

## III

## LEY DE LAS ATRACCIONES Y REPULSIONES ELÉCTRICAS

Sea cualquiera la idea que se forme de la naturaleza de la electricidad, está fuera de toda duda que es una fuerza, por cuanto ocasiona movimientos de atracción y repulsión. En su consecuencia se ha deseado averiguar cuáles son las leyes de estos movimientos, ó en otros términos, en qué proporción varían las atracciones y repulsiones eléctricas cuando se hace variar, ya sea la distancia de los cuerpos electrizados frente á frente, ó ya las cantidades de electricidad de que están respectivamente cargados.

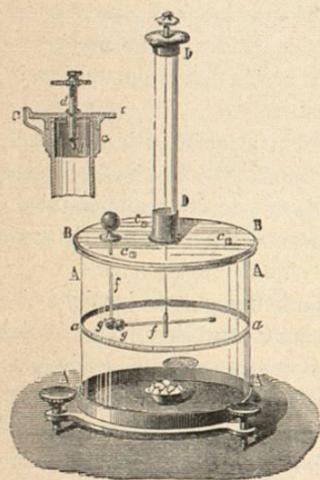


Fig. 70.—Balanza eléctrica de Coulomb

El ejemplo de Newton cuando descubrió las leyes de la atracción universal, demostrando que es proporcional á las masas y que varía en razón inversa del cuadrado de la distancia, indujo á los físicos del siglo XVIII á buscar la solución del problema por lo que atañe á la intensidad de las fuerzas eléctricas. Du Fay, Hauksbee, Muschenbroek, Æpinus y Cavendish hicieron varias tentativas más ó menos infructuosas en este sentido, hasta que Coulomb dió con la determinación experimental de las leyes en cuestión del propio modo que había dado con la de las leyes de las atracciones y repulsiones magnéticas.

Valióse Coulomb con tal objeto de un aparato análogo á la balanza magnética, construido con arreglo á los mismos principios, con idéntica disposición general, y que sólo difiere de aquella por la naturaleza de los cuerpos puestos en presencia mutua, es decir, por la naturaleza de las fuerzas cuya acción se quería medir. Dicho aparato es la *balanza eléctrica*, representado en la figura 70. El hilo de suspensión fijado en el micrómetro del aparato es un hilillo de plata que lleva en su parte inferior una aguja horizontal de goma laca *f*, terminada en uno de sus extremos en una bola conductora ó un pequeño disco vertical de papel dorado *g*, y en el otro en un contrapeso. El centro del disco está en el plano del círculo graduado del cilindro de cristal que forma la caja de la balanza; otra varilla de goma laca *f'* que termina en una bola conductora *g'* descende verticalmente en la caja cilíndrica, de modo que el centro de la bola esté en el mismo plano horizontal que el centro del disco *g* y que el plano vertical que contiene la varilla *f'*, y de manera también que el hilo de suspensión corresponda con el cero de la división del cilindro.

Véase ahora cómo se opera cuando se quiere averiguar la ley de variación de las acciones eléctricas con la distancia. Empiézase por poner al disco en contacto con la bola sin que haya torsión del hilo, pues la bola *g'* no está aún electrizada. Se saca la varilla *f'* y se electriza la bola que la termina, después de lo cual se la vuelve á meter en la caja. Al ponerse el disco de papel dorado en contacto con la bola, se carga de la misma electricidad que ella, y al punto lo desvía la repulsión á cierta distancia, que se mide por la escala graduada y que es, por ejemplo, de 36 grados. Mas al desviarse el disco se ha retorcido el hilo de suspensión, y la fuerza de torsión, que se equilibra con

la repulsiva, se mide precisamente por el ángulo de 36°, puesto que, según lo hemos visto ya en la balanza magnética, la fuerza de torsión crece proporcionalmente al ángulo de la misma torsión. Dase entonces vuelta al tambor del micrómetro del modo que el disco vaya á parar á una distancia la mitad menor, es decir, á 18°; viéndose que para esto ha sido preciso hacer que el tambor recorra un ángulo de 126°; así pues, la fuerza de torsión, ó lo que es lo mismo, la repulsión eléctrica que la equilibra, es igual á  $126^\circ + 18^\circ = 144^\circ$ . Para reducir á la cuarta parte ó sea 9° la distancia de la bola y del disco hay que girar el micrómetro 567° y entonces la repulsión equivale á  $567^\circ + 9^\circ = 576^\circ$  (1).

