pequeña. Entonces, ponemos este disco vertical en una pequeña vasija y echamos en ella agua clara en cantidad moderada, de modo que la visión no quede obstruida. Pongamos la superficie del disco, quedando perpendicular a la superficie del agua, de modo que sea dividido por el agua en dos partes iguales quedando medio círculo — y sólo medio círculo, que es $\beta\gamma\delta$ — enteramente bajo el agua. Tracemos el diámetro $\alpha\sigma\gamma$ perpendicular a la superficie del agua.

Figura 7. La relación entre las tablas de las cuerdas de Plutarco y las modernas tablas trigonométricas. Plutarco establecía las longitudes de las cuerdas ADB para las diversas longitudes de los arcos ACB. En la trigonometría moderna se establece la relación de la longitud AD (media cuerda) respecto al arco AC. La longitud AD se llama seno y la longitud OD coseno de este ángulo.



2. Las edades oscuras y el Renacimiento

Al extinguirse la cultura griega quedó virtualmente detenido el desarrollo de la ciencia en general y de la física en particular. Los romanos, que dominaban el mundo durante este período de la historia humana, se cuidaban muy poco del pensamiento abstracto. Eran una "civilización de hombres de negocios" y aunque estimulaban el saber, se interesaban mucho más por las aplicaciones prácticas. Después de la caída del Imperio romano la situación fue de mal en peor, y los Estados feudales que se formaron sobre sus ruinas no representaban ciertamente un suelo fértil para ningún género de desarrollo científico.

Uno de los factores importantes en la difusión de los conocimientos fue la invención de la imprenta, a mediados del siglo XV en el taller de un hombre llamado Fust, en Mainz, Alemania, y uno de los libros más importantes que salieron de estas primeras prensas fue, sin duda, *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Nuremberg, año 1543) de Nicolás Copérnico en el cual estableció un nuevo sistema del mundo con el Sol en su centro. Pero, para evitar su prohibición por la Iglesia, pareció necesario añadir a este libro un prefacio (escrito probablemente sin conocimiento de Copérnico por su editor Andreas Osiander) donde declaraba que todas las ideas expresadas en él eran de carácter puramente hipotético y representaban más bien un ejercicio matemático que una descripción de las cosas reales.

Las secciones que componen este capítulo son: Elocuencia y leyes de Kepler; La cadena de Stevinus; El péndulo; Las leyes de la caída; Galileo, el astrónomo;

Elocuencia y leyes de Kepler

La mezcla de teología y verdadera ciencia, durante esta época se ilustra de la mejor manera en *Mysterium Cosmographicum* (1596) de Johannes Kepler, descubridor de las leyes fundamentales de los movimientos planetarios.

El sistema copernicano, tal como aparece en *Revolutionibus*, suponía que las órbitas planetarias eran círculos, de acuerdo con la vieja tradición de la filosofía griega que consideraba el círculo como una curva perfecta y la esfera como un cuerpo perfecto. Pero esta hipótesis no se adaptaba a las medidas minuciosas de los movimientos planetarios realizadas por un astrónomo danés, Tycho Brahe, en su observatorio particular, sito en una pequeña isla no lejos de Copenhague. Como discípulo y ayudante de Tycho y en posesión de considerables conocimientos matemáticos adquiridos por la lectura de Euclides y otras obras clásicas griegas, Kepler se impuso la tarea de encontrar cuál es la forma exacta de las órbitas planetarias y cuáles son las leyes que gobiernan sus movimientos.

Analizando los datos de Tycho Brahe relativos a las posiciones de los planetas entre las estrellas, Kepler llegó a la conclusión de que todas las cosas se ajustarían mejor si se supusiera que todos los planetas recorren órbitas elípticas teniendo al Sol situado en uno de sus focos. Descubrió también que en su movimiento alrededor del Sol los planetas se mueven más rápidamente cuando están cerca del Sol (en el perihelio) y más lentamente cuando están más lejos (afelio). La correlación entre las velocidades de un planeta y sus distancias al Sol en las diferentes partes de

su órbita es tal que la línea imaginaria que une el Sol y el planeta recorre iguales superficies de la órbita planetaria en intervalos iguales de tiempo (Figura 8a). Estas dos leyes fundamentales del movimiento planetario fueron anunciadas por Kepler en 1609 y ahora se conocen como las leyes primera y segunda de Kepler. Después de hallar las leyes del movimiento de cada planeta, Kepler comenzó a buscar la correlación entre los diferentes planetas y en esta labor empleó nueve años. Ensayó todas las clases de posibilidades tal, por ejemplo, como la correlación entre las órbitas planetarias y los poliedros regulares de la geometría del espacio, pero nada le pareció adecuado. Finalmente, vino un brillante descubrimiento que hoy se conoce como la tercera ley de Kepler, que dice: los cuadrados de los períodos de revolución de los diferentes planetas en torno al Sol están en la misma razón que los cubos de sus distancias medias al Sol. En la Figura 8b damos un esquema de las órbitas de los planetas llamados interiores — Mercurio, Venus, Tierra y Marte — con sus distancias expresadas en términos de los radios de la órbita terrestre (la llamada Unidad Astronómica) y los períodos de su revolución en años.

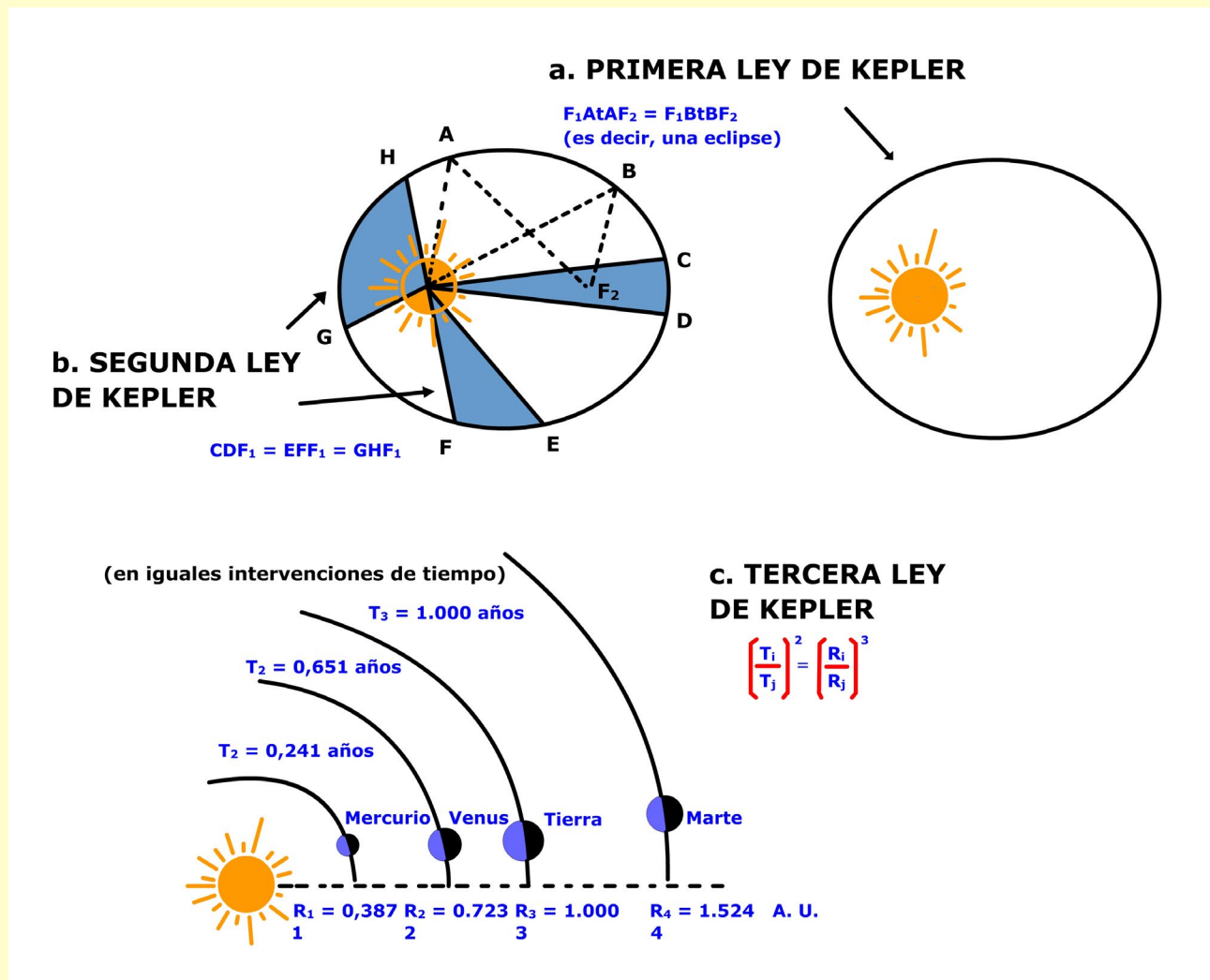


Figura 8. Las tres leyes de Kepler del movimiento planetario.

El péndulo

Mientras Stevinus hizo considerables progresos en sus estudios de Estática, el honor de haber dado los primeros pasos en la ciencia de la Dinámica, esto es, el estudio del movimiento de los cuerpos materiales, pertenece al hijo de un noble florentino empobrecido llamado Vincenzo Galilei. Aunque el Signor Vincenzo estaba muy interesado por las matemáticas, proyectó para su hijo menor, Galileo, la carrera de medicina como una profesión más provechosa. Así fue como en 1581, a la edad de 17 años, Galileo comenzó los estudios de medicina en la Universidad de Pisa. Pero evidentemente no veía en la disección de los cuerpos muertos una ocupación realmente excitante y su espíritu inquieto se preocupó por otra clase de problemas. Un día que oía misa en la catedral de Pisa, se quedó abstraído observando una lámpara que se había puesto en movimiento por el sirviente que había encendido las velas. Las sucesivas oscilaciones iban siendo cada vez más cortas conforme la lámpara iba llegando lentamente al reposo. "¿Es que el tiempo de cada oscilación va siendo también más corto?", se preguntó Galileo. Como no tenía reloj —no había sido inventado todavía— Galileo decidió medir el tiempo de las sucesivas oscilaciones por medio de su propio pulso. Y probablemente con gran sorpresa descubrió que, aunque las oscilaciones eran cada vez más cortas, el tiempo de su duración era exactamente el mismo. Al volver a su casa repitió el experimento con una piedra atada al final de una cuerda y encontró el mismo resultado. Asimismo descubrió que, para una longitud dada de la cuerda, el período de oscilación era el mismo, usase una piedra pesada o una piedra ligera en el experimento. De este modo, el aparato familiar conocido como un péndulo vino a la existencia. Teniendo todavía un pie en la profesión médica, Galileo invirtió el procedimiento de su descubrimiento y sugirió el uso de un péndulo de una longitud dada para medir los latidos del pulso de los pacientes. Este aparato, conocido por el "pulsómetro", se hizo muy popular en la medicina contemporánea y fue el precursor de la moderna enfermera, vestida de blanco, que sostiene la mano del paciente, mirando a su elegante reloj de pulsera. Pero esta fue la última colaboración de Galileo a la ciencia médica, porque el estudio del péndulo y otros aparatos cambiaron por completo la orientación de su interés.



