

CONCEPTOS BÁSICOS EN ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

colección
notas
de clase
colección
notas
de clase
colección
notas
de clase

**Julio César
González Navarrete**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE CIENCIAS

PUBLICACIONES RECIENTES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS

José Alfredo Jiménez M.
**ÁLGEBRA MATRICIAL CON
APLICACIONES EN ESTADÍSTICA**
Colección Textos

José Francisco Caicedo
CÁLCULO AVANZADO
Colección Textos

José Francisco Caicedo
Alfonso Castro
**ECUACIONES SEMILINEALES
CON ESPECTRO DISCRETO**
Colección Textos

Liliana Blanco
PROBABILIDAD
Colección Textos

Sergio Yáñez
Nelfi González
José Alberto Vargas
**CARTAS DE CONTROL T2
MULTIVARIADAS USANDO R y SAS**
Colección Notas de Clase

Julio César González Navarrete

Se formó como físico en el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia en 1971, año en el que se vinculó como docente de la misma Universidad; en ella realizó su maestría, graduándose en 1982 con una tesis sobre la caracterización óptica y térmica de materiales para sistemas solares térmicos. Perteneció al Grupo de Investigación sobre Energía Solar de la Universidad Nacional de Colombia, en el cual llevó a cabo actividades de investigación, extensión, gestión y divulgación en temas relacionados con las fuentes alternativas de energía. Dirigió el Departamento de Física entre 1984 y 1986. Jubilado desde 2002, continúa vinculado como docente en los cursos libres juveniles de Física. Entre sus intereses académicos actuales, realiza investigaciones acerca de los niveles de radiación ultravioleta solar en sistemas montañosos de altura, como la Sabana de Bogotá, e implementa estimaciones de la columna total de ozono en la atmósfera, temas sobre los que ha sido autor de varias publicaciones.

Conceptos básicos de electricidad y magnetismo

Conceptos básicos de electricidad y magnetismo

JULIO CÉSAR GONZÁLEZ NAVARRETE

PROFESOR ASOCIADO

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS

© UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Facultad de Ciencias

© Julio César González Navarrete

Decano: Ignacio Mantilla Prada

Vicedecano Académico: John Charles Donato

Vicedecano de Investigación y Extensión: Luis Fernando Ospina

Primera edición, 2012

ISBN: 978-958-761-249-3

Bogotá, Colombia

Catalogación en la publicación - Biblioteca Nacional de Colombia

González Navarrete, Julio César

Conceptos básicos de electricidad y magnetismo / Julio César González Navarrete. – 1a. ed. – Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 2012.

p. - (Notas de clase)

Incluye referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-761-249-3

1. Electricidad - Enseñanza superior 2. Magnetismo - Enseñanza superior I. Título II. Serie

CDD: 537.1 ed. 21

CO-BoBN- a818696

TABLA DE CONTENIDO

PRÓLOGO	VIII
1. ELECTROSTÁTICA Y LEY DE COULOMB	1
1.1. Electrificación	2
1.2. Principio fundamental de la electrostática (ley de cargas)	3
1.3. ¿Qué es la electricidad?	5
1.4. Estructura atómica	5
1.5. Ley de la conservación de la carga	9
1.6. Observación del efecto de la carga eléctrica	12
1.7. Conductores y aisladores	13
1.8. Triboelectricidad	15
1.9. Inducción de cargas eléctricas	18
1.10. Ley de Coulomb	19
1.11. Anexo experimental	30
1.12. Problemas y preguntas adicionales	33
1.13. Referencias	34
2. CAMPOS ELÉCTRICOS	37
2.1. El campo eléctrico	37

2.2. Campo eléctrico de una carga puntual	39
2.3. Campo eléctrico de dos cargas puntuales	40
2.4. Campos eléctricos debidos a otras distribuciones de carga	46
2.5. Problemas y preguntas adicionales	54
2.6. Referencias	55
3. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA, POTENCIAL ELÉCTRICO Y DIFERENCIA DE POTENCIAL	57
3.1. Energía potencial eléctrica	57
3.2. El potencial	59
3.3. Diferencia de potencial	62
3.4. Potencial de una carga puntual positiva	66
3.5. Superposición de potenciales	72
3.6. Dinámica de una partícula cargada en un campo eléctrico	75
3.7. La batería: fuente de diferencias de potencial	76
3.8. Capacitancia	79
3.9. Energía en un condensador	82
3.10. El electrón volt (eV)	85
3.11. Problemas y preguntas adicionales	85
3.12. Referencias	87
4. CORRIENTE ELÉCTRICA, RESISTENCIA ELÉCTRICA Y CIRCUITOS ELEMENTALES	89
4.1. La corriente eléctrica	89
4.2. Ley de Ohm	95
4.3. Resistividad	98
4.4. Variación de la resistencia con la temperatura	100
4.5. La conservación de la energía y los circuitos eléctricos . .	104
4.6. A propósito de una unidad de medida de la energía: el kilowatio-hora (kWh)	108

