



Curso de Electromagnetismo 2021-I

CARGAS ELÉCTRICAS

Introducción

El electromagnetismo permite explicarse fenómenos tan novedosos como la existencia de un tren de levitación magnética, la existencia de dispositivos como las radios o los mecanismos que intervienen en el funcionamiento de un ascensor.

Hay documentos chinos que hablan del magnetismo que datan el año 2000 AC, los griegos tienen conocimiento de las fuerzas eléctricas y magnéticas en tiempos tan antiguos como el año 700 AC. Los griegos conocían que una barra de ámbar (elektron),, frotada con un paño de seda adquiría la notable propiedad de atraer pequeños objetos. Es claro que de esta palabra viene el término electricidad y sus derivados. La palabra Magnetismo viene de la ciudad griega de Magnesia, donde se encontró por primera vez una piedra llamada imán, que tenía la capacidad de atraer trozos de hierro. Los fenómenos magnéticos y eléctricos fueron relacionados bastante después que comenzaran los estudios sobre ambos fenómenos (Hans Oersted 1819).

Cómo empezó todo:

Pasaron muchos años desde el descubrimiento de los fenómenos eléctricos hasta que la electricidad y el magnetismo tomar su forma actual, la forma en que este desarrollo se produjo y los aspectos más relevantes de las ideas que sustentan cada una de sus características es materia de la historia de la ciencia y la epistemología. Nosotros, por motivos de tiempo, daremos pinceladas de estos aspectos remitiendo al estudiante interesado a las notas bibliográficas y a los libros de la especialidad. Ahora haremos un “aproche” semi-empírico comentando sólo aspectos esenciales de la ciencia y teoría electromagnética.

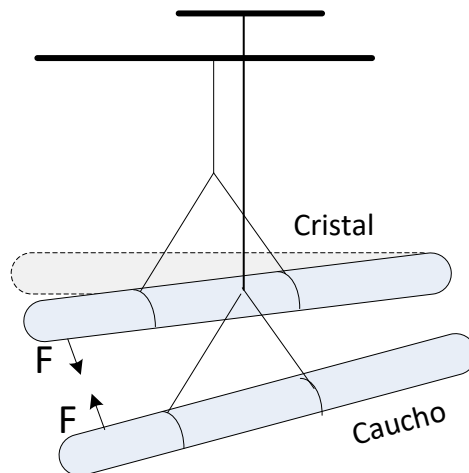
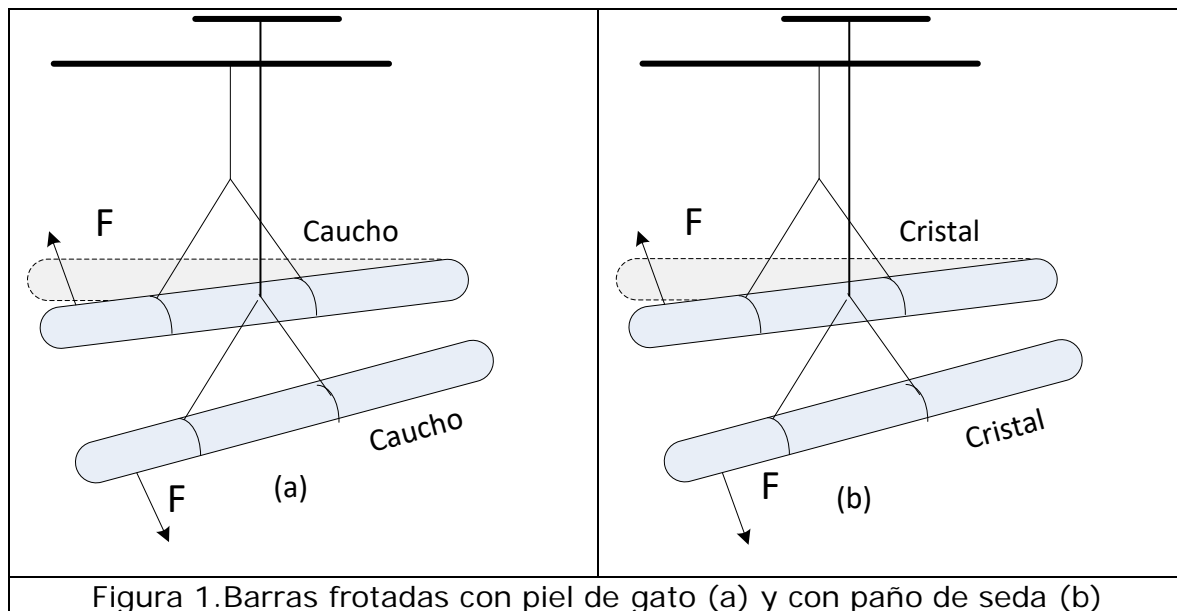
Primero se detectó que una barra de ámbar (o de caucho duro) frotada con una piel de gato podía atraer pequeños objetos. Luego se detectó la misma propiedad cuando una barra de cristal era frotada por un paño de seda. Así se desarrolló el concepto de **“carga eléctrica”** en épocas remotas todo se intentaba explicar mediante la teoría de los fluidos. Así se pensó que al frotar un cristal con un paño de seda se conseguía agregarle una cantidad de fluido, (fluido eléctrico) y que esta acción dejaba a la barra cargada de ese fluido, es decir, se postuló que la barra estaba cargada o que tenía una carga eléctrica. Lo mismo se detectó para el caso de una barra de caucho frotada con una piel de gato.