La lámpara de Galileo en la catedral de Pisa.

Las leyes de la caída

Cuando se suelta una piedra esta cae cada vez más rápidamente y Galileo quería conocer las leyes matemáticas que rigen este movimiento acelerado. Pero la libre caída de los cuerpos se realiza demasiado rápidamente para estudiarla en detalle sin el empleo de aparatos modernos, tales, por ejemplo, como la fotografía instantánea. Por esta razón, Galileo decidió "diluir la fuerza de gravedad" haciendo que la esfera rodase por un plano inclinado. Cuanto más inclinado el plano, más rápidamente rueda la esfera y en el caso límite de un plano vertical la esfera cae libremente a lo largo del plano. La dificultad principal para realizar el experimento era la medida del tiempo empleado por la esfera para recorrer distancias diferentes.

De la dependencia observada de la distancia recorrida al tiempo, Galileo dedujo que la velocidad de este movimiento debe aumentar en proporción simple al tiempo. Veamos la prueba de esta afirmación con las propias palabras de Galileo. En el movimiento acelerado, el aumento (de velocidad), siendo continuo, usted puede dividir los grados de velocidad ("valores de velocidad" en el moderno lenguaje), que aumentan continuamente en una cantidad determinada, a causa de que cambiando a cada momento son infinitos. Por tanto, podremos ejemplificar mejor nuestro propósito trazando un triángulo ABC (Figura 10).

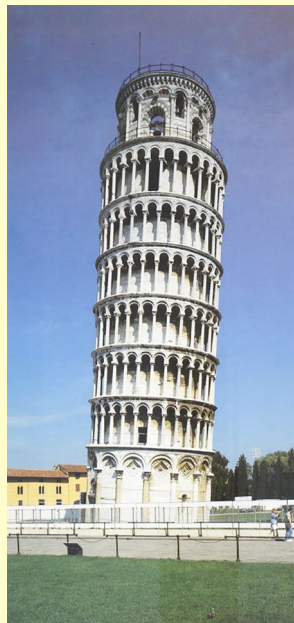
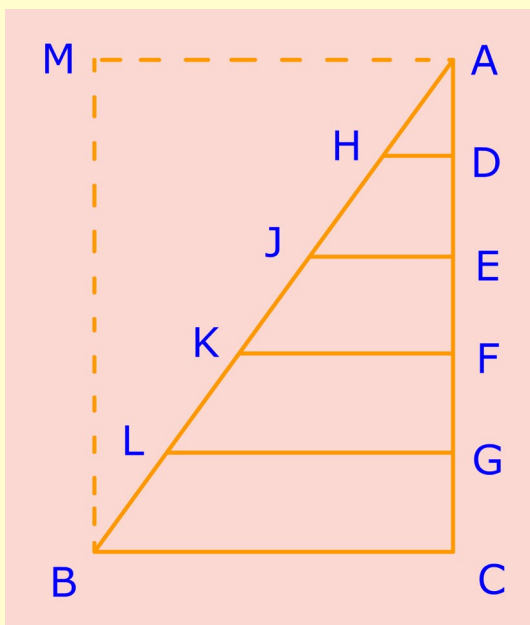
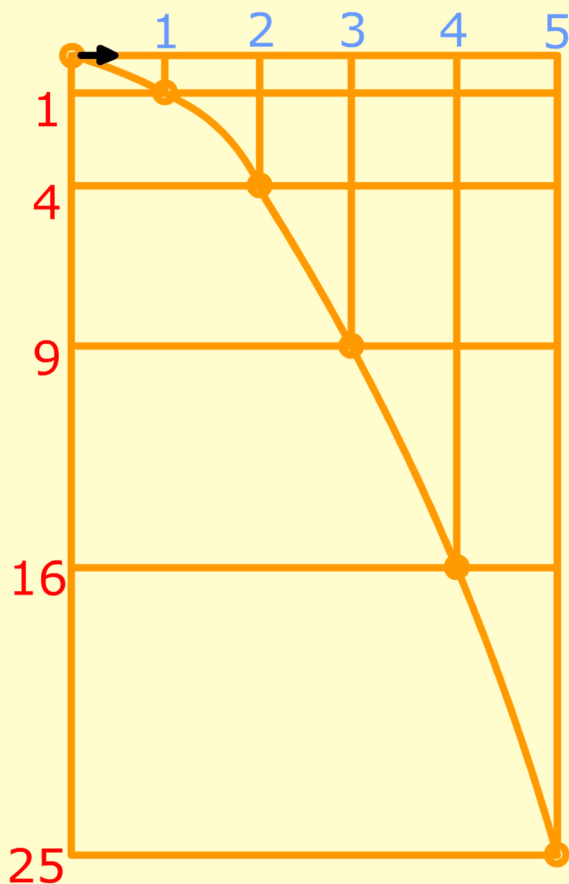


Fig. 2-4. El experimento de Galileo.

Figura 10. La prueba de Galileo de que en un movimiento (uniformemente) acelerado partiendo del reposo, la distancia recorrida por un móvil es la mitad de la distancia que el móvil habría recorrido si estuviera moviéndose todo el tiempo con la misma velocidad.

Debemos recordar que este enmarañado y engorroso lenguaje fue escrito en 1632 y traducido al inglés (por Thomas Salisbury) en 1661! Aparte de ser la primera formulación de la ley de la caída libre, el transcrito pasaje del *Discorso* contiene también el primer paso en el desarrollo del llamado "cálculo integral" en el cual los resultados son obtenidos añadiendo números infinitamente grandes de cantidades infinitamente pequeñas. La ley de Galileo del movimiento uniformemente acelerado puede ser escrita de este modo en las actuales notaciones matemáticas:



Velocidad = aceleración x tiempo

$$\text{Distancia} = \frac{1}{2} \text{ aceleración} \times \text{tiempo}^2$$

Para la caída libre, la aceleración, generalmente designada por la letra g (para gravedad), es igual a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Figura 11. Composición de un movimiento uniforme en dirección horizontal y un movimiento acelerado en dirección vertical. La curva resultante es una parábola.

Una interesante aplicación del mismo principio es el problema de dos muchachos que juegan a la guerra de la selva (Figura 12). Un muchacho está en la rama de un árbol mientras el otro le dispara con una cerbatana. Supongamos que este último apunta directamente a su compañero que está en el árbol y que en el momento en que dispara, el último se suelta de la rama y comienza a caer al suelo. ¿Le valdrá la caída al suelo de algo? La respuesta es "no", y este es el porqué: Si no hubiera gravedad, el proyectil seguiría la línea recta ABC al punto donde el muchacho estaba primero. Pero a causa de la gravedad el proyectil comienza a caer en el momento en que sale del cañón y tenemos un doble movimiento: un movimiento uniforme a lo largo de la línea recta ABC al punto donde estaba el muchacho al principio, y un movimiento acelerado en la dirección vertical. Como todos los objetos materiales caen con la misma aceleración, el movimiento vertical del proyectil y el del muchacho son idénticos.



Figura 12. Como todos los cuerpos caen con la misma aceleración, si un niño que juega con otro a la guerra de la selva dispara un proyectil directamente al "enemigo", situado en la rama de un árbol, la bala dará exactamente en la nariz de este último, si se deja caer en el momento del disparo.

3. Dios dijo: "Que Newton sea"

Este capítulo contiene las siguientes secciones: Progresos durante la peste; Los "Principia" de Newton; Definiciones; Estática y dinámica de los fluidos; Óptica; Sobre la propagación de la luz; El triunfo de la teoría ondulatoria de la luz; Un cristal de Islandia; El eclipse de Newton.

Después de formular su objetivo, Newton procedió a desarrollar el tratamiento matemático de los fenómenos mecánicos en forma tan clara y precisa que pueden ser empleados sin alteración en cualquier libro moderno de mecánica clásica. Reproducimos los pasajes iniciales de los Principia de Newton sin más que algunas explicaciones (entre paréntesis) para aclarar la significación moderna de la terminología científica del siglo XVII.

Después de definir las nociones de masa, momento, inercia y fuerza, Newton procede a la formulación de las leyes básicas del movimiento:

Ley I. *Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta a menos que sea forzado a cambiar ese estado por fuerzas que actúan sobre él.*

Ley II. *El cambio de movimiento (es decir, de momento mecánico) es proporcional a la fuerza motriz que se le ha impreso, y sigue la dirección de la línea recta en que se le imprimió la fuerza.*

Ley III. *A toda acción se opone siempre una reacción igual; o las acciones recíprocas de dos cuerpos uno sobre otro son siempre iguales y dirigidas a partes opuestas.*

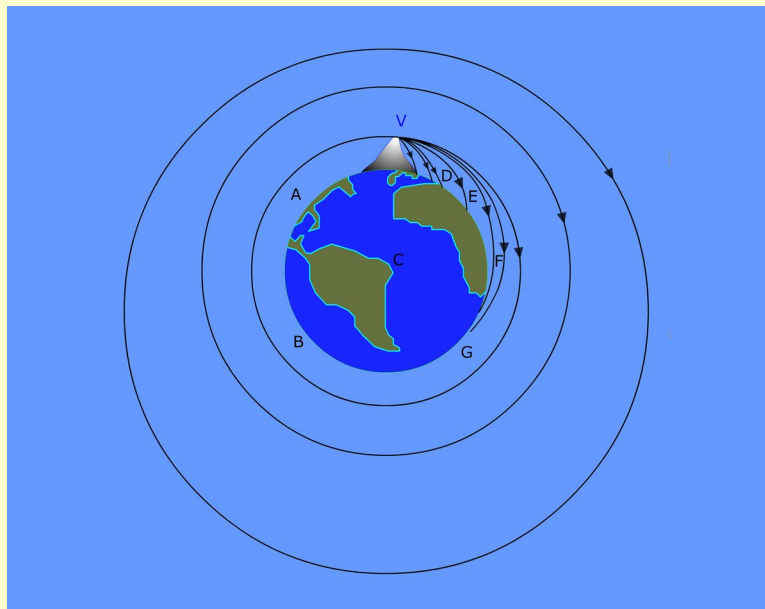


Figura 13. La trayectoria del satélite de la Tierra como caso límite de las trayectorias de proyectiles que caen cada vez a más distancia de la base de la montaña de la cual fueron arrojados. (Adaptación del dibujo original inserto en los Principia de Newton.)

Para establecer la dependencia de la fuerza de la gravedad de la distancia al centro de la Tierra, Newton decidió comparar la caída de una piedra (o una manzana) sobre la superficie terrestre con el movimiento de la Luna que puede ser considerado como una caída sin fin, según el razonamiento antes expuesto. De este modo, Newton pudo comparar la fuerza "astronómica" que actúa sobre la Luna con la fuerza "terrestre" que actúa sobre los objetos que manejamos en la vida cotidiana.

