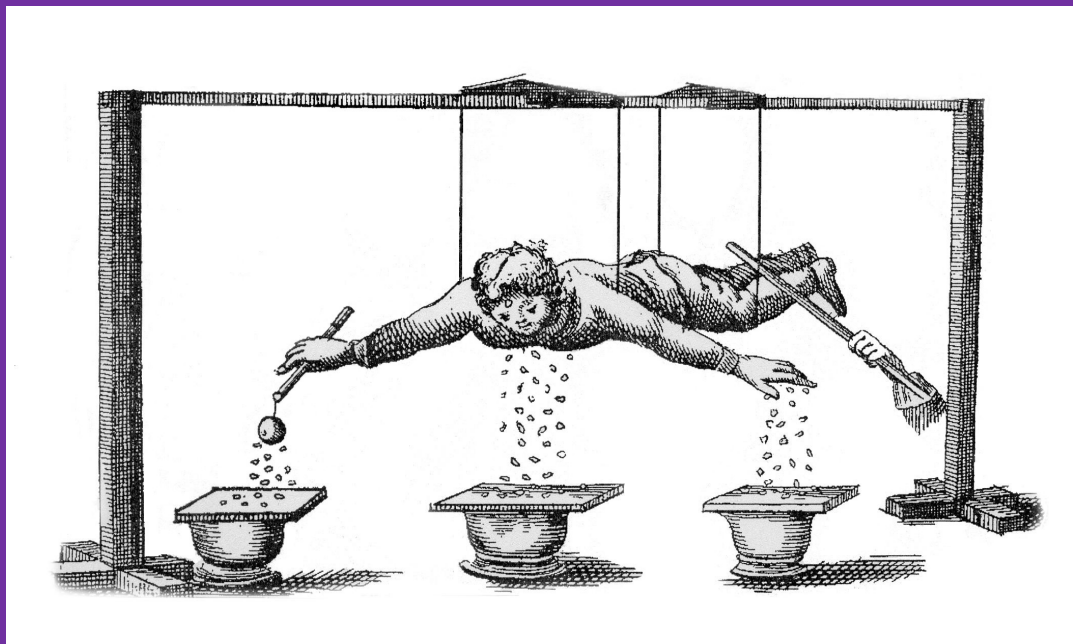


Andre Koch Torres Assis



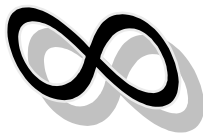
Los fundamentos experimentales
e históricos de la electricidad

Volumen I

Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad

Volumen I

Andre Koch Torres Assis



Apeiron
Montreal

C. Roy Keys Inc.
4405, rue St-Dominique
Montreal, Quebec H2W 2B2 Canada

© André Koch Torres Assis 2026
Traducido por John Plaice

Publicado por primera vez en 2026

Library and Archives Canada Cataloguing in Publication

Title: Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad / André Koch Torres Assis.

Other titles: Experimental and historical foundations of electricity. Spanish

Names: Assis, André Koch Torres, 1962- author.

Description: Translation of: The experimental and historical foundations of electricity. |

Translated by John Plaice. | Includes bibliographical references. | Contents: Volumen I |

In Spanish, translated from the English.

Identifiers: Canadiana (print) 20260256242 | Canadiana (ebook) 20260259381 | ISBN 9781987980516 (softcover ; v. 1) | ISBN 9781987980523 (PDF; v. 1)

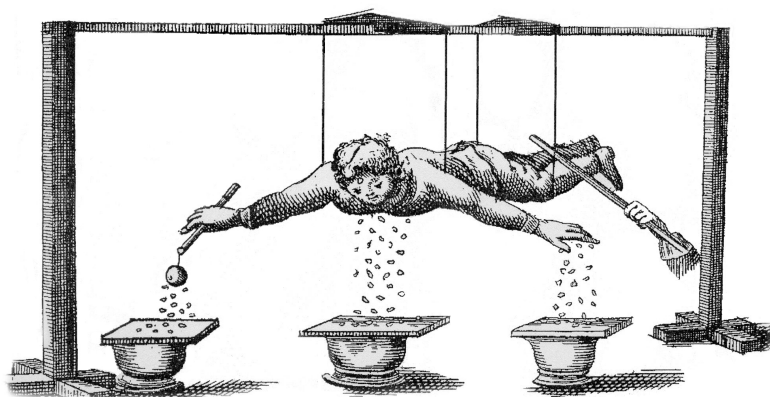
Subjects: LCSH: Electricity—History. | LCSH: Electricity—Experiments. | LCGFT: Textbooks.