4.7.	Circuitos eléctricos básicos	109
4.7.1.	Resistencias en serie	109
4.7.2.	Resistencias en paralelo	113
4.8.	Problemas y preguntas adicionales	117
4.9.	Referencias	119
5.	MAGNETISMO Y FUERZAS MAGNÉTICAS	121
5.1.	Campos magnéticos y su interacción con partículas cargadas	121
5.2.	Fuerza que ejerce un campo magnético sobre un flujo de corriente que se transporta en un conductor	133
5.3.	Generación de campos magnéticos mediante corrientes eléctricas. Ley de Biot-Savart	135
5.4.	Ley de Ampère	142
5.5.	Problemas y preguntas adicionales	144
5.6.	Referencias	145
6.	INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	147
6.1.	Introducción	147
6.2.	Flujo magnético	148
6.3.	Ley de Faraday de la inducción. Ley de Lenz	150
6.4.	Una fem en movimiento y la ley de Faraday de la inducción electromagnética	154
6.5.	El transformador	158
6.6.	Problemas y preguntas adicionales	160
6.7.	Referencias	161
7.	BREVE INTRODUCCIÓN A LAS ECUACIONES DE MAXWELL Y A LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	163
7.1.	Introducción	163
7.2.	La ley de Gauss para la electricidad: primera ecuación de Maxwell	164

7.3. La ley de Gauss para el magnetismo: segunda ecuación de Maxwell	166
7.4. Complementación para la ley de Ampère. Corriente de desplazamiento o tercera ley de Maxwell . . .	168
7.5. La ley de Faraday: cuarta ecuación de Maxwell	171
7.6. Ondas electromagnéticas	173
7.7. Problemas y preguntas adicionales	188
7.8. Referencias	188
8. PREGUNTAS DE AUTOEVALUACIÓN	191

Desde hace varios semestres se viene dictando el curso libre de Física II dedicado a los temas de electricidad y magnetismo. Los temas específicos del programa fueron discutidos y escogidos conjuntamente por los profesores Hildebrando Leal y Julio César González. Los tópicos elegidos fueron electrostática, fuerzas y campos eléctricos, potencial eléctrico, energía eléctrica, corriente y resistencia eléctricas, circuitos eléctricos básicos, magnetismo, inducción electromagnética y ondas electromagnéticas. Debido a que el tema de ondas electromagnéticas se trata al final, difícilmente, alcanza el tiempo para abordarlo.

De las discusiones se hizo evidente que, aunque estos cursos son libres, los temas involucrados suponían que el estudiante que se inscribiese a este curso, debería tener el prerrequisito del curso juvenil básico (sobre Mecánica) que ya se ha venido dictando durante varios años; en dicho curso básico se insiste en el manejo y conversión de unidades, matemática elemental y los conceptos fundamentales de Cinemática y Dinámica, todo lo cual se desarrolla con una metodología ya bien experimentada. Además, el curso fundamental provee conceptos y principios integradores (fuerzas, trabajo, energía, leyes de conservación etc.) que son imprescindibles en las demás ramas de la Física. Sin embargo, es posible que asistan a este curso personas que aunque no cursaron el básico, se sientan con suficiente fundamento para sacarle provecho al de Electricidad y Magnetismo; es el caso de universitarios que quieren repasar los conceptos relacionados con estos tópicos, o aún el de bachilleres que ya han aspirado a ingresar a la universidad.

De otro lado, aunque el instrumental matemático requerido puede, en principio, ser más exigente que el del curso de la Física I, se considera que con los mismos fundamentos matemáticos es posible sacar un buen beneficio del presente curso.