Su razonamiento, en forma algo modificada, se representa en la Figura 14, que muestra a la Luna, M, girando alrededor de la Tierra, E, por una órbita casi circular. En la posición M, la Luna lleva una velocidad que es perpendicular al radio del círculo. Si no hubiera fuerzas, la Luna seguiría una línea recta y, en una unidad de tiempo más tarde, se movería a la posición M'. Como, no obstante, llega a la posición de M'', el trayecto MM'' debe ser considerado como la distancia recorrida por la Luna durante una unidad de tiempo en su caída libre hacia la Tierra.

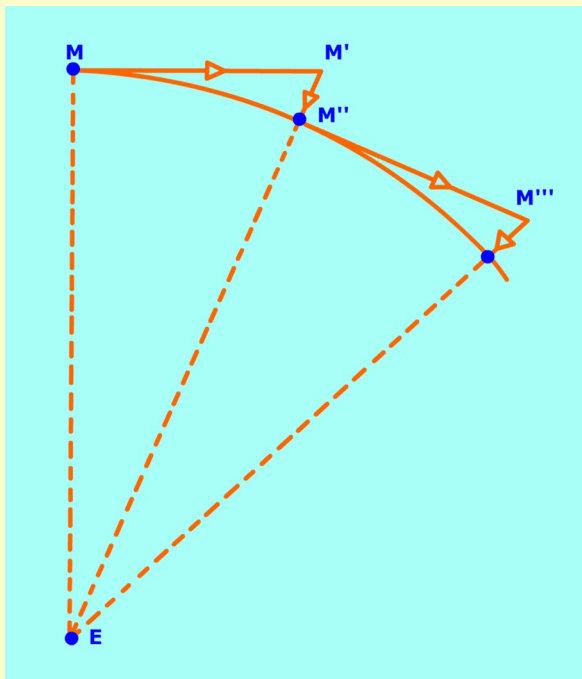


Figura 14. Considerando el movimiento circular de la Luna en torno de la Tierra como una caída continua (véase figura 13), Newton pudo calcular la aceleración producida por la fuerza de la gravedad actuando sobre la Luna. El diagrama muestra cómo.

Generalizando este descubrimiento a todos los cuerpos materiales del universo, Newton formuló la ley universal de gravedad según la cual:

Todo cuerpo material atrae a otro con una fuerza directamente proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.

Mediante la aplicación de esta ley al movimiento de los planetas en torno al Sol, derivó matemáticamente las tres leyes de Kepler expuestas en el capítulo anterior.

El desarrollo de la obra de Newton realizada por los grandes matemáticos de los siglos XVIII y XIX originó una gran rama de la astronomía conocida como "mecánica celeste", que nos permite calcular con gran precisión el movimiento de los planetas del sistema solar bajo la acción de la mutua atracción Gravitatoria. Uno de los mayores triunfos de la mecánica celeste se registró en

1846 con el descubrimiento de un nuevo planeta, Neptuno, cuya existencia y órbita fueron predichas independientemente por el astrónomo francés U. J. J. Leverrier y el astrónomo inglés J. C. Adams sobre la base de las perturbaciones del movimiento de Urano producidas por la atracción gravitatoria del planeta entonces desconocido. Un acontecimiento análogo ocurrió en 1930 cuando un planeta trans-neptuniano, llamado después Plutón, fue descubierto como resultado de cálculos teóricos.

Mediante la aplicación de su ley de gravedad al movimiento del globo terráqueo, Newton dio la primera explicación del fenómeno de la "precesión de los equinoccios" conocida desde los tiempos de Plutarco. Demostró que, como el eje de rotación de la Tierra está inclinado respecto al plano de su órbita (eclíptica), la fuerza de gravedad del Sol, al actuar sobre el abultamiento ecuatorial del globo, debe producir una lenta rotación del eje de la Tierra en torno a una línea vertical a la eclíptica en un período de unos 26 000 años. Esta explicación encontró fuerte oposición entre los astrónomos contemporáneos porque en aquel tiempo se creía, sobre la base de mediciones erróneas, que nuestra Tierra no tiene la forma de una calabaza, más ancha por el ecuador, sino más bien la de un melón, con la distancia entre los polos mayor que el diámetro ecuatorial.

4. El calor como energía

Los primeros estudios del fenómeno del calor fueron realizados por el hombre prehistórico de las cavernas que descubrió cómo hacer fuego para estar caliente durante los períodos en que el Sol no le proporcionaba calor suficiente. Su íntima colaboradora, la mujer prehistórica de las cavernas, hizo un importante descubrimiento más: las diferentes sustancias alimenticias mantenidas durante cierto tiempo sobre la llama o en agua hirviendo sabían mucho mejor y eran más digeribles. Las nociones de "caliente" y "frio" son innatas en el hombre lo mismo que en todos los demás seres vivientes, y la temperatura del ambiente se registra y señala en el cerebro por millones de nervios que terminan en la superficie de la piel. Pero la respuesta fisiológica a la temperatura se engaña a menudo y un hombre con los ojos vendados no puede decir si su mano ha sido quemada por un hierro al rojo o congelada por un trozo de hielo seco. En ambos casos, las sensaciones son idénticas a causa de que ambas son la respuesta fisiológica al daño sufrido por los tejidos.

En este capítulo se analizan temas como: Termómetros; Leyes de los gases; Termómetro de gas y temperatura absoluta; El flujo de calor; El calor es movimiento; Equivalente mecánico del calor; Termodinámica; Pájaros bebedores; Máquinas de movimiento perpetuo de primera y segunda especie; Argumentación termodinámica; Teoría cinética del calor; El demonio de Maxwell; Movimiento térmico microscópico; Movimiento térmico y la propagación del sonido; Emisión de radiación por cuerpos calientes (que está representado por las curvas de cuerpo negro de la figura 22); Emisión de luz por los gases calientes; Absorción de la luz.

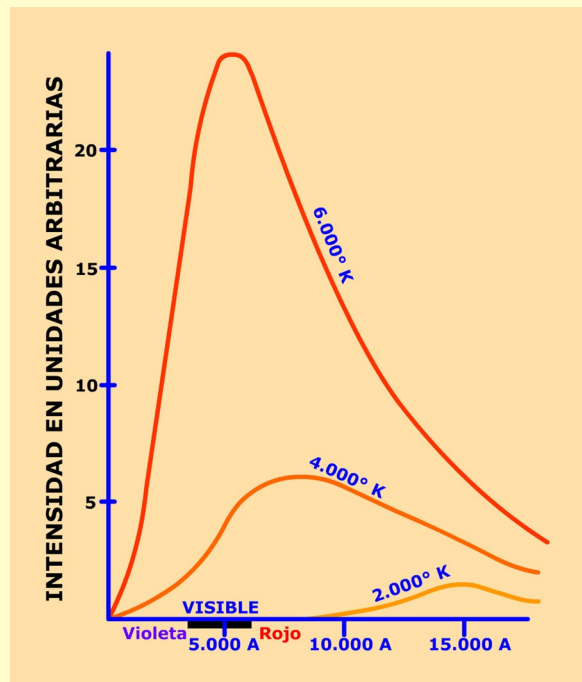


Figura 22. Distribución de la energía en un espectro continuo emitido por cuerpos con tres temperaturas diferentes.

5. La edad de la electricidad

Como queda dicho en el primer capítulo, los fenómenos de la electricidad y el magnetismo fueron conocidos por los antiguos griegos y probablemente por todo el resto del mundo antiguo. Sin embargo, los primeros estudios sistemáticos no fueron emprendidos hasta el comienzo del Renacimiento de las ciencias y las artes. Sir William Gilbert, médico personal de la reina Isabel I de Inglaterra, llevó a cabo cuidadosos estudios de las interacciones magnéticas y publicó sus resultados en un libro, *De Magnete*, que contiene una descripción de todas las esenciales propiedades cualitativas de los imanes. Gilbert fue un partidario entusiasta del sistema copernicano del mundo y esperaba que las fuerzas que mantienen a los planetas en su movimiento orbital en torno al Sol pudieran ser explicadas como el resultado de la atracción magnética.

[De unos experimentos] Gilbert concluyó que nuestro globo puede ser considerado como un imán, o magneto gigantesco con sus polos situados cerca de los polos norte y sur geográficos. Este concepto sobrevivió a través de los siglos, y después de haber sido desarrollado matemáticamente por el gran matemático alemán Karl Friedrich Gauss es hoy un concepto fundamental en la teoría del magnetismo terrestre.

El electroscopio, es decir, un instrumento que revela la presencia de una carga eléctrica, fue construido por primera vez en 1705 por Haukesbee y consistía en dos pajas suspendidas cara a cara en el extremo inferior de una varilla metálica. Cuando la varilla se cargaba con electricidad resinosa o con electricidad vítrea, ambas pajas se cargaban con la misma clase de electricidad y se separaban una de otra. Todavía empleamos este aparato salvo que las pajas están sustituidas por ligeros panes de oro. La botella de Leyden, construida en 1745 por un grupo de científicos de la Universidad de Leyden (Holanda), estaba destinada a acumular grandes cantidades de electricidad.

Al mismo período pertenecen los trabajos del gran estadista y escritor americano Benjamin Franklin que comenzó a interesarse por la física a la edad madura de cuarenta años.

Durante la segunda mitad del siglo XVII, los físicos se dedicaron en muchos países a estudios cuantitativos de las fuerzas electromagnéticas. Uno de sus descubrimientos más importantes en esta línea fue el realizado por el francés Charles Augustin de Coulomb, que desarrolló la llamada "balanza de torsión" para medir fuerzas muy débiles.

Hacia la misma época vivía en Inglaterra un personaje realmente solitario, llamado Henry Cavendish, hijo de un lord. [...] Estas notas [de Cavendish] quedaron en manos de sus parientes durante mucho tiempo, pero cuando fueron publicadas cien años después, se vio que Henry Cavendish era uno de los científicos experimentales más grandes que han existido. Descubrió todas las leyes de las interacciones eléctricas y magnéticas al mismo tiempo que Coulomb y sus trabajos en química desafían a los de Lavoisier. Además aplicó una balanza para el estudio de las fuerzas gravitatorias sumamente débiles entre los pequeños objetos y, sobre la base de estos experimentos, llegó a fijar el valor exacto de la masa de la Tierra.

En este capítulo se hace una revisión histórica de los descubrimientos de los conceptos, leyes y teorías del electromagnetismo y sus aplicaciones, tratándose temas como: Primeros descubrimientos; La ley de las fuerzas eléctricas y magnéticas (en la figura 23 se representa el gráfico de la fuerza eléctrica en función de la distancia a la carga, ley de Coulomb); Una descarga de una anguila eléctrica; Electromagnetismo; Las leyes del circuito eléctrico; Descubrimientos de Faraday (que en la figura 24 se ilustran sus leyes de la electrolisis); Campo electromagnético.