En resumen, cuando la distancia de dos cuerpos electrizados varía en la proporción de los números 1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ , la fuerza eléctrica varía en la de los números 36, 144 y 576, ó en la de los números 1, 4, 16, de donde se sigue esta ley:

*Las repulsiones entre dos cuerpos cargados de igual electricidad varían en razón inversa del cuadrado de la distancia.*

Demuéstrase la ley de las atracciones mediante un experimento análogo al que acabamos de describir, sólo que al principio es preciso poner la aguja de goma laca de modo que, sin que haya torsión en el hilo conductor, la bola y el disco no electrizados todavía se hallen á cierta distancia entre sí. Entonces se les electriza en sentido contrario, de lo cual resulta una atracción que acerca el disco á la bola hasta el punto en que la fuerza de torsión consiguiente equilibra la fuerza atractiva. Repítase el experimento variando la distancia y midiendo cada vez el ángulo que se ha de girar el tambor del micrómetro. El resultado es el mismo que para las acciones repulsivas, de suerte que se puede formular la ley en este enunciado general:

*Las atracciones y repulsiones eléctricas varían en razón inversa de los cuadrados de las distancias que separan á los cuerpos electrizados.*

Coulomb ha comprobado la ley de las acciones eléctricas valiéndose de otro método, el de las oscilaciones, del que ya dijimos algo (pág. 28) al describir los experimentos relativos á las atracciones y repulsiones magnéticas. Hacía oscilar una aguja de goma laca, terminada en un disco de papel dorado, ante una esfera conductora cargada de electricidad y que alejaba á varias distancias. En seguida contaba el número de oscilaciones efectuadas en un mismo tiempo, y deducía así sus duraciones. De este modo averiguó que las de aquellas son proporcionales á las distancias; pero como las fuerzas están en razón inversa de los cuadrados de estas duraciones, resulta que las acciones eléctricas están en razón inversa de los cuadrados de las distancias.

En todo cuanto precede hemos supuesto que la carga eléctrica de los cuerpos puestos en mutua presencia, cualquiera que fuese, era constante. Falta saber lo que ocurre cuando se hacen variar las cantidades de electricidad libre en los dos cuerpos que ejercen uno sobre otro una acción atractiva ó repulsiva. Mas para esto debemos definir lo que se entiende por *carga ó cantidad de electricidad*, ó para conformarnos al lenguaje científico, lo que se entiende por *masa eléctrica*.

Considerando la electricidad como un fluido difundido por todos los cuerpos ó por

(1) De los experimentos realmente efectuados por Coulomb y por los físicos que han comprobado posteriormente esta ley no resultan cifras tan rigurosamente proporcionales como las mencionadas. Las leves diferencias observadas consisten en que, durante los experimentos, las cargas eléctricas de la bola y del disco disminuyen un poco, siendo la causa de esta disminución la pérdida de la electricidad por el aire y la imperfección de las substancias aisladoras. Coulomb reducía esta causa de error poniendo en la caja de la balanza fragmentos de cal viva ó fragmentos de cloruro de calcio que absorben la humedad del aire.

la superficie de los electrizados, admítase que, si se ponen en contacto dos esferas iguales, idénticas y por consiguiente ambas igualmente conductoras, una de las cuales se haya electrizado de antemano, haya distribución igual en las dos esferas de la cantidad primitiva de electricidad (1). Sus masas eléctricas son entonces iguales: cada una de ellas no es más que la mitad de la masa eléctrica que contenía la esfera electrizada antes del contacto. Coulomb ha mostrado que esta distribución igual de la electricidad entre conductores idénticos tiene efecto también entre conductores formados con cuerpos de diferentes naturalezas. La definición de masas eléctricas dobles, triples, etc., es una consecuencia de esta definición de las masas iguales. Pues bien, Coulomb ha demostrado prácticamente con la balanza eléctrica que *las atracciones y repulsiones varían en razón del producto de las cantidades de electricidad libre, es decir, de las masas eléctricas de los dos cuerpos puestos en presencia* (2).