Classification: LCC QC533 .A8818 2026 | DDC 537.078—dc23

Ilustración de portada: El experimento de Stephen Gray (1666-1736) con el niño suspendido (1731), tal como se representa en la obra de Johann Gabriel Doppelmayr, *Neu-entdeckte Phænomena von Bewunderwürdigen Wirkungen der Natur*, Núremberg, 1774. Un niño está suspendido de unos hilos aislantes. Se acerca un tubo de vidrio frotado a sus piernas. Las manos y el rostro del niño atraen objetos ligeros.

Ilustraciones de la contraportada: Fotos de algunos de los instrumentos descritos en este libro. Un versorio de metal. Un versorio de Du Fay de plástico, cuyo extremo de una de las patas está envuelto en papel de aluminio. Un péndulo eléctrico provisto de un disco de papel fijado a un hilo de seda atado a una pajita de plástico. Un electroscope cargado cuya tira levantada es de papel de seda. El cartón delgado del electroscope está sujeto a una pajita de plástico.

LOS FUNDAMENTOS EXPERIMENTALES E HISTÓRICOS DE LA ELECTRICIDAD



ANDRE KOCH TORRES ASSIS

Traducido por JOHN PLAICE

© Andre Koch Torres Assis

Índice general

Prefacio del traductor	vii
Presentación y agradecimientos	ix
1 Introducción	1
2 La electrización por fricción	5
2.1 Los inicios del estudio de la electricidad	5
2.2 El efecto del ámbar	7
2.3 Explorar la atracción ejercida por cuerpos frotados	10
2.4 ¿Qué cuerpos se sienten atraídos por el plástico frotado?	11
2.5 ¿Es posible atraer líquidos?	13
2.6 Gilbert y algunas de sus experiencias eléctricas	15
2.7 ¿Qué sustancias frotadas atraen a los cuerpos ligeros?	18
2.8 La nomenclatura de Gilbert: cuerpos eléctricos y no eléctricos	19
3 El versorio	23
3.1 El perpendicular de Fracastoro y el versorio de Gilbert	23
3.2 Fabricar un versorio	26
3.2.1 Versorio del primer tipo	26
3.2.2 Versorio del segundo tipo	27
3.2.3 Versorio del tercer tipo	30
3.3 Experiencias con el versorio	31
3.4 ¿Es posible cartografiar la fuerza eléctrica?	33
3.5 ¿Existe acción y reacción en la electrostática?	36
3.6 Fabry y Boyle descubren la acción eléctrica mutua	41
3.7 Newton y la electricidad	45
4 La atracción y la repulsión eléctricas	49
4.1 ¿Existe la repulsión eléctrica?	49
4.2 El experimento de Guericke con un plumón flotante	52
4.3 Du Fay reconoce la repulsión eléctrica como un fenómeno real	59
4.4 El péndulo eléctrico	61
4.5 Descarga por puesta a tierra	66