Otro aspecto importante discutido fue el relacionado con los propósitos y criterios del curso, entre los que se destacan los siguientes:

1. Que se orienten los esfuerzos pedagógicos a lograr que los estudiantes capten el significado de los conceptos que se enseñan y que ellos mismos les den significado.
2. Que se potencie una actitud dinámica, participativa, activa y creativa del estudiante durante la clase, (por ejemplo, mediante el planteamiento frecuente de problemas) en lugar de permitirle una actitud pasiva y relajada, a la que se llega cuando la exposición del profesor se hace demasiado extensa. Este criterio es esencial en estos cursos, ya que son pocos los elementos disponibles para tratar de encausar el esfuerzo del estudiante en el tiempo extra-clase. En estos cursos no están previstas evaluaciones tendientes a una aprobación del curso, lo cual, como es lógico y humano, es reducido por algunos participantes a la sola asistencia, sin mayor esfuerzo ni tensiones de tipo intelectual. No implica lo anterior, que no se les señalen actividades extra-clase y trabajos para la casa que los asistentes deberían aprovechar para reafirmar conceptos.
3. Procurar e insistir en que el estudiante desarrolle método de estudio propio de nivel universitario. Máxime en el caso de la Física, ya que como Ciencia, requiere que su estudio se realice con actitud crítica y filosófica. Recomendarle que siempre revise la evolución histórica de los conceptos. Que contextualice los conceptos de la Física en situaciones de la cotidianidad y que además, involucre el método científico en esas mismas situaciones. Por lo anterior, la práctica en el laboratorio (bien como demostrativa, bien como experimento), es fundamental.

El esfuerzo del profesor debe, pues, estar dirigido en la dirección de procurar los anteriores propósitos, tanto en su exposición, como en las diferentes actividades (individuales o grupales) que programe a lo largo del curso.

Otro de los temas tratados fue acerca de la conveniencia de disponer de algún texto guía. La experiencia en estos cursos ha demostrado que disponer de un texto guía es útil tanto para los estudiantes, como para

el profesor. Si bien, se discutió sobre este aspecto, fue muy poco lo que se avanzó en la preparación de un posible texto. Las notas presentes, de carácter personal, son el resultado de las diferentes experiencias logradas en los primeros cursos dictados y están en proceso de mejoramiento. Estas notas incluyen, entre otros, algunos problemas y preguntas que inicialmente aportó el profesor Leal con el propósito ya expresado.

Dado que el nivel de tratamiento y de disponibilidad de herramienta matemática no puede ser exigente en los cursos libres, estas anotaciones se realizaron adaptando temas de textos de “Física” de mayor nivel como Serway, Tipler, Wilson y otros. En muchos temas se siguió, casi que al pie de la letra lo expuesto por textos de un nivel apropiado a nuestros propósitos, como, “Física” de Wilson y Buffa, también de “Fundamentals of Collage Physics” de Peter J. Nolan, entre otros.

En estas notas se involucran algunas sugerencias de prácticas demostrativas y de experimentos o de ayudas pedagógicas que faciliten el entendimiento y discusión de los conceptos. También se colocan algunas notas históricas logradas de otros autores, con el propósito de invitar a los estudiantes a profundizar en la historia del desarrollo de la Física.

En resumen, estas anotaciones son una guía personal de los temas tratados durante el curso libre, adaptadas en parte de unos textos y extraídas de otros.

JULIO CÉSAR GONZÁLEZ NAVARRETE

CAPÍTULO 1

ELECTROSTÁTICA Y LEY DE COULOMB

En las actividades de la vida diaria se presentan con mucha frecuencia diferentes situaciones en las que son evidentes los fenómenos electrostáticos; así, por ejemplo, es común que al bajarse de un auto se sufra una molesta descarga eléctrica al momento de cerrar la puerta. También, suele escucharse leves chasquidos de descargas eléctricas, al apagar o encender un aparato de televisión o un monitor de computador de los de tubo catódico, o simplemente, al desvestirse una persona, en el momento de despojarse de un suéter confeccionado con cierto tipo de licras, es normal observar pequeñas chispas (especialmente, si se hace en la oscuridad), y/o aún, simultáneamente escuchar leves descargas eléctricas. A lo anterior, debe agregarse la eventualidad común “tan antigua como el mundo” y algunas veces trágica, de grandes descargas eléctricas durante una tormenta. En fin, existe una extensa lista de fenómenos similares en diversas situaciones de la vida diaria.