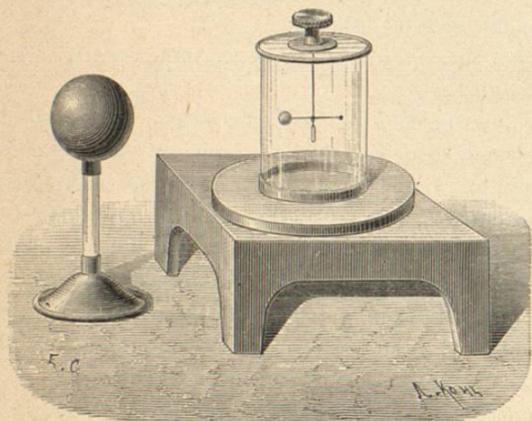


Fig. 71. — Ley de las atracciones eléctricas.  
Método de las oscilaciones

los experimentos, ó que, si varían, se tengan en cuenta estos cambios. En realidad, y según lo ha comprobado Coulomb, todo cuerpo electrizado sufre con el tiempo una atenuación progresiva de sus propiedades; la electricidad de que está cargado disminuye y acaba por desaparecer.

La razón de esto es fácil de comprender. Por más que se aisle á los cuerpos electrizados con soportes hechos de materias no conductoras, y por más que el aire que los rodea esté tan perfectamente seco como sea posible, la electricidad se comunica, se difunde merced á estos intermedios por los cuerpos vecinos, y por ellos pasa al depósito común, que es la tierra.

Y en efecto, al clasificar los cuerpos según su grado de conductibilidad, hemos visto que no hay substancia aisladora perfecta. Esta circunstancia ya entraña de por sí una

(1) Según Coulomb, no sólo hay igualdad de distribución entre dos esferas del mismo radio, sino también entre dos cuerpos conductores de cualquier forma. Pero en este caso es menester poner en contacto dos puntos tales, que haya perfecta simetría á cada lado. Si los cuerpos son medianos conductores, requiérese además que el contacto dure bastante tiempo.

(2) Esta segunda ley sería evidente de por sí si se adoptaran para las masas eléctricas las definiciones de la mecánica general, es decir, si se considerasen las cantidades de electricidad ó las masas eléctricas como proporcionales á las fuerzas; y entonces la consecuencia de los experimentos de Coulomb sería que la distribución de las electricidades entre conductores iguales ó idénticos ocurre tal y como lo admitía *à priori* este sabio físico.

pérdida de electricidad que, á la verdad, es tanto menor cuanto menos conductora sea la substancia. La goma laca, y en especial la parda, es el mejor de los cuerpos aisladores, pero se requiere que su superficie esté perfectamente seca, lo cual sólo puede suceder durante un espacio de tiempo limitado, porque dicha superficie es siempre algo higrométrica, el vapor de agua se condensa en ella y la cubre de una capa de humedad que, como nadie ignora, es un buen conductor de la electricidad. He aquí por qué ponía Coulomb cal viva ó cloruro de calcio en su balanza, á fin de que el aire contenido en la caja de cristal estuviera siempre seco.

Esto en cuanto se refiere á la pérdida de electricidad á causa de los soportes.

La de la que se disemina por el aire se puede atribuir también á dos causas. En primer lugar, los gases tienen conductibilidad propia, muy escasa si están secos, y más fuerte si cargados de humedad, pero que jamás es enteramente nula (1). En segundo lugar, las moléculas de aire inmediatas al cuerpo electrizado son atraídas hasta ponerse en contacto con éste, y luego repelidas á causa de electrizarse por el contacto. Las reemplazan otras, y así la electricidad de los cuerpos se va comunicando poco á poco al aire ambiente, es decir, se atenúa y por último se pierde.