4.6	El péndulo eléctrico de Gray	68
4.7	El versorio de Du Fay	68
4.8	El mecanismo ACR	72
4.9	El hilo pendular de Gray	76
4.10	Cartografía de la fuerza eléctrica	77
4.11	Hauksbee y la cartografía de las fuerzas eléctricas	81
5	Las cargas positivas y negativas	85
5.1	¿Existe un único tipo de carga?	85
5.2	Du Fay descubre dos tipos de electricidad	95
5.3	¿Qué tipo de carga adquiere un cuerpo por fricción?	100
5.4	La serie triboeléctrica	108
5.5	¿Son igual de frecuentes las atracciones y las repulsiones?	113
5.6	Variación de la fuerza eléctrica en función de la distancia	114
5.7	Variación de la fuerza eléctrica con la cantidad de carga	116
6	Conductores y aislantes	121
6.1	El electroscopio	121
6.2	Experimentos con el electroscopio	124
6.3	¿Qué cuerpos descargan un electroscopio por contacto?	130
6.3.1	Definiciones de conductores y aislantes	131
6.3.2	Cuerpos que se comportan como conductores y aislantes en los experimentos habituales de electrostática	134
6.4	¿Qué cuerpos cargan un electroscopio por contacto?	136
6.5	Los componentes fundamentales de un versorio, un péndulo eléctrico y un electroscopio	138
6.6	La influencia de la diferencia de potencial eléctrico sobre el comportamiento conductor o aislante de un cuerpo	140
6.6.1	Sustancias que se comportan como conductores y aislantes para pequeñas diferencias de potencial	143
6.7	Otros aspectos que influyen en las propiedades conductoras y aislantes de una sustancia	144
6.7.1	El tiempo necesario para descargar un electroscopio electrizado	145
6.7.2	La longitud de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio electrizado	145
6.7.3	La sección transversal de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio electrizado	146
6.8	La electrización de un conductor por fricción	146
6.9	La conservación de la carga eléctrica	147
6.10	Gray y la conservación de las cargas eléctricas	152
6.11	Una breve historia del electroscopio y el electrómetro	153
7	Las diferencias entre conductores y aislantes	161
7.1	La movilidad de las cargas sobre los conductores y los aislantes	161
7.2	Los colectores de carga	162
7.3	La polarización eléctrica de los conductores	165

7.3.1	Aepinus y la polarización eléctrica	170
7.4	Las atracciones y repulsiones ejercidas por un cuerpo polarizado . . .	171
7.5	El uso de la polarización para cargar un electroscopio	175
7.5.1	Primer proceso de electrización por inducción	175
7.5.2	Segundo proceso de electrización por inducción	177
7.5.3	Tercer proceso de electrización por inducción	179
7.6	La polarización eléctrica de los aislantes	180
7.7	¿Un cuerpo electrizado atrae más a un conductor o a un aislante? . .	182
7.7.1	Debate sobre el péndulo eléctrico de Gray	185
7.8	Fuerzas de origen no electrostático	186
7.9	Modelos microscópicos de conductores y aislantes	187
7.10	¿Pueden atraerse dos cuerpos con cargas eléctricas de signos opuestos?	189
7.11	La conductividad del agua	194
7.12	¿Es posible electrizar el agua?	196
7.12.1	El generador electrostático de Kelvin	196
7.13	La conductividad del aire	199
7.14	¿Cómo descargar un aislante electrizado?	200
7.15	¿Un pequeño trozo de papel es atraído con mayor fuerza cuando se encuentra sobre un aislante o sobre un conductor?	203
8	Consideraciones finales	207
8.1	Cambio de nombres y significados: de cuerpos eléctricos y no eléctricos a aislantes y conductores	207
8.2	Datos sencillos y básicos sobre la electricidad	208
8.3	Descripción del efecto del ámbar	211
A	Definiciones	219
B	Stephen Gray y el descubrimiento de la conducción eléctrica	221
B.1	El generador eléctrico de Gray	222
B.2	El descubrimiento de la electrización a través de la comunicación . .	224
B.3	La exploración del descubrimiento y la revelación de la electricidad oculta de los metales	227
B.4	Gray descubre los conductores y los aislantes	229
B.5	El descubrimiento de que lo que hace que un cuerpo se comporte como conductor o aislante depende de sus propiedades intrínsecas	234
B.6	El descubrimiento de que la electrización por comunicación se produce a distancia	236
B.7	La experiencia con el niño suspendido	241
B.8	El descubrimiento de que las cargas libres se distribuyen por la superficie de los conductores	244
B.9	El descubrimiento del efecto punta	245
B.10	Conclusiones	246
	Bibliografía	249

Prefacio del traductor

Esta obra es la traducción al castellano del primer volumen del libro *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*.¹ Es el resultado de un encuentro entre el autor André Assis y yo mismo en Portugal en junio de 2025. En Sesimbra, en la conferencia *DemystifySci* organizada por Anastasia Bendebury y Michael Shilo DeLay, André hizo una presentación de las ideas de Charles-Édouard Guillaume y otros, que ya en 1896 preveían una radiación del cosmos entre 2K y 5K, décadas antes del descubrimiento por Arno Penzias y Robert Wilson de la radiación cósmica fósil.²