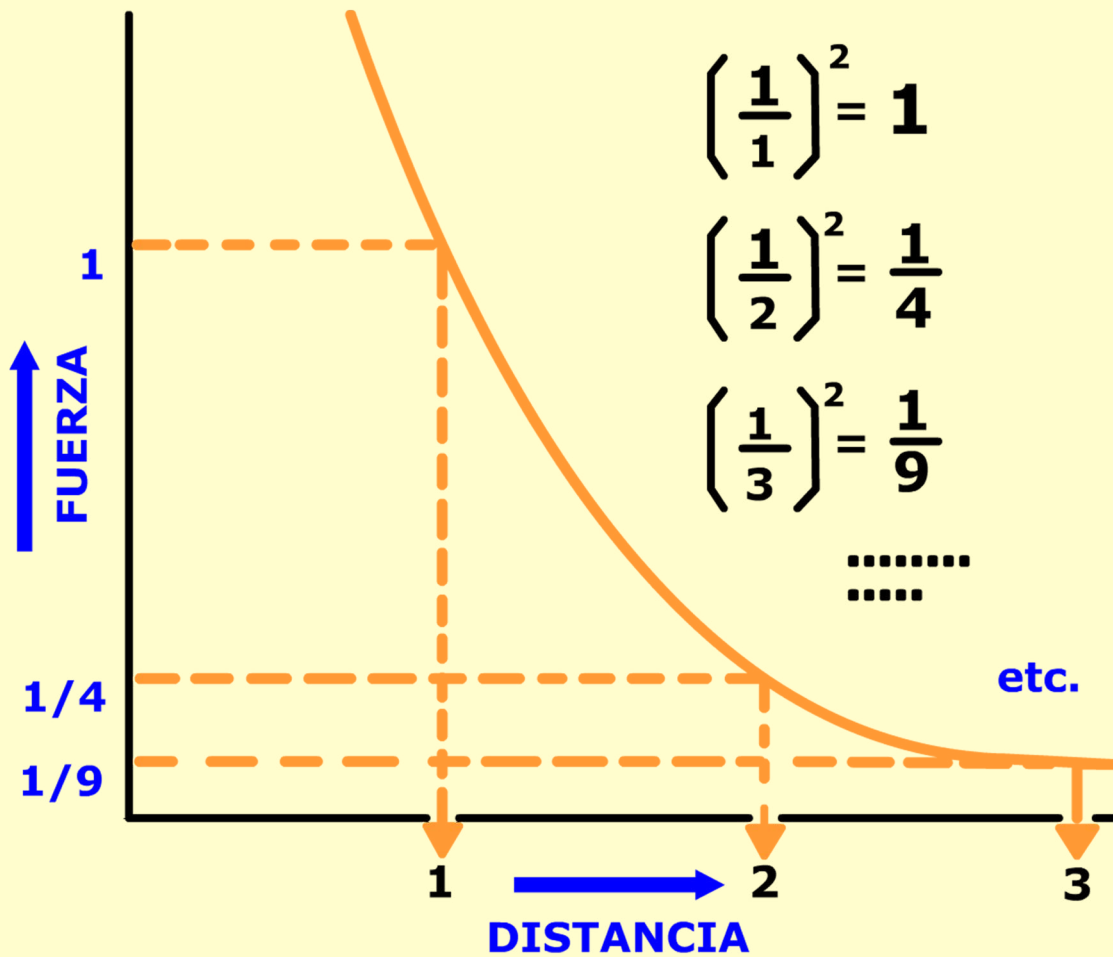


Figura 23. Un gráfico de la ley de Coulomb.

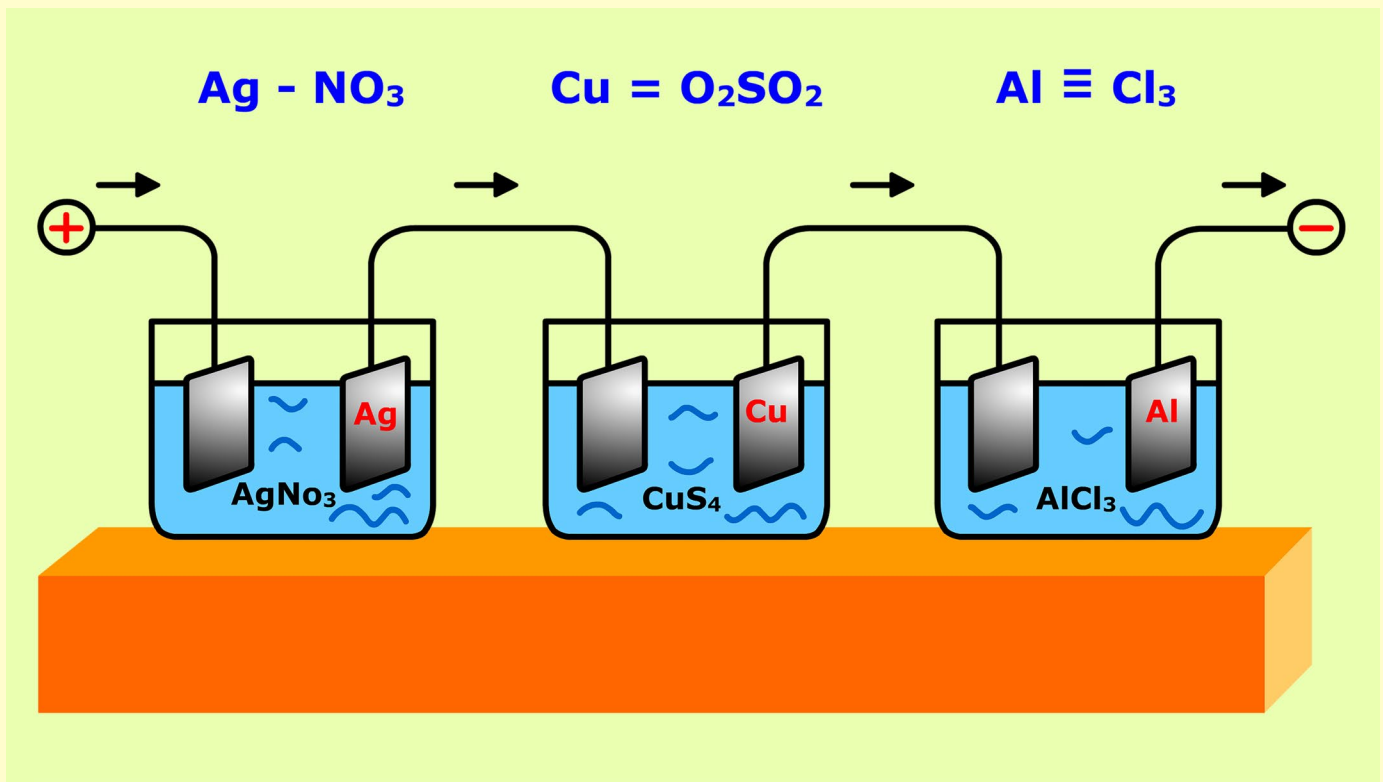


Figura 24. Demostración de las leyes de la electrólisis de Faraday. Si se hace pasar una corriente eléctrica a través de soluciones de nitrato de plata, sulfato de cobre y cloruro de aluminio, los metales se depositan en los electrodos negativos. La cantidad de metales depositados es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de las soluciones (primera ley de Faraday). También se ha visto que si la cantidad de plata depositada es de 108 gramos (peso atómico de la plata), la cantidad de cobre depositado es sólo de 31,7 gramos (la mitad del peso atómico del cobre) y la cantidad de aluminio depositado es sólo de q gramos (un tercio del peso atómico del aluminio). Como la misma cantidad de electricidad pasa a través de los tres vasos, se deduce que el ión de cobre transporta el doble de la carga eléctrica transportada por el átomo de plata, y el ión de aluminio transporta tres veces más. Esto coincide con la equivalencia química de los tres metales, como se ve en las fórmulas que figuran en la parte superior del diagrama. Esta es la segunda ley de Faraday.

6. La revolución relativista

Como queda dicho en el capítulo anterior, la idea de un medio universal que lo penetra todo y llena el espacio entre y dentro de todos los cuerpos materiales fue establecida firmemente en la ciencia física a fines del siglo XIX. Bajo el nombre de "éter cósmico" de Huygens, este medio servía de vehículo para la propagación de las ondas luminosas; bajo el nombre de tubos de Faraday era responsable de las fuerzas entre los cuerpos cargados de electricidad y magnetizados. Los trabajos de Maxwell llevaron a una síntesis entre estos medios hipotéticos mostrando que la luz era una onda electromagnética que se propaga y suministrando una elegante teoría matemática que enlazaba todos los fenómenos de la luz, la electricidad y el magnetismo. Pero, a pesar de todos estos éxitos, fue imposible para los físicos describir las propiedades de este misterioso medio universal en los términos usados para la descripción de medios materiales conocidos, tales como gases, sólidos y líquidos, y todos los intentos en esta dirección llevaron a violentas contradicciones.

En este capítulo se revisan los siguientes temas: La crisis de la Física clásica; La velocidad de la luz (en donde se ilustran sus mediciones en la figura 25, su cambio de velocidad cuando se propaga en un medio en movimiento, figura 26); Velocidad de la luz en un medio en movimiento; La velocidad de la luz en la Tierra en movimiento (en que se analiza el experimento de Michelson-Morley, figura 27); El cuento de la botella arrojada al agua; Un fragmento biográfico de Einstein; Relatividad del movimiento; La unión de espacio y tiempo (en donde se analiza la sincronización de relojes en dos trenes que se mueven uno respecto al otro, figura 29); Mecánica relativista; La equivalencia masa-energía; El mundo de cuatro dimensiones en que se representa el continuo espacio-tiempo conteniendo dos coordenadas del espacio, x e y , y la coordenada de tiempo, ict , figura 30); Teoría relativista de la gravitación; La gravitación y la curvatura del espacio (en donde se plantean tres concepciones del espacio en la figura 31, o se realizan estudios geométricos sobre una plataforma giratoria en la figura 33, y se ilustra la línea cósmica de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol, figura 34); La teoría del campo unificado.

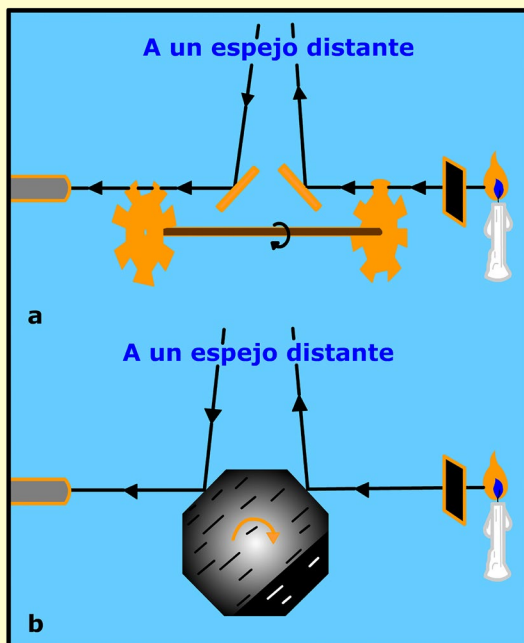


Figura 25. Métodos de Fizeau (a) y Foucault (b) para la medida de la velocidad de la luz.