Compréndese, pues, cuánta es la importancia de las precauciones que se han de tomar para evitar estas causas de error siempre que se trata de experimentos eléctricos un poco delicados, y con mayor motivo si se han de hacer mediciones exactas de las cantidades de electricidad. Con frecuencia se experimentan también fracasos que dependen únicamente de haber descuidado las precauciones á que nos referimos. De todos modos, hay que saber tener en cuenta las pérdidas de electricidad, para lo cual se requiere el conocimiento de las leyes de estas pérdidas. Coulomb, y luego varios físicos contemporáneos, Matteucci, Gaugain, Riess, etc., han estudiado estas leyes. Consignemos los principales resultados de sus observaciones.

Por lo que respecta á los soportes, Coulomb ha visto que se puede aislar perfectamente una bola de saúco de 10 á 12 milímetros de diámetro, sosteniéndola en un cilindro de goma laca de 1 milímetro de diámetro y de 4 á 5 centímetros de longitud. Otro tanto sucede si se la suspende de una hebra de seda muy fina ó de cristal hilado á la lámpara, con la condición de revestirlos de una capa de goma laca pura haciendo pasar estos hilos por la goma laca hirviendo.

La temperatura ejerce gran influencia en la conductibilidad de los cuerpos, por lo cual ciertas substancias que son aisladoras á la temperatura ordinaria se vuelven conductoras á medida que ésta crece. La turmalina, cuya conductibilidad es nula al principio, nos ofrece un ejemplo de ello, pues la adquiere en alto grado cuando se la calienta á 400 ó 500°, y Gaugain, que ha reconocido este hecho, ha visto que entonces la turmalina se ha vuelto muy higrométrica y que conserva esta propiedad así como la conductibilidad adquirida, aun después de enfriada. Es menester lavarla en seguida y secarla á menos de 150° para que vuelva á ser aisladora.

(1) No es dudoso el hecho de que las máquinas eléctricas funcionan con dificultad en una atmósfera que no está seca, ni de que el aire húmedo favorece la pérdida de electricidad; pero ¿es á consecuencia de la conductibilidad propia del aire húmedo? Así se ha creído y enseñado largo tiempo. Pero de los experimentos hechos de veinte años á esta parte por Du Moncel, luego por Gaugain y recientemente por Marangoni, resulta que la interpretación admitida hasta aquí era inexacta. El aire húmedo no es conductor; las pérdidas que se notan, por ejemplo en los hilos telegráficos, reconocen por causa la capa líquida que se forma en la superficie de los alambres y de los aisladores, y no la propagación directa de la electricidad al través de las capas de aire. (Véase el número del periódico *La Luz eléctrica*, del 2 de abril de 1881.)

Por lo que hace al aire ó al medio ambiente, Coulomb ha notado que la pérdida eléctrica va creciendo con el grado de humedad de este medio, puesto que es tanto mayor cuanto más considerable la carga ó la tensión eléctrica del cuerpo. Según Matteucci, la pérdida es menor en el aire agitado que en el tranquilo, independiente de la tensión entre ciertos límites cuando se opera en un gas seco y puro, de la naturaleza de los gases, y en fin de la electricidad (positiva ó negativa) para tensiones medias. La pérdida aumenta con la temperatura en el aire seco, varía con la presión y es tanto más lenta cuanto más enrarecido está el aire en que se pone el cuerpo electrizado.

## IV.

## DISTRIBUCIÓN DE LA ELECTRICIDAD EN LA SUPERFICIE DE LOS CUERPOS CONDUCTORES

Cuando se electriza un cuerpo no conductor, una barra de resina ó un cilindro de vidrio, por ejemplo, las partes que han sido frotadas ó puestas en contacto con otro cuerpo cargado de electricidad son las únicas que se electrizan. El fluido se difunde por el cuerpo lentamente, según acabamos de ver; pero si se trata de un cuerpo conductor, la difusión es instantánea en toda su extensión. Aquí cabe preguntar si la distribución