Sigo el trabajo de André desde hace muchos años, ya que es una de las personas que más ha contribuido a la comprensión de la historia de la investigación científica en el campo de la electricidad. Organizó la traducción al inglés y al portugués de las obras sobre la electricidad de Charles-Augustin de Coulomb, André-Marie Ampère y Wilhelm Eduard Weber.³ En los dos volúmenes de esta obra específica, André profundiza en los pasos seguidos por los primeros investigadores del siglo XVIII, con sus descubrimientos de principios básicos, que pueden demostrarse mediante sencillos experimentos realizados en casa.

Cuando nos conocimos en Portugal, André me propuso, en honor al 250.º aniversario del nacimiento de Ampère, traducir este volumen al francés. Acepté inmediatamente y añadí que también podía traducirlo al castellano. Espero, por tanto, que esta traducción al idioma de Cervantes pueda ser de utilidad para los jóvenes científicos del mundo hispanohablante.

Me gustaría dedicar la traducción de este volumen a mis difuntos suegros, José Vicente Mancilla Hernandez y Blanca Lucrecia Prada de Mancilla.

John Plaiice, Bogotá, julio de 2026

<https://johnplaiice.substack.com>

¹El primer volumen se publicó en inglés, francés, portugués, italiano y ruso: [Ass10a], [Ass10b], [Ass15], [Ass17] y [Ass26a]. El segundo volumen se publicó en inglés, francés, portugués y ruso: [Ass18a], [Ass18b], [Ass19] y [Ass26b].

²Why the CMB Is Evidence Against the Big Bang. <https://youtu.be/bboKmG0uUuU>.

³[Ass22], [AB23]; [AC11], [AC15]; [Ass21a], [Ass21b], [Ass21c], [Ass21d], [Ass24], [Ass25a], [Ass25b], [Ass25c] y [Ass25d].

Presentación y agradecimientos

A principios de la década de 1990, descubrí los trabajos de Norberto Cardoso Ferreira, del Instituto de Física de la Universidad de São Paulo (USP) en Brasil. Uno de sus campos de investigación consistía en demostrar experimentalmente los aspectos más importantes de la electricidad utilizando materiales muy sencillos y fácilmente disponibles. Tuve la oportunidad de visitarlo en la USP en 1993. Durante esa visita, me regaló un pequeño conjunto de material experimental compuesto por cartón fino, pajitas de plástico, papel de seda, tensores de papel, etc. Me enseñó a realizar los principales experimentos y también me presentó su libro *Plus et Moins : Les Charges Électriques* («Más y menos: las cargas eléctricas»).¹ Me fascinó lo que aprendí, al darme cuenta de que era posible visualizar experimentalmente fenómenos físicos muy profundos utilizando materiales fáciles de encontrar. Guardé este material como un tesoro durante 10 años, pero no lo utilicé ni desarrollé durante ese tiempo. Estoy muy agradecido a Norberto Ferreira por lo que me enseñó. Recientemente, descubrí otros trabajos de Ferreira, siempre tan ricos y creativos.² También aprendí mucho en conversaciones con sus alumnos, como Rui Manoel de Bastos Vieira y Emerson Izidoro dos Santos.

En 2005, conocí a Alberto Gaspar y descubrí su libro *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*.³ También aprendí mucho de su libro y de otras obras suyas.⁴

Entre 2004 y 2007, impartí cursos a profesores de ciencias de secundaria en el marco del proyecto «Teia do Saber» del Ministerio de Educación del Estado de São Paulo en Brasil. Fue un gran privilegio que me invitaran a participar en este proyecto. El apoyo que recibí del Ministerio de Educación y del grupo de coordinación de proyectos educativos de la Universidad de Campinas (GGPE-UNICAMP), así como los enriquecedores contactos con los profesores de ciencias de secundaria que asistieron a nuestros cursos, fueron extremadamente productivos y estimulantes para mí. También me beneficié mucho de los numerosos intercambios de ideas con los profesores de la Universidad de Campinas que participaron en este proyecto. En el marco de mis actividades, decidí enseñar a los profesores de ciencias de secundaria lo que

¹[FM91].