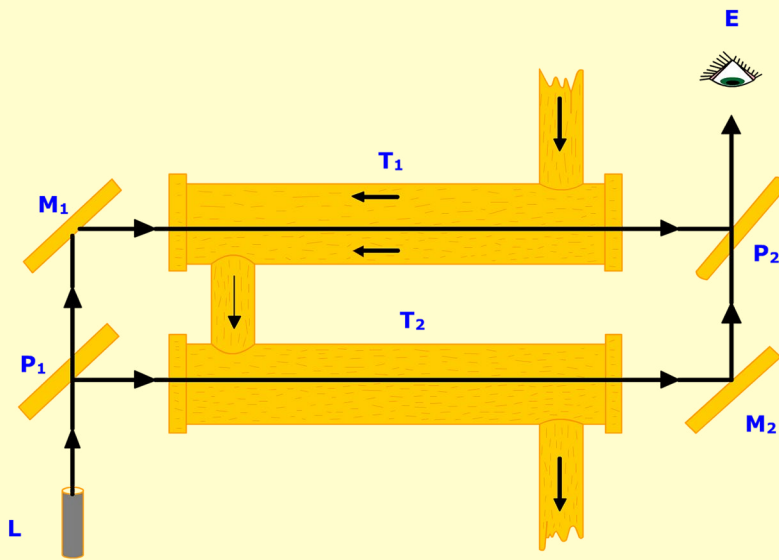


Figura 26. Experimento de Fizeau para observar el cambio de la velocidad de la luz cuando se propaga en un medio en movimiento.

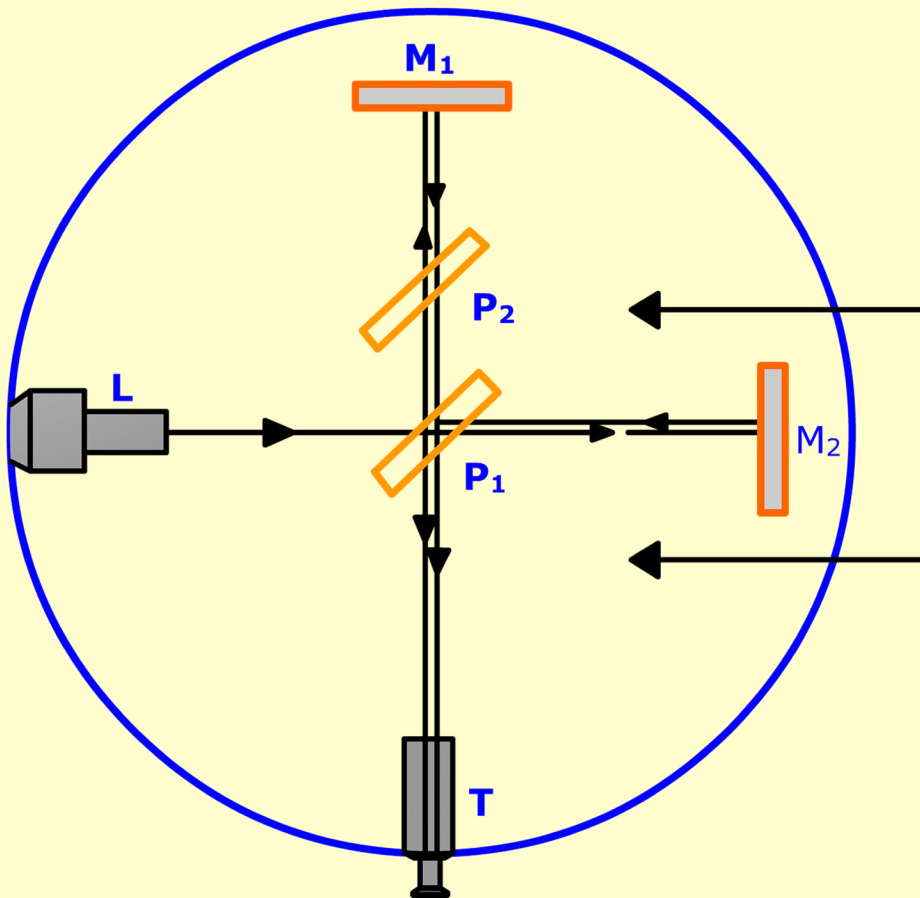


Figura 27. Aparato de Michelson-Morley mostrando las trayectorias de los rayos de luz. Los rayos que inciden y son reflejados por los espejos M1 y M2 se representan algo alejados uno de otro por conveniencias del dibujo. La lámina P2 ha sido introducida para compensar la trayectoria adicional en la lámina P1 del rayo dirigido a M2.

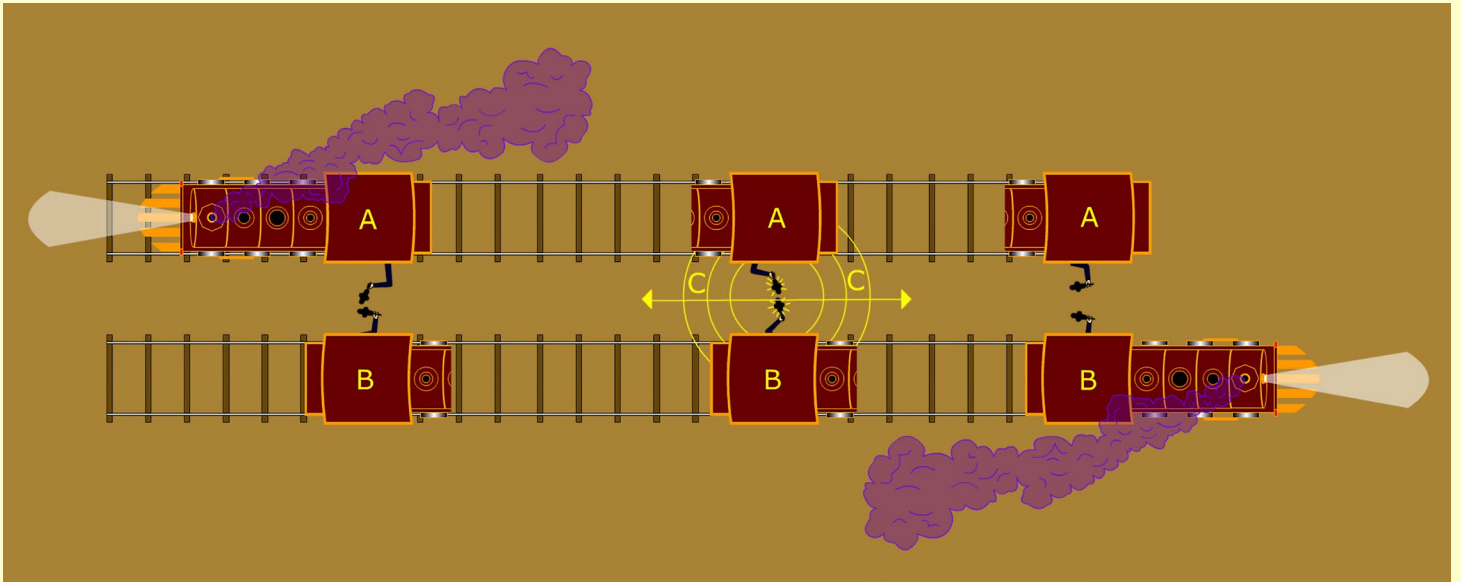


Figura 29. Sincronización de relojes en dos trenes que se mueven uno respecto al otro.

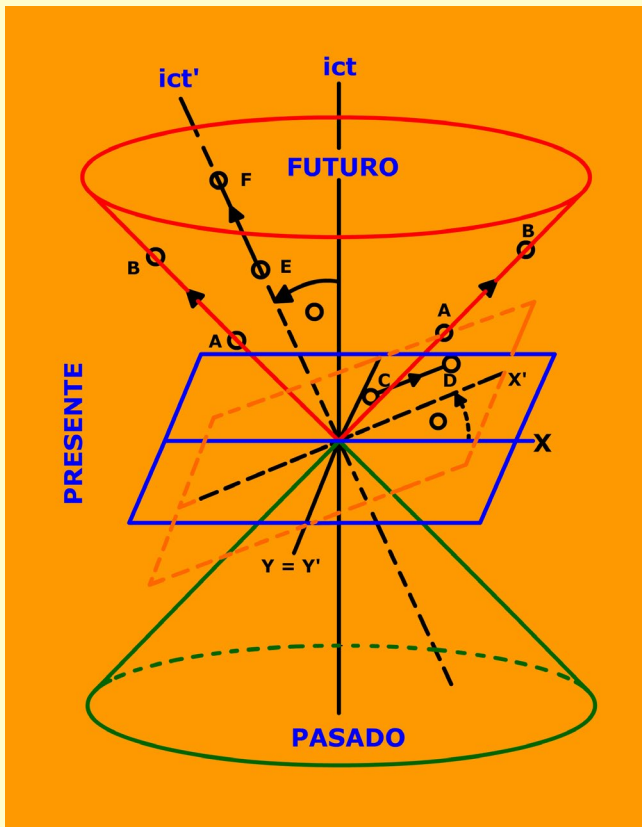


Figura 30. El continuo espacio-tiempo conteniendo dos coordenadas de espacio (x e y) y la coordenada de tiempo (ict). Las superficies cónicas que representan la propagación de la luz ($x^2 + y^2 - c^2t^2 = 0$) dividen el continuo en "presente", "pasado" y "futuro".

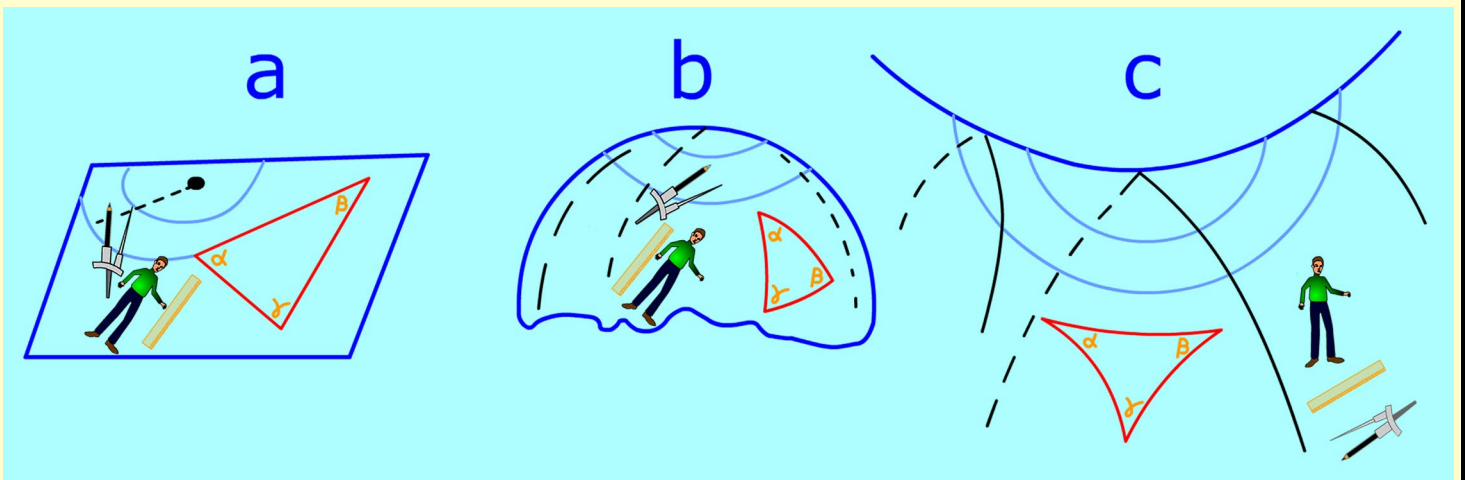


Figura 31. Tres diferentes tipos de superficies (dos dimensiones) curvas.

a) Superficie plana: curvatura cero.

b) Superficie esférica: curvatura positiva.

c) Superficie de silla de montar: curvatura negativa. La diferencia entre los tres casos puede ser descubierta por seres inteligentes bidimensionales si estudian la geometría de los círculos o triángulos.