Desde la antigüedad se han observado diferentes tipos de fenómenos relacionados con la electricidad, y a la par con el transcurrir de los siglos, se han estudiado, esquematizado y clasificado con el objeto de facilitar su estudio. En esta primera parte se presentan, de manera resumida, algunos experimentos que evidencian la naturaleza eléctrica de la materia y también algunos intentos por cuantificar los fenómenos en especial las fuerzas eléctricas.

1.1. Electrización

Cuando una varilla de vidrio se frota vigorosamente con seda, se observa que ésta adquiere la propiedad de atraer pequeños pedazos de papel; se dice que se ha electrizado. Si dos varillas de vidrio se someten al mismo procedimiento y se cuelgan de sendos estribos cercanos, puede observarse que ellas se repelen entre sí, evidenciando que dos varillas de vidrio electrizadas de igual manera se repelen. Similarmente, si dos varillas de plástico (antiguamente, no se usaba plástico sino ámbar) se frotran intensamente con un pedazo de piel o de gamuza y se repite la prueba anterior, también se repelen. La conclusión en este caso es que dos varillas de plástico electrizadas de igual manera se repelen (1).

Al contrario, si se aproximan una varilla de vidrio y otra de plástico cargadas eléctricamente, como ya se describió, estas se atraen, mostrando así, que existen dos tipos de electricidad: la del vidrio o vítrea, llamada positiva y la del plástico, electricidad negativa.

El procedimiento descrito se denomina *electrización por frotamiento o fricción*; también es común decir que un objeto “quedó cargado” de electricidad positiva o negativa.

Aunque los experimentos anteriores pueden realizarse con diferentes materiales, es de notar que si ellos se realizan con varillas de hierro o de cobre o de muchos metales, no puede observarse un fenómeno similar (2). Con montajes diferentes se puede cargar un metal, como se explicará más adelante.

También existe el procedimiento para electrizar o cargar eléctricamente un objeto por contacto. Este procedimiento está descrito en la figura 1.1.

Una vez que un objeto ha sido cargado eléctricamente mediante cualquiera de las formas descritas, se dice que sus cargas eléctricas están estáticas (no se mueven mientras no se genere alguna interacción con el objeto) y por ello, el análisis físico de estos fenómenos se conoce como *electrostática*. Sin embargo, las situaciones reales pueden ser algo más complejas y por ello se dice que en los fenómenos electrostáticos debe analizarse la presencia de cargas eléctricas estacionarias o móviles y su interacción, cuando ésta depende exclusivamente de las cargas y de su posición y no de su movimiento (3).

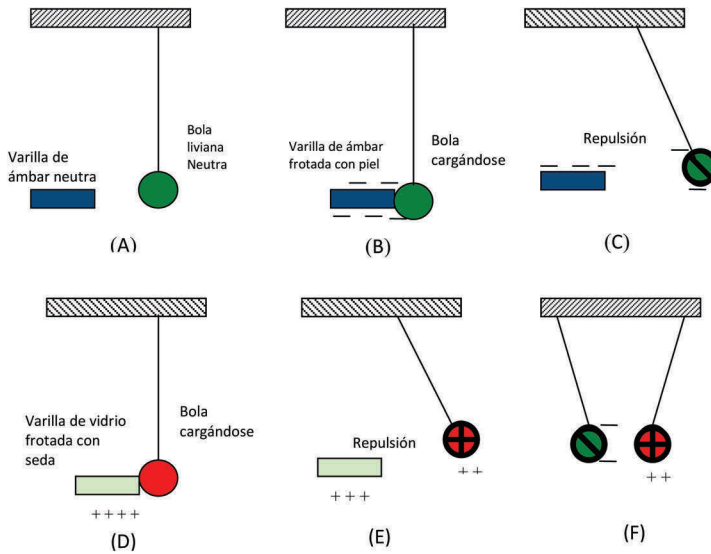


Figura 1.1. Se muestra el procedimiento para cargar por contacto un cuerpo y para demostrar la existencia de las dos clases de electricidad. A) Si una varilla de ámbar en estado eléctrico neutro se coloca en contacto con un material, en particular con una esfera pequeña, no pasa nada especial. B) Si el ámbar se frota contra paño de lana (i.e. piel) al ponerlo en contacto con la esfera pequeña (semilla de saúco, o un pequeño globo inflado, por ejemplo), ésta recibe parte de la carga del ámbar. C) Después de cargada la esferilla, si se le acerca el ámbar es repelida. D) El mismo procedimiento se le puede aplicar a una varilla de vidrio frotada contra seda y luego puesta en contacto contra otra esfera similar a la anterior. E) Al acercarlas se presenta repulsión. F) Cuando las dos esferas de los dos experimentos se aproximan, se atraen.