[Escriba aquí]

Experimentos combinados realizados por Benjamín Franklin (1796-1790) permitieron darle la forma final al inicio de la teoría electrostática.

Los experimentos de B. Franklin pueden resumirse de la siguiente forma: dispuso barras de cristal (2) y barras de caucho duro (2) las barras de cristal se frotaban con un paño de seda, mientras que las de caucho con una piel de gato. Suspendidas las barras con hilos delgados como se ilustra en la figura 1. Se observó que barras iguales frotadas con el mismo elemento (seda o piel de gato, siempre se repelían. En adelante supondremos que una barra de cristal siempre está frotada con un paño de seda y una barra de caucho está frotada con una piel de gato.

Mientras que si ponía en las cercanías barras de diferente material (caucho o cristal) estas siempre se atraían una hacia la otra, como se muestra en la figura 2).



[Escriba aquí]

Figura 2 barra de vidrio frotada con paño de seda, barra de caucho frotada con piel de gato.

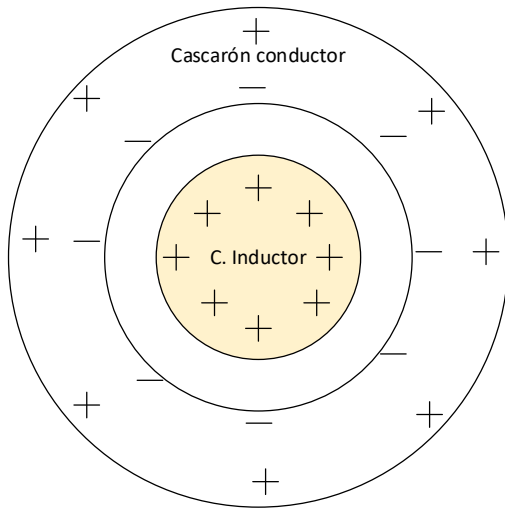
Al acercar la barra de vidrio a la de caucho se produce una fuerza de atracción entre ambas. Una forma matemática de expresar estos fenómenos es aceptar **asignar un signo a la carga que adquieren las barras frotadas**, es decir un signo a la carga de barra de cristal frotada con seda y otro diferente a la carga que adquiere una barra de caucho frotada con una piel. Los signos de las cargas han sido sugeridos de forma relativamente arbitraria por Benjamín Franklin: la barra de cristal adquiere **carga positiva** mientras que la carga de la barra de caucho es **de signo negativo**. Si la elección hubiese sido exactamente la contraria, toda la teoría eléctrica se hubiese desarrollado exactamente de la misma forma. ¿Cómo serían las fuerzas entre los cuerpos si las cargas fuesen diferentes? Justifique su respuesta.

Entonces, resulta fácil concluir que cargas de diferente signo se atraen, mientras las cargas de igual signo se repelen. Las direcciones de las fuerzas son opuestas pero las magnitudes son las mismas, de otra forma la teoría no cumpliría con el principio de acción y reacción.