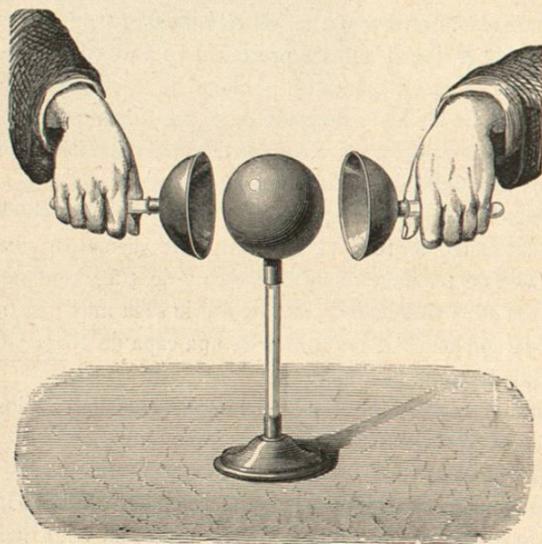


Fig. 72.—Distribución de la electricidad en la superficie de los cuerpos conductores

de la electricidad desarrollada ó comunicada tiene efecto en el interior y en el exterior del cuerpo á la vez, y en qué proporción se disemina por toda la extensión de las porciones electrizadas.

Hemos visto ya que Coulomb, poniendo en contacto dos bolas ó esferas conductoras del mismo diámetro, demostró que la carga eléctrica se distribuye por igual en los dos cuerpos cualesquiera que sean su naturaleza y densidad. Así es que la comunicación no se efectúa en razón de las masas de los cuerpos. La electricidad no penetra en el interior de éstos, sino que queda diseminada por su superficie, como lo prueban los experimentos que vamos á describir.

En uno de ellos se hace uso de una esfera aislada sobre un pie de cristal y cubierta con dos tenues casquetes hemisféricos que se mantienen en contacto con ella por medio de dos mangos aisladores. Electrízase entonces el conjunto, y luego se separa vivamente y á la vez ambos hemisferios (fig. 72). Acercando separadamente á la bola de un péndulo la esfera, y después cada casquete, se ve que éstos son los únicos electrizados, y por consiguiente la electricidad no se había difundido en un espesor mayor que el de las cubiertas.

Si se enrolla con un manubrio en un cilindro no conductor, de vidrio por ejemplo, una cinta metálica de estaño ó de hojuela de latón, que se electriza y de la cual se suspenden dos péndulos conductores (fig. 73), vese que éstos divergen cuando la cinta continúa enrollada; pero se acercan á medida que, dando vueltas al manubrio, se desenrolla la cinta, lo cual prueba que la tensión de la electricidad disminuye en razón de la extensión de la superficie siendo la misma la cantidad de electricidad. Otro experimento análogo consiste en poner en el platillo de un electroscopio de hojuelas de oro una cadena metálica á la cual se electriza (fig. 74). Las hojas de oro divergen, y en