1.2. Principio fundamental de la electrostática (ley de cargas)

Sin importar el procedimiento para la generación de cargas eléctricas, se da por aceptado como un principio que:

- a) Cargas eléctricas del mismo signo se repelen y
- b) Cargas eléctricas de signo opuesto se atraen.

Si se reconoce que existe repulsión o atracción entre objetos cargados eléctricamente, se está aceptando que existen fuerzas de naturaleza eléctrica. Los hechos experimentales están demostrando que estas fuerzas de naturaleza eléctrica se ejercen a distancia, con un efecto dinámico

análogo al de la fuerza de atracción entre masas, que es una fuerza de naturaleza diferente a la eléctrica. ¿Cómo definiría usted, la naturaleza de la fuerza de atracción entre masas? De ello se infiere que la fuerza eléctrica también se ajusta a los requerimientos de aplicación de la tercera ley de Newton (3).

También se encuentran otros hechos experimentales que es conveniente destacar y que no se pueden pasar por alto; por ejemplo, se mencionó arriba que al frotar una varilla de vidrio *atrae* pequeños trozos de papel, los cuales supuestamente están en estado neutro. Entonces, las cargas positivas (el vidrio se carga positivamente) atraen materia eléctricamente neutra, es decir sin carga neta.

De otro lado, se pueden citar muchas situaciones en las que un material cargado negativamente (por ejemplo, un globo de fiesta infantil o una hoja de transparencias de acetato) es *atraído* por sustancias neutras. Por tanto, se concluye que cualquier objeto eléctricamente cargado (sea con carga positiva o negativa), ejerce una *fuerza de atracción* sobre algunos materiales eléctricamente neutros. ¿Qué explicación podría usted adelantar sobre estos fenómenos?

Problema 1.1

1. Suponga que se cargan tres globos (A, B y C) de los de fiesta infantil, pero solo se conoce que el globo B tiene carga negativa. En las siguientes dos situaciones (figura 1.2) concluya qué tipo de carga tienen A y C y responda en el recuadro anexo.
2. ¿Por qué a veces efectos similares de la carga eléctrica en determinadas actividades rutinarias son más notorios en ciertas ocasiones que en otras?

Ayuda experimental

- a) Tome una hoja de acetato y trate de adherirla al tablero o a la pared. Después frótela con tela de algodón y acérquela de nuevo al tablero. ¿qué observa? ¿qué hipótesis explicativa daría a lo que observa?
- b) Ahora coloque pequeñas esferas de icopor sobre la mesa, frote una varilla de vidrio con seda y acérquela a las esferas de icopor. ¿Qué observa? ¿Qué hipótesis tiene y qué puede concluir de estas sencillas prácticas?

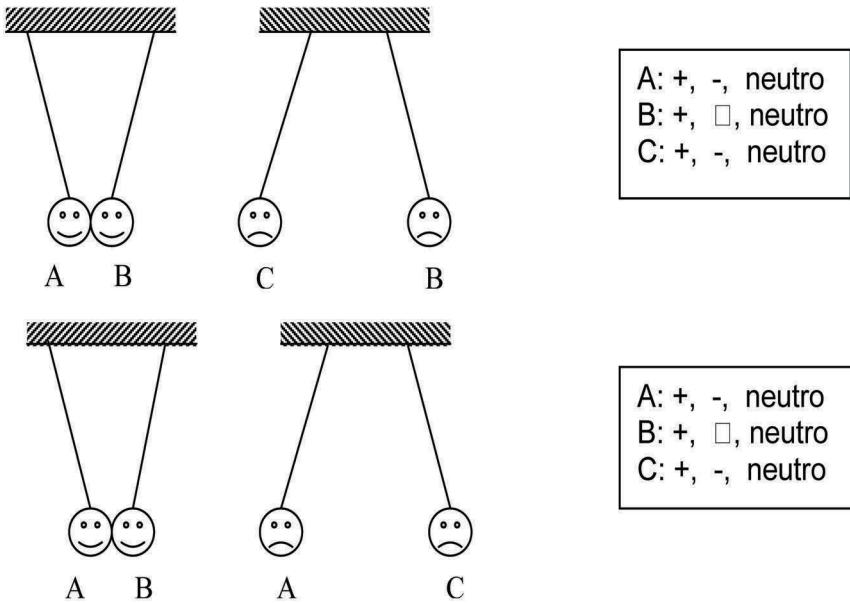


Figura 1.2. Diagrama para el problema 1.1.