La observación cuidadosa de los fenómenos recién descritos permitió determinar que un cuerpo puede cargarse por varios métodos:

- Por frotación (como el caso de las barras)
- Contacto (si pongo una barra cargada en contacto con un cuerpo descargado se “contagia una cantidad de carga desde la barra a una pequeña esferita, por ejemplo).
- Por inducción, denominaremos “inducción” a un fenómeno de carga que se produce en un cuerpo, inicialmente neutro, cercano a un cuerpo cargado, pero sin estar en contacto directo con este, cuerpo cargado hace que se produzca un reordenamiento de las cargas en el cuerpo neutro, si conseguimos que algunas de las cargas reordenadas abandonen el cuerpo inicialmente neutro, este queda con una carga la que se denomina **carga inducida**.

[Escriba aquí]



En ciertas oportunidades no se produce el abandono de ciertas cargas del cuerpo inicialmente neutro, entonces la carga inducida permanecerá mientras el cuerpo inductor esté en las proximidades del inducido. En el ejemplo de la figura el cuerpo inductor es un material no conductor cargado y está rodeado de un material conductor, las cargas positivas del cuerpo inductor atraen a las cargas negativas del conductor las que se sitúan en la superficie de este. Mientras el inductor permanezca en su posición, el

cascarón conductor tendrá cargas inducidas (negativas en el interior, positivas en su exterior).

A estas alturas del partido, aceptaremos que la mayoría de las veces los cuerpos se presentan en estado neutro, lo que no significa que no tengan cargas eléctricas, lo que ocurre es que las cargas eléctricas positivas igualan a las negativas de forma que la suma de sus cargas es cero. Así cuando frotamos, por ejemplo, con un paño de seda una barra de cristal, inicialmente neutra, el paño de seda retira cargas negativas del cristal dejándolo con un mayor número de cargas positivas. ¿Dónde se van las cargas negativas que el paño retira? En realidad, quedan en el paño de seda. Esta hipótesis (mil veces comprobada) explica completamente la fenomenología de las cargas y establece un principio que es clave en el electromagnetismo: **la carga eléctrica se conserva.**

Cuidadosos experimentos (Robert Millikant) entre los años 1901 - 1913, ha establecido que la carga no puede dividirse un número infinito de veces y la menor carga que puede obtenerse de forma libre y estable, es la carga del electrón.

Adicionalmente se estableció que el doble de cargas produce efectos doblemente más intensos, es decir los efectos de las cargas eléctricas son sumables (**principio de superposición**). El principio de superposición será intensamente usado a lo largo de este curso, tiene una expresión bastante trivial y fácil de admitir cuando por ejemplo se determina la fuerza con que una carga eléctrica atrae o repele a otra situada en sus cercanías, si duplicamos la carga en uno de los objetos cargados, resulta fácil admitir que su efecto sobre el otro se duplicará. Cuando no se trata de dos objetos cargados, sino que queremos establecer el efecto que un conjunto de cargas produce sobre otra, se determina el efecto que cada carga produce de forma individual sobre la otra, se expresa estas fuerzas

[Escriba aquí]

de forma vectorial y la acción total se calcula haciendo la suma vectorial de todas las fuerzas calculadas individualmente, esta es la expresión vectorial del principio de superposición.

Hoy en día se acepta que todos los materiales están constituidos por diminutas partículas cargadas, en un material neutro las cargas positivas son iguales a las negativas de manera que no manifiestan comportamientos eléctricos.

Los materiales, en general pueden dividirse en dos tipos: los **materiales conductores** son aquellos en los que las cargas eléctricas (generalmente las negativas) presentan gran facilidad para moverse. En esta categoría se presentan los metales como el aluminio, el cobre, el oro etc. Hay otros materiales en los que difícilmente se pueden desplazar sus cargas eléctricas a estos materiales se les llama **aisladores**. Son materiales aisladores: la porcelana, la mayoría de los plásticos, las resinas en general, el papel, la madera, el caucho, el ámbar etc.