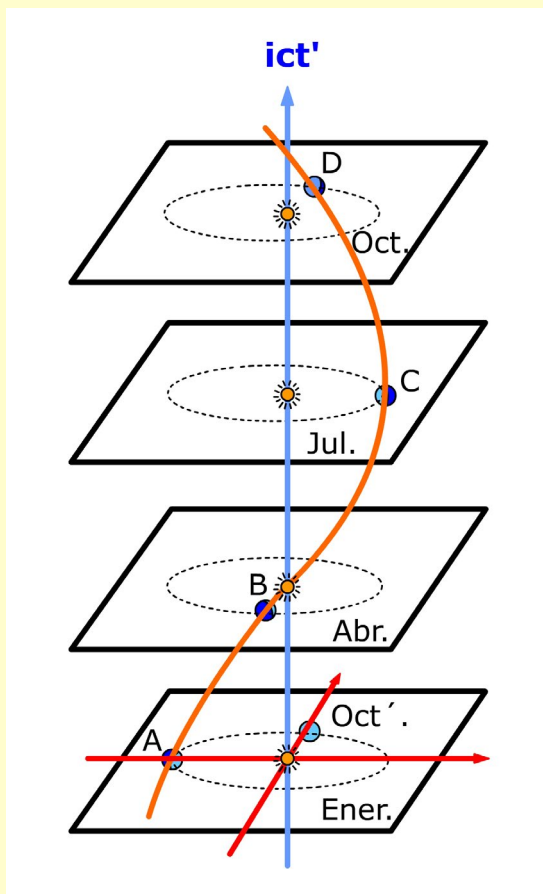


Figura 34. La línea cósmica de la Tierra en su movimiento alrededor del Sol, tratada en el sistema de coordenadas x, y, ict . La distancia dimensional espacio-tiempo entre las posiciones de la Tierra en enero y octubre es la distancia más corta. Pero la distancia entre la posición de enero y la proyección de la posición de octubre en el plano de enero (Oct') no es evidentemente la más corta.

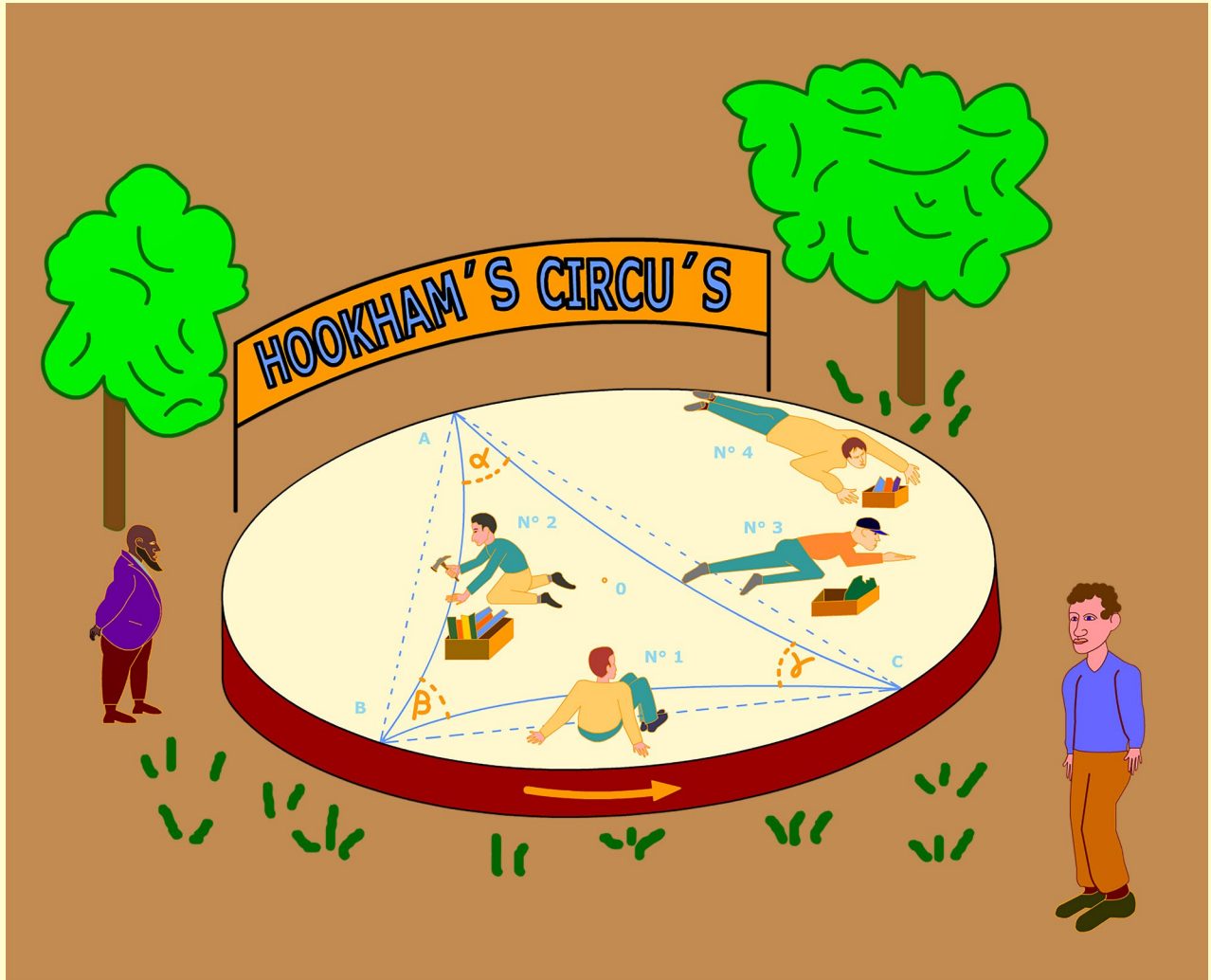


Figura 33. Estudios geométricos sobre una plataforma giratoria.

7. La ley de los cuanta

Este capítulo tiene las siguientes secciones: Divisibilidad de la materia; Un sopapo al viejo átomo (en donde se analiza la medición de Thomson de la masa del electrón, figura 35); Los misteriosos rayos X; Isótopos (donde se ilustran: el aparato de Thomson para el estudio de los rayos canales en la figura 37, el aparato para el estudio de la dispersión de partículas alfa, figura 38); La catástrofe del ultravioleta; La realidad de los cuanta de luz (en donde se analiza el aparato para el estudio del efecto fotoeléctrico y sus leyes, figuras 40 y 41); El átomo de Bohr (en donde se ilustran las primeras cuatro órbitas del átomo de hidrógeno, figura 43); El modelo atómico de Bohr y el sistema periódico de los elementos; Las ondas de materia; Relaciones de incertidumbre; Agujeros en la nada; Antimateria; Estadísticas cuánticas.

Divisibilidad de la materia

Como todo el mundo sabe, el átomo (que en griego significa "indivisible") es un hijo intelectual de Demócrito que vivió y enseñó en Atenas hace veintitrés siglos. Demócrito consideraba inconcebible que los cuerpos materiales pudieran ser divididos en partes cada vez más pequeñas sin límite y postulaba que tenía que haber partículas últimas, tan pequeñas que no sería posible dividir las en partes aún más pequeñas. Demócrito reconocía cuatro clases diferentes de átomos —los de la piedra, del agua, del aire y del fuego y creía que toda la diversidad de las materias conocidas resultaba de las diferentes combinaciones de estos cuatro elementos. Su concepción, que fue adoptada y firmemente fundamentada por la experimentación a principios del siglo XIX, por el químico inglés John Dalton, constituye la base de toda la química moderna, aunque sabemos que los átomos no son indivisibles y de hecho poseen una estructura interna muy complicada. Pero la idea de Demócrito de últimos elementos se ha transferido ahora a partículas mucho más pequeñas que constituyen la estructura interna del átomo y se puede esperar que los electrones, protones y otras llamadas "partículas elementales" sean real y verdaderamente elementales e indivisibles en el antiguo y buen sentido de las palabras de Demócrito. Puede ser que esta impresión derive de nuestra escasa —relativamente— familiaridad con estas partículas descubiertas recientemente y que estemos cometiendo el mismo error que los físicos y químicos del siglo XIX que creían que la divisibilidad de la materia se detenía en el átomo. Y también puede ocurrir, claro está, que si se descubre en el futuro que estas partículas elementales son estructuras complejas con nuevos nombres inventados para sus partes constituyentes, esto no demostrará que se ha llegado al fin y que años después se descubran partículas aún más pequeñas. Esto no es predecir en modo alguno los desarrollos científicos del porvenir, y la cuestión de si el original concepto filosófico de Demócrito de la indivisibilidad es correcto o equivocado nunca se decidirá por medios empíricos. Pero, en cierto modo, muchos científicos, incluyendo al autor, se sienten más dichosos pensando que en el estudio de la materia "las cosas llegarán al fin" y que los físicos del futuro conocerán todo lo que se puede conocer sobre la estructura interna de la materia. También parece completamente plausible que las partículas elementales de la física moderna merecen su nombre en un ciento por ciento al hecho de que sus propiedades y comportamiento parece ser mucho más sencillo que lo que puede decirse de los átomos.