1.3. ¿Qué es la electricidad?

Es una forma de comportamiento de las cosas, o mejor de la materia. Cuando se dice que una varilla de vidrio frotada con seda, se comporta de cierta manera, mientras que una de plástico frotada con gamuza se comporta de otra manera, se está aceptando que hay dos clases de comportamiento de la materia en relación con los fenómenos de naturaleza eléctrica (4).

¿Porqué la materia presenta comportamientos de tipo eléctrico? Para responder a esto se debe analizar su estructura intrínseca.

1.4. Estructura atómica

La historia del desarrollo de las ideas acerca de la estructura de la materia es bastante larga. A continuación se presentan los hechos históricos más destacados, relacionados con el desarrollo de la estructura de la materia:

Leucipo y *Demócrito* en el siglo V a. C. afirmaron que la materia está compuesta de pequeñas partículas llamadas átomos (átomo en griego significa indivisible). Estas partículas serían como los ladrillos fundamentales irrompibles con los cuales está construida la materia.

Isaac Newton (1642 - 1727) físico y matemático inglés, dedujo entre 1665 y 1666, que la fuerza gravitatoria obedece a una ley de la forma del inverso del cuadrado de la distancia y que con ella se puede explicar tanto la caída de los cuerpos en la Tierra como el movimiento de la Luna en su órbita (5).

Henry Cavendish (1731 - 1810) físico y químico de origen francés, nacionalizado Inglés en 1766 identifica al hidrógeno, que como se sabe hoy en día, es el elemento más abundante del universo (2).

John Dalton (1766 - 1844) químico inglés, en 1808 propuso que a cada elemento conocido corresponde un átomo de materia. Todo material del universo es justamente una combinación de “átomos indivisibles” (6).

Joseph John (J.J.) Thomson (1856 - 1940, físico inglés) descubrió el electrón en 1897. El electrón es una partícula cuya masa es de $9,1095 \times 10^{-31}$ kg. El electrón se consideró como la partícula elemental con la carga eléctrica más pequeña conocida de tipo negativo. Cualquier otra carga eléctrica que se presenta en la naturaleza es múltiplo entero de la carga electrónica. Puesto que el átomo es generalmente neutro debe tener una parte positiva que neutralice la carga negativa de los electrones. Una consideración importante fue: si el electrón procede del átomo, éste no sería indivisible. Al ser divisible debe presentar una estructura. *Thomson* imaginó que los electrones formarían parte del átomo, estando embebidos en la masa del átomo que debería ser positiva (7). Usualmente, la carga del electrón se expresa como e^- y se entiende que es la carga negativa elemental.

A comienzos del siglo XX (1911) y después de muchos experimentos, *Ernest Rutherford* (1871 - 1937 físico británico) desarrolló un modelo de átomo, en el que asume que en el centro hay cargas positivas, alrededor del cual se encuentran orbitando los electrones a manera de planetas alrededor del sol. En 1919 demostró la existencia del protón que tiene igual cantidad de carga que el electrón pero positiva. La masa del protón es de $1,6726 \times 10^{-27}$ kg o cerca de 1836 veces más grande que la del electrón. En 1913 *Niels Bohr* mejoró el modelo de Rutherford asumiendo que las órbitas de los electrones están cuantizadas.

En 1920 *Rutherford* sugirió la probable existencia de otra partícula dentro del núcleo, pero neutra a la que llamó neutrón. El neutrón fue descubierto en 1932 por *James Chadwick*. Su masa es similar a la del protón (7).

Clásicamente, los electrones, los protones y los neutrones son las partículas que constituyen la materia. La diferencia entre un elemento y otro es el número de electrones y de protones que constituyen cada átomo característico. El nombre genérico para los protones y neutrones es *nucleones*, debido a que se hallan en el núcleo del átomo. La masa de cada nucleón constituye la unidad de masa (o unidad atómica de masa, *uam*) que con frecuencia se utiliza para hablar de masa atómica y molecular; el protón, sin embargo tiene una masa ligeramente menor que la del neutrón.