Este modelo de la materia permite explicar, sin mayores dificultades, los fenómenos eléctricos, partiendo de los primeros que se han descubierto. Por ejemplo, ¿cómo y por qué se carga un cuerpo? Bueno, la cosa es que, como dijimos, en un cuerpo "neutro" las cargas positivas y negativas están en equilibrio, cargar un cuerpo es arreglárselas para romper ese equilibrio inicial. Hay diferentes formas de conseguirlo y las explicaremos a continuación. Ya sabemos que un cuerpo se puede cargar por hacer contacto con otro previamente cargado, esta forma de cargar un cuerpo se llama "por **contacto**". El otro método ya presentado anteriormente se llama Cargar un cuerpo "**por inducción**".

[Escriba aquí]

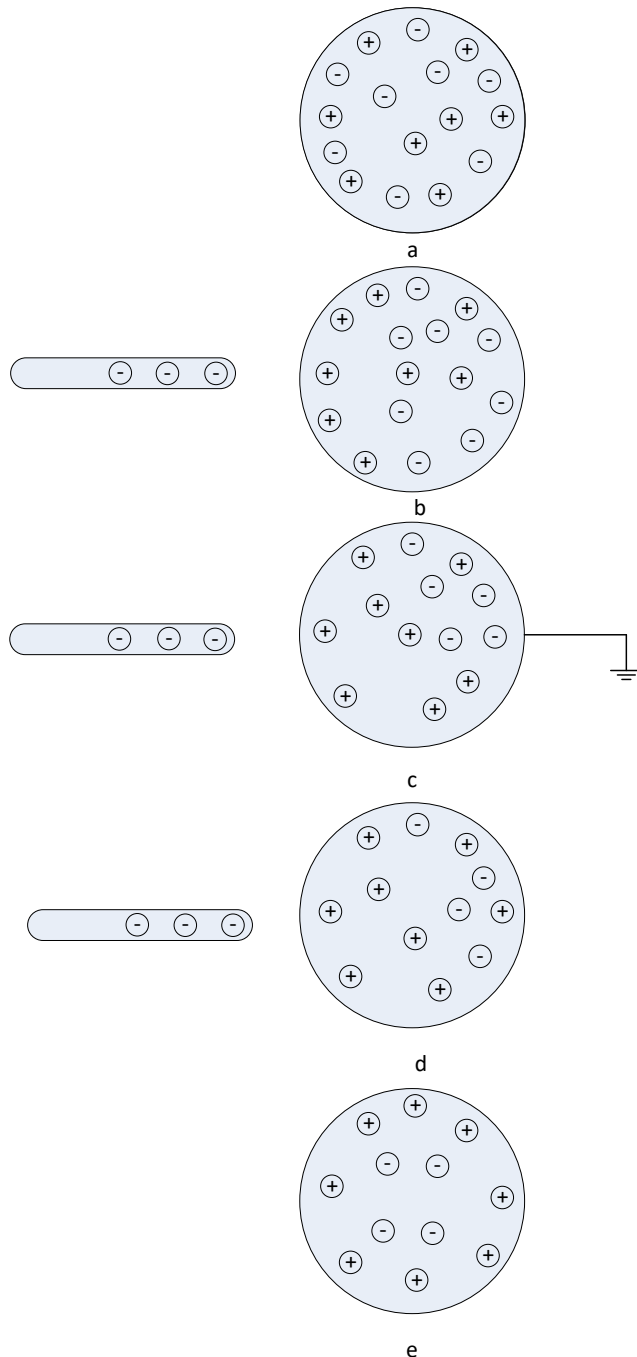


Fig. 3. Carga por inducción
Material conductor

En la figura 3 se muestra un ejemplo de carga de un cuerpo neutro con un método llamado **inducción** un material **conductor** inicialmente en estado neutro. Al inicio (a) el cuerpo tiene igual número de cargas positivas que negativas, las cargas están en equilibrio y el cuerpo presenta un estado neutro. La presencia de un cuerpo cargado (una barra frotada, por ejemplo) produce un reordenamiento de las cargas en el conductor, pero sigue en estado neutro. El proceso de carga sigue en una secuencia que se explicará a continuación:

En (a) se muestra el cuerpo en estado neutro.

En (b) se acerca una barra de caucho cargada con cargas negativas. La barra atrae a las cargas positivas pero el cuerpo sigue estando neutro, en (c) se conecta un conductor a tierra lo que facilita el desplazamiento de las cargas negativas, luego, en (d) se retira la conexión a tierra pero sin retirar la barra de caucho.