Un sopapo al viejo átomo

Hacia fines del siglo XIX, los físicos llevaron su atención al paso de la electricidad a través de los gases. Se sabía desde hacía siglos que los gases, que de ordinario son aisladores eléctricos bastante efectivos, a veces pueden ser atravesados por tensiones eléctricas elevadas. La intensidad de la descarga fluctúa de las pequeñas chispas entre el tirador de la puerta y la mano del hombre que pasa por un piso alfombrado con zapatos de caucho y los potentes rayos de las grandes tormentas. Pero Sir William Crookes, cuyas contribuciones a la ciencia sólo han sido oscurecidas parcialmente por su creencia en el espiritismo y lo sobrenatural, ha demostrado que el paso de la electricidad a través de los gases se realiza de una manera mucho más tranquila si se reduce la presión del gas a una pequeña fracción de una atmósfera. Los tubos de Crookes brillaban con una luz tranquila de un color que dependía de la naturaleza del gas y siguen luciendo en las calles de las ciudades anunciando hoteles, clubs nocturnos y otras mil cosas. Cuando la presión del gas en un tubo al cual se aplica una elevada tensión eléctrica es suficientemente baja, aparece un haz perfectamente definido que va del cátodo al ánodo y choca contra el extremo del tubo si el revoltoso físico mueve el ánodo separándolo de la trayectoria del haz. Al chocar contra la pared de cristal, el misterioso rayo que emana del cátodo hace que brille con una difusa luz verdosa y cualquier objeto interpuesto en su camino arrojará sombras bien definidas. Al colocar un imán cerca del tubo, Crookes observó la desviación del rayo como ocurriría en el caso de una corriente eléctrica o un enjambre de partículas cargadas negativamente escapadas del cátodo. Hacia la misma fecha, Jean Perrin, en Francia, observó que una placa metálica colocada en el camino de este haz

adquiriría una carga eléctrica negativa. Todo parecía indicar que estas partículas deben estar cargadas negativamente al pasar a través de un gas enrarecido de la misma manera que los iones de Faraday se mueven a través de los líquidos en el proceso de la electrolisis. La diferencia esencial era, desde luego, que mientras en el caso de la electrolisis, los iones tienen que abrirse su camino lentamente a través de las moléculas estrechamente apretadas del líquido y nunca pierden su rumbo al electrodo opuesto, los rayos catódicos (así se les llama) en los gases enrarecidos siguen la línea recta y chocan con cualquier cosa interpuesta en su trayectoria.

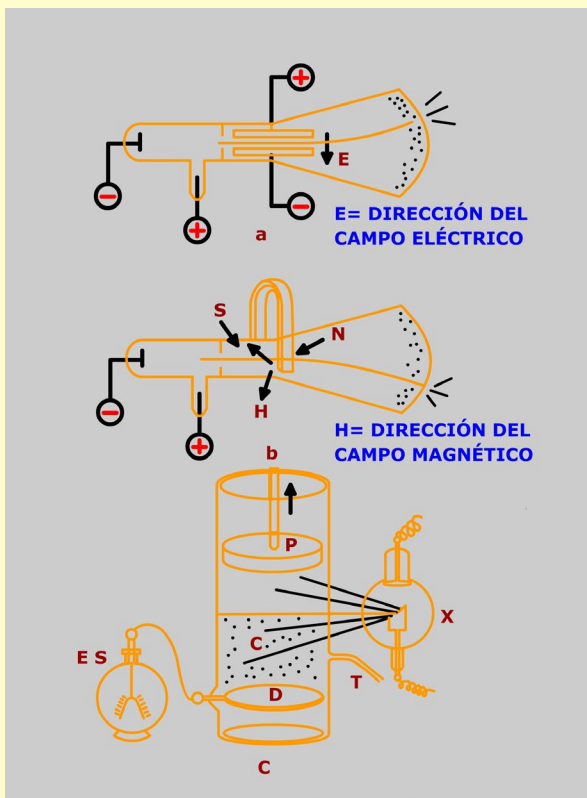


Figura 35. Medición por Thomson de la masa de un electrón. (a) La desviación en un campo eléctrico permite la medida de $m \cdot v^2/e$. (b) La desviación en un campo magnético permite la medición de $m \cdot v/e$. Combinando los dos resultados se halla (c) La proporción de caída de las gotitas formadas sobre los iones del gas permite la medición de e . Conociendo e/m y e , se halla fácilmente m .

Estas ideas fueron combatidas por el físico alemán Philipp Lenard, que había visto que el rayo catódico puede pasar fácilmente a través de varias pantallas colocadas en su camino sin hacer agujeros en ellas como seguramente lo haría un haz de partículas materiales. Únicamente ondas pueden comportarse así y no un haz de partículas materiales, razonó Lenard. Por supuesto, hoy sabemos que han de rodearse las pilas atómicas con muros de cemento de muchos pies de espesor para detener los neutrones que emiten y causan enfermedades de radiación en el personal de la planta atómica; el razonamiento de Lenard parece bastante débil. Pero era un argumento muy fuerte en la época en que fue formulado.

La tarea de resolver las contradicciones experimentales de que los rayos catódicos son corrientes de partículas y de averiguar sus propiedades físicas, fue encomendada por el Consejo Supremo del Progreso de las Ciencias a Joseph John Thomson, más tarde Sir Joseph, físico nacido en Manchester que tenía entonces cuarenta años y era director del famoso Laboratorio Cavendish de Cambridge, uno de los principales centros de la física contemporánea. Suponiendo que los rayos catódicos están constituidos por partículas rápidas, Thomson decidió medir su masa y su carga eléctrica. Uno de los datos relativos a estas magnitudes fue la desviación de los rayos catódicos observada en el campo magnético (Figura 35 a). Esta desviación no depende únicamente de la carga y la masa de las partículas en movimiento, sino también de su velocidad, y mediante las mediciones se puede encontrar únicamente el producto masa·velocidad/carga o $m \cdot v/e$ en las anotaciones convencionales. Sin embargo, se deducía de la teoría que la desviación producida por el campo eléctrico dependía de otra combinación de las mismas cantidades, a saber del producto $m \cdot v^2/e$. Así, midiendo ambas desviaciones y combinando los resultados, Thomson encontró separadamente la velocidad de su movimiento v y la relación de carga y masa e/m . Mientras v depende del potencial eléctrico aplicado al tubo, e/m era siempre el mismo, equivalente a $1,7589 \times 10^{11}$ C/kg, en unidades SI.

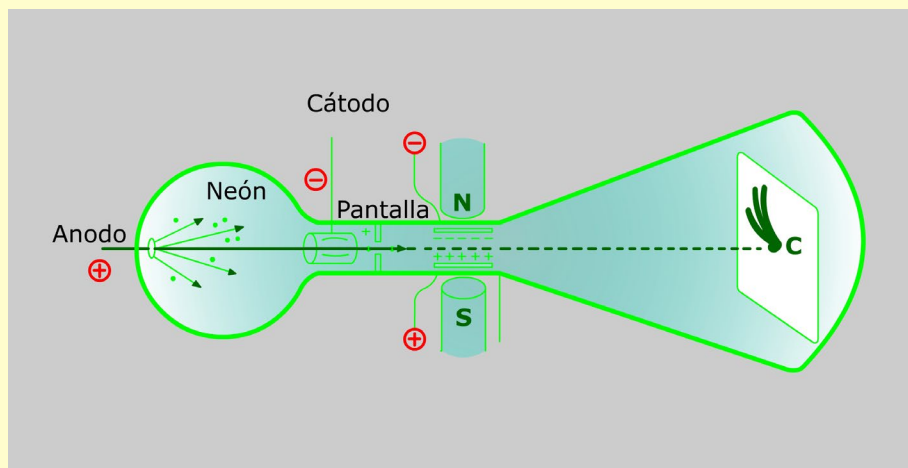


Figura 37. Aparato de Thomson para el estudio de los rayos canales. Los iones positivos que se mueven del ánodo al cátodo pasan a través de canales abiertos en el cátodo, y después de pasar por una pantalla entran en la región del campo eléctrico y magnético orientados en la misma dirección. Como la desviación magnética (en la dirección horizontal) depende de la velocidad de las partículas, mientras la desviación magnética (en dirección vertical) depende del cuadrado de esta velocidad, las partículas de la misma masa, pero que se mueven con velocidades diferentes, serán distribuidas a lo largo de una parábola en la pantalla C.

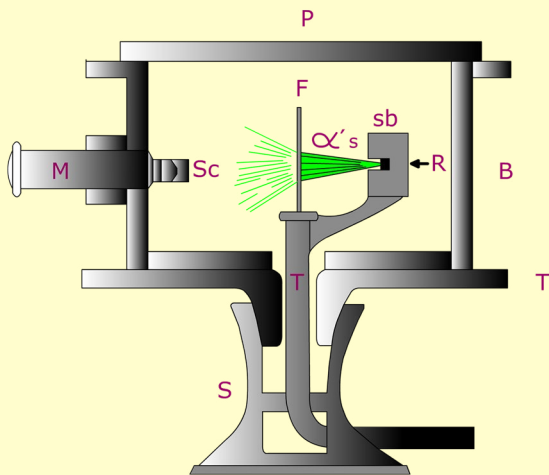


Figura 38. El primer aparato para el estudio de la dispersión de los rayos alfa. Una caja en que se ha hecho el vacío B con una placa superior P móvil está colocada sobre una mesa rotatoria T. La fuente radiactiva R, colocada en una lámina de plomo Sb, y el filamento F de dispersión están fijos al pedestal S. Un microscopio con la pantalla de escintilación Sc está fijo en la caja y puede girar en torno al eje horizontal.

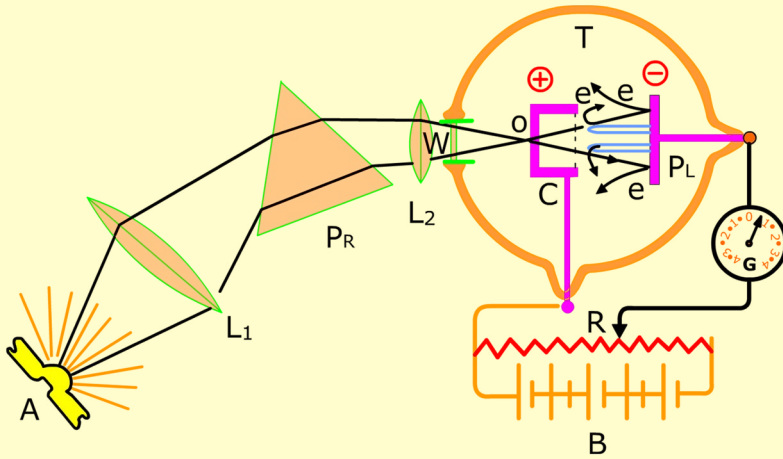


Figura 40. Aparato para el estudio del efecto fotoeléctrico. Los fotoelectrones proyectados por la lámina PL hacia el cilindro C son detenidos por el campo eléctrico si la diferencia de potencial entre PL y C es bastante grande.