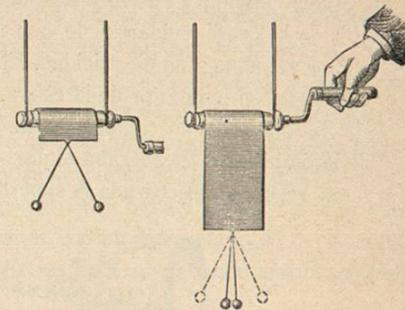


Fig. 73.—Experimento relativo á la distribución de la electricidad

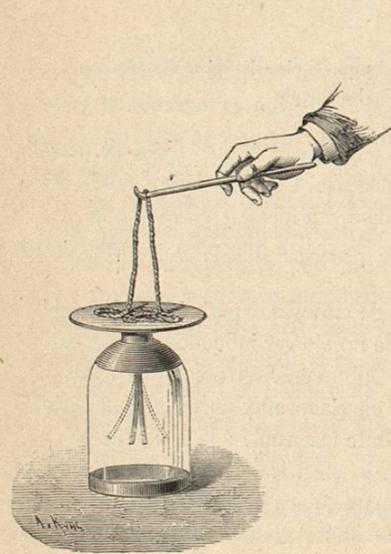


Fig. 74.—Experimento relativo á la distribución de la electricidad

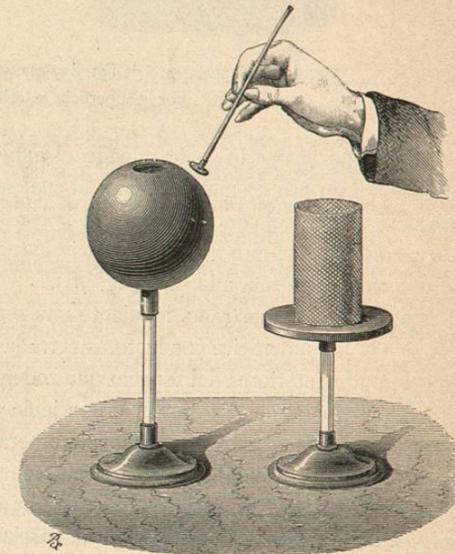


Fig. 75.—Distribución de la electricidad en la superficie de una esfera hueca, de un vaso metálico

seguida se acercan si se levanta con una varilla de goma laca la cadena metálica; y en efecto, entonces la superficie electrizada aumenta y la tensión de la electricidad disminuye, cosa inexplicable si el fluido penetrara más allá de su superficie.

Cárgase de electricidad una esfera hueca metálica, que lleva un orificio en su parte superior y está aislada sobre un pie (fig. 75). Para reconocer cómo se distribuye aquélla,

se hace uso de un pequeño disco de papel dorado provisto de un mango aislador (á lo cual se da el nombre de *plano de prueba*) y se le aplica sobre un punto cualquiera de la superficie exterior de la esfera electrizada, viéndose que atrae la bola de saúco del péndulo eléctrico. Si se toca el plano de prueba con la mano, se escapa la electricidad de que estaba cargado y vuelve á su estado natural. Si entonces se aplica dicho plano al interior de la esfera, cuidando de que no tropiece con los bordes del orificio, vese que no da señal alguna de electricidad. El resultado sería el mismo, si se empezara por hacer la prueba en el interior de la esfera. Faraday hacía el mismo experimento dando al cuerpo la forma de un cilindro de enrejado metálico (fig. 75) que ponía sobre un disco de latón aislado. Electrizaraba el disco y con el plano de prueba comprobaba que únicamente resultaba electrizada la superficie de esta especie de vasija.

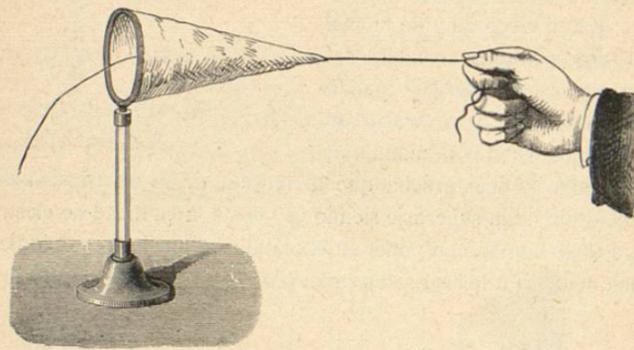


Fig. 76.—Experimento de Faraday que prueba que la electricidad se difunde por la superficie exterior de los cuerpos

El mismo ilustre físico ha ideado el experimento de la bolsa cónica de muselina, adaptada á un aro de metal aislado, al cual se electriza. Con una hebra doble de seda sujeta al vértice del cono se vuelve la bolsa de dentro á fuera, y se ve que la electricidad se difunde siempre por la superficie exterior, de suerte que pasa alternativamente de una cara de la tela á la otra (fig. 76).

Faraday ha demostrado, mediante una serie de curiosos experimentos, la propiedad que tienen las superficies conductoras cerradas de no ejercer influencia alguna eléctrica en los puntos interiores del espacio que rodean. Cubría un electroscopio de hojas de oro con una campana de tela metálica, una jaula de enrejado muy ancho, ó una canastilla, y veía que el electroscopio permanecía enteramente insensible á la acción de un cuerpo electrizado exterior y á la de la cubierta cuando lo electrizaraba con las máquinas más poderosas. Aquel físico mandó construir una cámara cúbica de 3<sup>m</sup>,60 de lado, cuyas paredes caladas cubrió de papel y con un enrejado metálico. Esta especie de jaula estaba aislada, y suspendida á este efecto de cordones de seda, y luego puesta en comunicación con una máquina eléctrica. Faraday se metió en ella provisto de electroscopios muy sensibles, y por más que electrizó la cámara hasta el punto de sacar exteriormente grandes chispas y de ver brotar por todos lados penachos luminosos, él no sintió conmoción alguna, ninguna de las impresiones que causa el fluido á toda persona electrizada, y sus electroscopios tampoco dieron señales de electrización.