Finalmente (e) la barra de caucho es retirada de la escena

y el cuerpo queda con carga positiva, en realidad el cuerpo queda desbalanceado y prevalecen las cargas positivas porque son más que las negativas. El fenómeno de la inducción se produce en materiales **conductores** en los que los electrones (cargas negativas) se mueven con gran facilidad.

[Escriba aquí]

En los materiales aisladores se produce un fenómeno similar, los

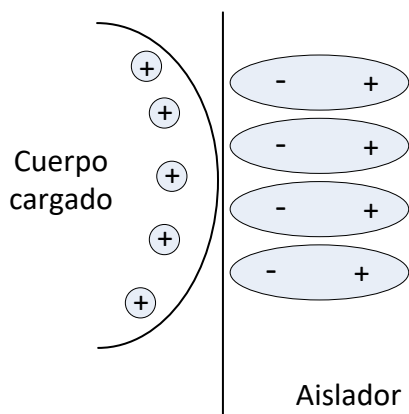


Figura 4. Carga de un aislador por inducción

aisladores están formados por dipolos (moléculas que tienen un extremo positivo y uno negativo (figura 4), en principio el cuerpo puede considerarse como un conjunto de dipolos orientados de forma azarosa. Como en cada dipolo hay igual número de cargas positivas que negativas el cuerpo presenta un equilibrio y se presenta en estado neutro. Cuando acercamos una barra cargada los dipolos se orientan según la

ley de interacción de las cargas eléctricas. La dificultad de movimiento de cargas en cuerpos aisladores hace que la asimetría en la posición de los dipolos se mantenga por un tiempo produciendo un efecto similar al de un cuerpo cargado.

Ley de Coulomb

Pronto se estableció una relación entre las magnitudes eléctricas y las mecánicas. Por supuesto, ligazón vino por el concepto de fuerza. ¿Cómo se produjo esta relación? Charles Coulomb (1736-1806) construyó una definición de carga eléctrica midiendo en Newton la fuerza que ejercían dos cuerpos pequeños (partículas) separados una cierta distancia. Las unidades que empleó fueron las que corrientemente se emplean en mecánica. El llamado sistema internacional de medidas establece que las distancias deben medirse en metros, los tiempos en segundos y las masas en kilogramos, estas unidades más las leyes de la mecánica determinaron que la unidad de fuerza fuese el Newton, $1\bar{N} = 1\left[\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\right]$. Primero Coulomb estableció los parámetros de los que dependen las fuerzas eléctricas encontrando la siguiente ley:

$$\vec{F} = \frac{k_e q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (1)$$

Las expresiones recién presentadas se explican con el esquema de la figura 5.

[Escriba aquí]

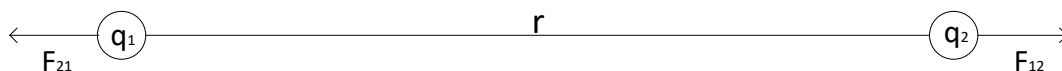


Fig.5 Dos cargas eléctricas de igual signo repeliéndose.

Es decir, las fuerzas eléctricas dependen del producto de las cargas y disminuyen con el cuadrado de la distancia que las separa, las fuerzas se manifiestan a lo largo de la línea que une las dos cargas. En la figura 6 se muestra la misma interacción pero ahora las posiciones de las dos cargas se refieren a un origen común "O".

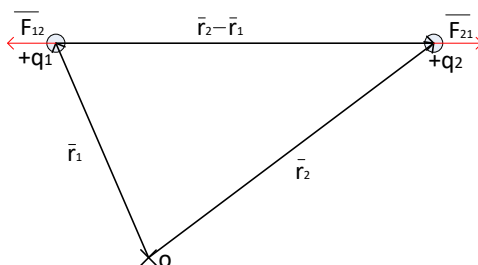


Figura 6. Dos partículas cargadas de igual signo, repeliéndose

La constante k se ha introducido por motivos dimensionales y tiene como valor:

$k_e = 8.9876 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$, en oportunidades la constante de Coulomb se pone como: $k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ el valor de la constante ϵ_0 se puede calcular a partir del valor de k_e y resulta ser: $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$, a ϵ_0 se le llama, **permitividad eléctrica del espacio libre**.