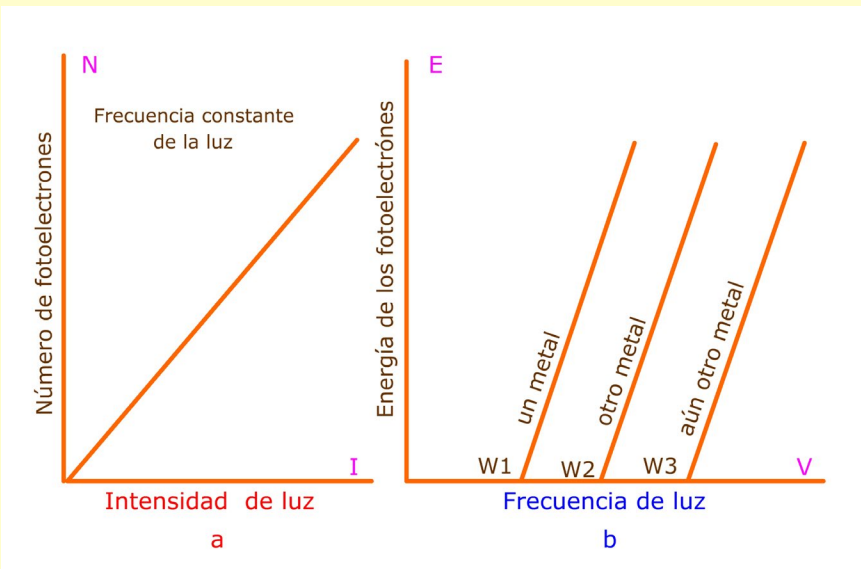


Figura 41. Leyes del efecto fotoeléctrico halladas experimentalmente. (a) La dependencia entre el número de fotoelectrones y la intensidad de la luz. (b) La dependencia entre la energía de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz.

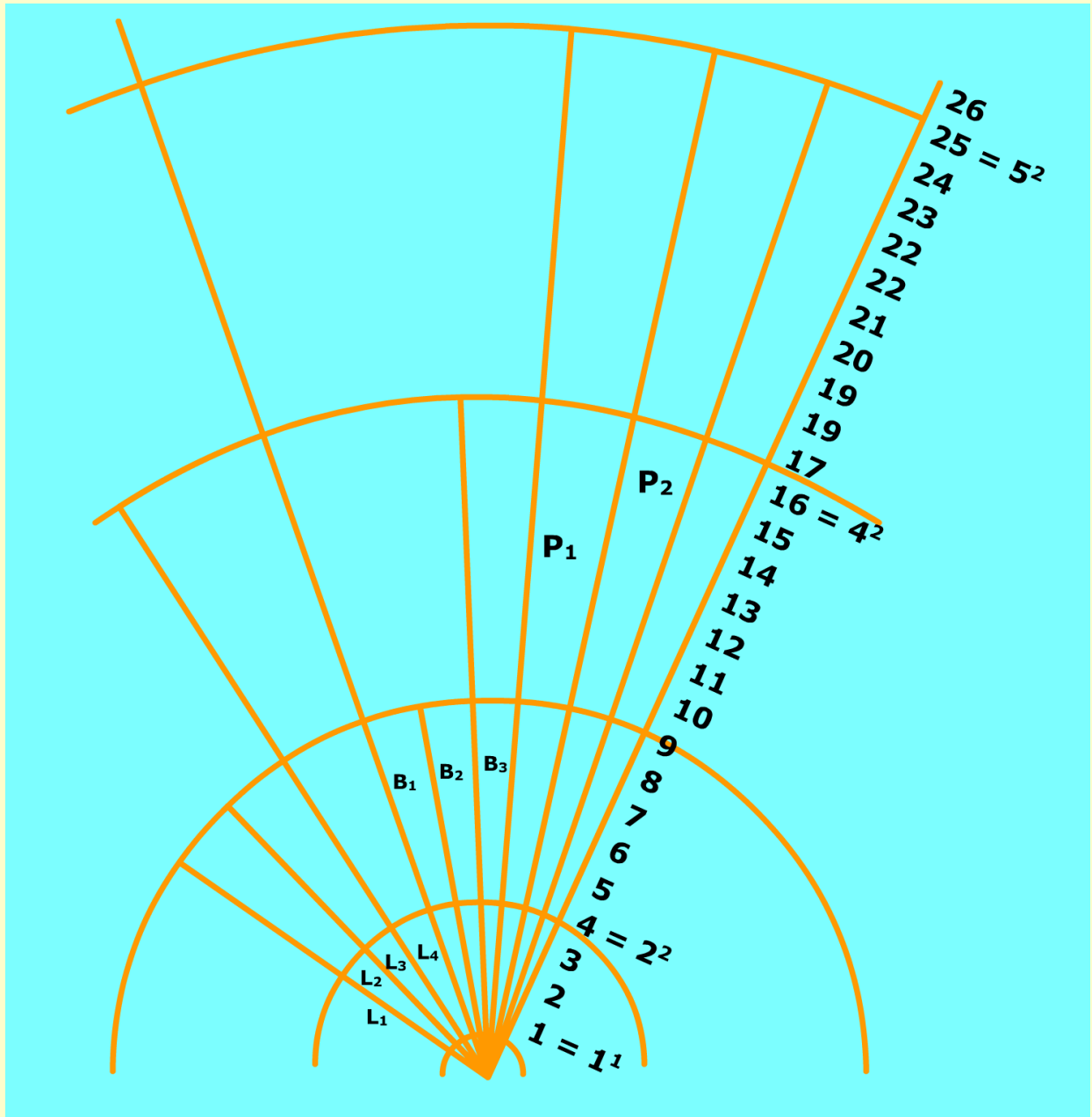


Figura 43. Las primeras cuatro órbitas circulares en el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno con sus radios aumentando como los cuadrados de los números enteros. Las transiciones L1, L2, L3, L4... a la órbita primera producen las líneas de la serie de Lyman. Las transiciones B1, B2, B3... y P1, P2... a la segunda y tercera órbita producen las líneas de las series de Balmer y Paschen.

8. El núcleo atómico y las partículas elementales

Este capítulo consta de las siguientes secciones: Descubrimiento de la radiactividad; Elementos radiactivos; Familias radiactivas (en donde se ilustra la emisión α , β y γ , figura 47); La ley de supervivencia; Las barreras resquebrajadas; Constitución nuclear y neutrones; Degradación beta y neutrones; Primeros casca núcleos (en donde se ilustra la cámara de niebla de Wilson, figura 51); Estructura nuclear y estabilidad; Reacciones de fisión en cadena; Bombas de fisión y reactores; Reacciones termonucleares; Mesones e hiperones; A través del espejo; El futuro de la Física.

A principios de 1896, el físico francés Henri Becquerel, después de conocer el reciente descubrimiento de los rayos X por Roentgen, decidió ver si algo semejante a los rayos X era emitido también por los cuerpos fluorescentes de los que se sabía que resplandecen bajo la acción de los rayos incidentes de luz. Para estos estudios, escogió cristales de un mineral conocido como "uranilo" (doble sulfato de uranio y potasio) que había estudiado antes a causa de sus acusadas propiedades fluorescentes. Como Becquerel creía que la radiación es el resultado de la iluminación exterior, colocó un cristal de uranilo sobre una placa fotográfica envuelta en papel negro y puso todo ello en el antepecho de la ventana. Cuando reveló la placa después de unas cuantas horas de exposición a la luz del sol, observó claramente una mancha oscura debajo del sitio en que había sido colocado el cristal de uranilo. Repitió el experimento varias veces y siempre apareció la mancha oscura, aunque puso papel más negro envolviendo la placa fotográfica.

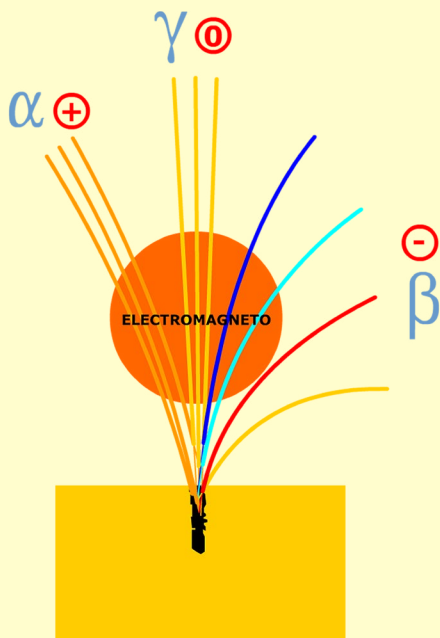


Figura 47. Rayos alfa, beta y gamma.

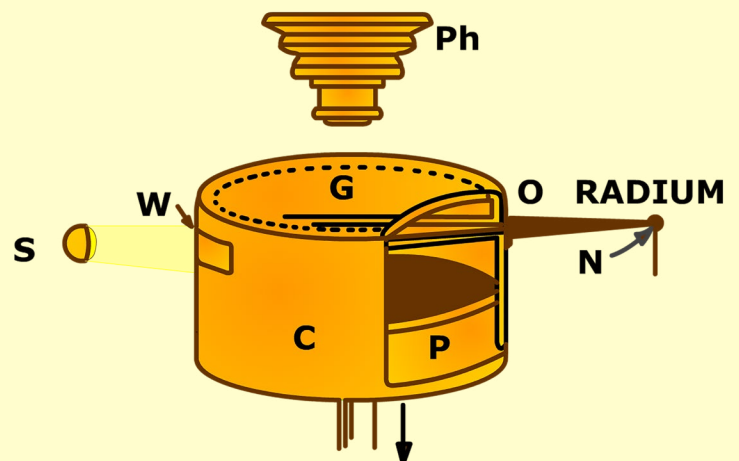


Figura 51. Esquema de la cámara de niebla de C. T. R. Wilson.

El futuro de la física

De lo que llevamos dicho resulta evidentemente que el futuro de la física depende de los estudios posteriores y comprensión de las partículas elementales, y mientras que el progreso experimental en esta dirección está en marcha, la teoría está prácticamente detenida. Hace veinticinco siglos, Demócrito postuló que la materia está compuesta de diminutas partículas discretas y nosotros estamos cada vez más convencidos de la exactitud de esta tesis. Hace sólo medio siglo que hemos aprendido que la energía tiene también una estructura "atómica" y ahora hablamos de cuantas de energía. En el transcurso de los seis últimos años, los físicos han aprendido la manera de cuantificar las distintas clases de energía. En el caso de la radiación electromagnética, la energía únicamente puede tomar los valores de $nh\nu$ en que ν es la frecuencia de vibración y n un número entero. En un sencillo átomo de hidrógeno, la energía de los diferentes estados cuánticos varía como $1/n^2$ en que n es un número entero. En otros casos más complicados la respuesta exacta está dada por las ecuaciones de Schrödinger y Dirac. Pero, en el caso de las partículas materiales, estamos todavía en un estado de absoluta ignorancia. No conocemos por qué una carga eléctrica tiene siempre el mismo valor: $4,77 \cdot 10^{-10}$ esu. No tenemos idea de por qué las masas de las partículas están cuantificadas, teniendo los valores relativos consignados en la Tabla I. Ni otra mejor que Demócrito de por qué la materia debe consistir en partículas indivisibles en lugar de ser continua.

Las respuestas a las cuestiones anteriores constituirán la física del porvenir, pero en las últimas décadas no se ha dado un solo paso para hallar esas respuestas y nadie puede predecir cuándo puede esperarse encontrarlas. Pero, aunque no se conoce una respuesta correcta, no se nos debe vituperar por especular sobre esta clase de problemas.

Selección y notas: Juan Espinoza G.