Así pues, la electricidad se difunde por la superficie exterior de los cuerpos conductores, ó por lo menos, si penetra en el interior, el espesor de la capa electrizada es

sumamente tenue. Tómanse dos esferas, una maciza y metálica, otra de goma laca y dorada en su superficie, y ambas de igual diámetro; en seguida se electriza la primera y se mide la tensión, ó mejor dicho, la carga, la *densidad eléctrica* (1) con un instrumento especial llamado *electrómetro*. Si se ponen entonces las esferas en contacto, se ve que la tensión eléctrica es en cada una de ellas la mitad de lo que era al principio en la esfera metálica. Como en la esfera de goma laca el espesor de la capa eléctrica es igual al de la hoja de oro, dedúcese de aquí que este espesor no es mayor en la esfera maciza.

La densidad eléctrica no es igual en todos los puntos de la superficie de un cuerpo conductor sino en el caso en que este cuerpo sea de forma esférica. Esto se expresa diciendo que el espesor de la capa eléctrica es uniforme en él (fig. 77). En un elipsoide alargado, esta capa tiene su máximo en los extremos del eje mayor; en uno aplanado, lo tiene en toda la circunferencia del ecuador. En un disco plano, la densidad eléctrica, casi nula en el centro, va creciendo hacia los bordes, en donde alcanza su mayor



Fig. 77.—Densidad de la electricidad en los diferentes puntos de la superficie de una esfera, de un elipsoide

Fig. 78.—Densidad de la electricidad en un disco plano, en un cilindro terminado por dos hemisferios

intensidad. En un conductor que tenga la forma de un cilindro terminado en dos hemisferios, la densidad es mayor en la superficie de éstos, y nula ó poco menos en las demás partes. Las líneas puntuadas que hay alrededor de los sólidos representados en las figuras 77 y 78 indican, por sus mayores ó menores distancias á los puntos inmediatos á las superficies, cuál es la densidad eléctrica en cada uno de estos puntos.

Vese, pues, cuánta influencia tiene la forma de los cuerpos en la distribución de la electricidad en su superficie; pero en ninguna parte es tan marcada esta influencia como en las partes de los cuerpos terminados en aristas, en ángulos agudos y en puntas cónicas ó piramidales. La electricidad se acumula en estas partes y adquiere suficiente intensidad para difundirse por el medio ambiente, aun cuando no sea buen conductor. Dase á esta propiedad el nombre de *poder de las puntas*, siendo Benjamín Franklin quien la descubrió hace ya más de un siglo (2). Mencionemos el primer experimento que hizo acerca de este punto:

(1) M. Mascart hace observar con razón que es preferible emplear aquí la expresión *densidad eléctrica* en vez de la de *tensión*, para indicar "el limite de la relación de la cantidad de electricidad difundida por una pequeña superficie que comprende el punto considerado, con la extensión de esta superficie." En efecto, la palabra *tensión* se usa en electricidad en otros sentidos, por ejemplo para expresar la presión que ejerce un elemento de la superficie en el medio ambiente, en cuyo caso la tensión es proporcional al cuadrado de la densidad eléctrica, tal como acabamos de definirla. Tiene también otro sentido, y es cuando se la emplea para caracterizar las corrientes eléctricas.

(2) En una carta escrita por el célebre físico americano á P. Collinson y fechada el 1.º de septiembre de 1747, describe varios experimentos que tienen por objeto demostrar "el sorprendente efecto de los cuerpos puntiagudos, tanto para *sacar* el fuego eléctrico como para *repelerlo*." Basándose en este poder de las puntas, concibió Franklin dos años después la primera idea de los pararrayos.