En la figura 5 se muestra la forma en que se expresa la ley de Coulomb en lenguaje vectorial; la distancia que separa las dos cargas es simplemente $|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|$, donde \vec{r}_i muestra la posición de la partícula cargada "iésima". En la ecuación (1) aparece un vector unitario que acompaña al módulo de la fuerza eléctrica que se calcula con la ley de Coulomb. Este vector unitario se determina fácilmente con la expresión: $\hat{r} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$ la dirección de este vector unitario, cambia de forma natural, si las cargas son de diferente signo.

De la expresión (1) resulta inmediato encontrar la definición de unidad de carga (Coulomb), simplemente declarando que dos esferas pequeñas de igual carga separadas 1 metro tienen la carga de 1 Coulomb cuando entre ellas se ejerce la fuerza de 1 Newton.

[Escriba aquí]

Una expresión muy usada de la ley de Coulomb expresada en términos vectoriales es:

$$\vec{F} = k_e \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|^3} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \quad (2)$$

La expresión (2) es idéntica a la (1), la dependencia de la distancia sigue siendo cuadrática sólo que para la expresión (2) se ha puesto el vector $\vec{r} = \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|}$ en función de los vectores de posición de las cargas.

Las expresiones vectoriales son muy elegantes y de fácil comprensión, pero, a veces resulta difícil cuantificar las magnitudes involucradas (distancia entre dos cargas, dirección de la fuerza etc. para facilitar esta tarea se representa los vectores en función de un sistema de +

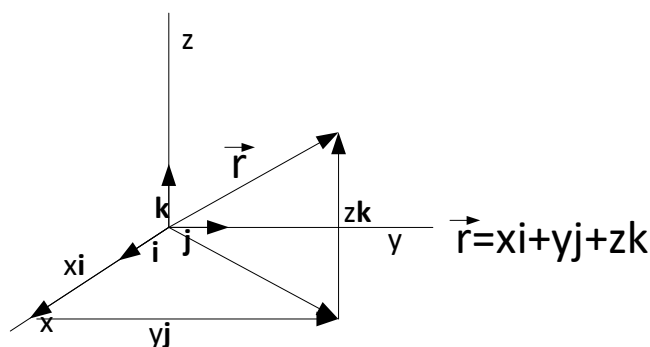


Fig.7 un vector de posición arbitrario en función de tres vectores unitarios y las coordenadas.

Así resulta fácil expresar las magnitudes vectoriales en función de números reales. Las operaciones vectoriales en términos de coordenadas y vectores unitarios se transforman en operaciones simples, por ejemplo:

$$\text{Si } \vec{a} = x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k} \text{ y } \vec{b} = x_2\vec{i} + y_2\vec{j} + z_2\vec{k}$$

$$\vec{a} \mp \vec{b} = (x_1 \mp x_2)\vec{i} + (y_1 \mp y_2)\vec{j} + (z_1 \mp z_2)\vec{k}$$

Con expresiones semejantes para $\vec{a} - \vec{b}$, la distancia entre los puntos determinados por \vec{a} y \vec{b} se calcula con la relación pitagórica:

$$|\vec{a} - \vec{b}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Ahora el lector puede poner las expresiones vectoriales que hemos presentado en términos de vectores expresados en función de las coordenadas Cartesianas y los vectores unitarios.

[Escriba aquí]

El panorama de las cargas eléctricas y sus propiedades se completa con los experimentos de Robert Millikan (1868-1953). Mediante cuidadosos experimentos estableció que las cargas eléctricas en los cuerpos siempre se presentan como múltiplos de una cantidad de carga, entonces postuló que no existe en la naturaleza una carga de menor valor que esta, esa es la carga del electrón que resultó ser de:

$$e = 1.602175 \times 10^{-19} \text{ C}$$

No se puede probar que el exponente de la ley de Coulomb sea justamente 2 pero todos los experimentos realizados hasta ahora muestran que el exponente es, 2 con una precisión de 10^{-16} . Esta es una ley experimental y por lo tanto no se puede decidir si continuará siendo válida a distancias microscópicas, comparables con las atómicas.

Coulomb descubrió además un importante principio de la electrostática; es el llamado **principio de superposición** las contribuciones de una serie de cargas se suman, como cada carga produce una fuerza, la fuerza total que produce una serie de cargas es igual a la suma vectorial de cada fuerza.