Frecuentemente, la carga del protón se expresa como e^+ y se acepta que desde un punto de vista clásico, es la carga positiva elemental; sin embargo, en ciertas descripciones el protón se representa como p^+ . En concepciones modernas, está compuesto por fracciones de cargas elementales.

En la figura 1.3 se observa un esquema simplificado de los cuatro primeros elementos, que incluyen las partículas ya mencionadas, según el modelo de *Rutherford-Bohr*. Por simetría la posición media de los electrones coincide con la posición del núcleo. Por ello, el átomo como un todo actúa como si fuese eléctricamente neutro. Si a un átomo le falta un electrón, se dice que el átomo está ionizado, es un ión positivo. Si es posible que pierda dos electrones, se dice que está doblemente ionizado.

Los protones dentro del núcleo atómico se repelen, pero debido a la *fuerza nuclear fuerte* se mantienen en él. Sin tal fuerza toda la materia explotaría.

Es importante destacar que desde el modelo de *Rutherford-Bohr* se han desarrollado varios modelos para mejorar la descripción de los fenómenos de la materia.

De otro lado, *Murray Gell-Mann* y *George Zweig*, propusieron por separado en 1964 la hipótesis de que los protones y neutrones están compuestos por otras partículas elementales llamadas *quarks*, los cuales tendrían carga eléctrica fraccional de la del e^- . Se asume que existen seis tipos de quarks: **up** (arriba), **down** (abajo), **strange** (extraño), **charm** (encantador), **bottom** (más bajo), **top** (máximo), los cuales se denotan por la primera letra de su nombre en idioma inglés.

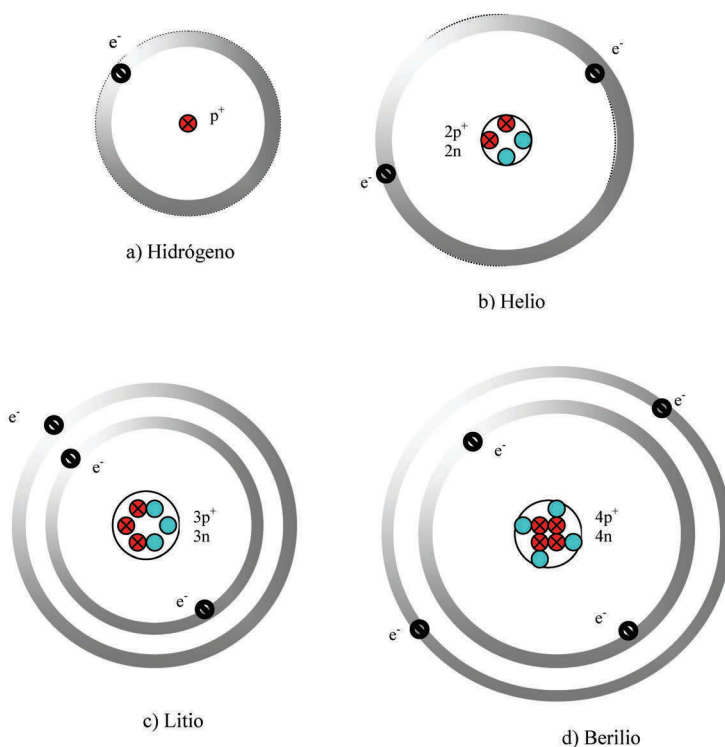


Figura 1.3. Esquema de la estructura atómica según el modelo de *Rutherford-Bohr* de los cuatro primeros elementos de la tabla periódica.

Las cargas correspondientes de estas partículas elementales son: u, ($2/3 e^+$); d ($1/3 e^-$); s, ($1/3 e^-$); c, ($2/3 e^-$); b, ($1/3 e^-$); t, ($2/3 e^+$) (8).

En la figura 1.4 se muestra esquemáticamente la posible composición tanto de un protón como de un neutrón, con base en quarks. Cabe ahora la pregunta: “¿De qué están hechos los quarks?”.

Como conclusión de lo anterior, puede afirmarse que la carga eléctrica asociada a la estructura atómica de la materia es la que define el comportamiento eléctrico de la materia, que como un todo es eléctricamente neutra.

Una nota histórica interesante

En 1949 el profesor de Física de la Universidad de Chicago, *Harvey Brace Lemon*, escribía en su libro, *Desde Galileo Hasta la Edad Nuclear* (9): “... la masa de la partícula catódica es enteramente