²[Fer78], [Fer dd], [Fer db], [Fer dc], [Fer da], [Fer06], [Fer01c], [Fer01d], [Fer01b] y [Fer01a].

³[Gas03].

⁴[Gas91] y [Gas96].

había aprendido con Norberto Ferreira. Así que retomé los experimentos con el objetivo adicional de escribir este libro, para compartir todo este fascinante material con un público más amplio.

La mayoría de los experimentos descritos en este libro se inspiran en los trabajos originales de los científicos aquí mencionados, así como en los libros y artículos de Norberto Ferreira y Alberto Gaspar. Desde 2004, descubrí otras obras impresas y sitios web interesantes que me fueron de gran utilidad en mi aprendizaje en este campo, como el sitio *Feira de Ciências*, organizado por Luiz Ferraz Netto.⁵

John L. Heilbron sugirió mejoras pertinentes en la primera versión de esta obra. Su excelente libro, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: A Study in Early Modern Physics*,⁶ fue mi principal fuente de información histórica sobre electrostática. Sérgio Luiz Bragatto Boss, John Eichler, Steve Hutcheon, Fabio Miguel de Matos Ravanelli y Bertrand Wolff también aportaron numerosas sugerencias importantes para mejorar una versión anterior de esta obra.

Las ilustraciones de este libro fueron realizadas por Daniel Robson Pinto, gracias a una beca concedida por SAE-UNICAMP, a quien agradecemos su apoyo. Daniel también contribuyó a obtener ilustraciones y referencias antiguas.

También quiero dar las gracias a otras personas por sus sugerencias, comentarios y referencias: Christine Blondel, Paolo Brenni, João José Caluzi, Juliano Camillo, Hugo Bonette de Carvalho, João Paulo Martins de Castro Chaib, Asit Choudhuri, Roberto Clemente, Junichiro Fukai, Hans Gaab, Robert Harry van Gent, Harald Goldbeck-Löwe, Jürgen Gottschalk, Peter Heering, Elizabeth Ihrig, John Jenkins, Siegfried Kett, Ellen Kuhfeld, Wolfgang Lange, Lin Liu, José Joaquín Lunazzi, Ceno Pietro Magnaghi, Eduardo Meirelles, Mahmoud Melehy, Dennis Nawrath, Marcos Cesar Danhoni Neves, Horst Nowacki, Martin Panusch, José Rafael Boesso Perez, Karin Reich, Edson Eduardo Reinehr, Ricardo Rodrigues, Waldyr Alves Rodrigues Jr., Torsten Rüting, Dirceu Tadeu do Espírito Santo, Wayne M. Saslow, Fernando Lang da Silveira, Moacir Pereira de Souza Filho, Christian Ucke, Alvaro Vannucci, Geraldo Magela Severino Vasconcelos, Greg Volk, Karl-Heinrich Wiederkehr, Bernd Wolfram y Gudrun Wolfschmidt.

Quiero expresar mi agradecimiento a los institutos de física y matemáticas, al grupo de coordinación de proyectos educativos y al Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAPEX) de la Universidad de Campinas (UNICAMP), que me brindaron el apoyo necesario para la realización de este trabajo. También agradezco al Instituto de Historia de las Ciencias Naturales de la Universidad de Hamburgo y a la Fundación Alexander von Humboldt de Alemania por concederme una beca de investigación en 2009, durante la cual recopilé una cantidad considerable de documentación bibliográfica para este libro.

Roy Keys, redactor jefe de Apeiron, me ha prestado su apoyo durante muchos años. Sin su aliento, algunos de mis libros quizá nunca hubieran visto la luz. Realizó un excelente trabajo editorial en esta obra.

⁵[Net].

⁶[Hei99].

Andre Koch Torres Assis
Institute of Physics
University of Campinas—UNICAMP
Rua Sergio Buarque de Holanda 777
13083-970 Campinas - SP, Brazil
<https://www.ifi.unicamp.br/~assis>

Capítulo 1

Introducción

Uno de los objetivos de este libro es presentar los fenómenos fundamentales de la electricidad a través de experimentos sencillos realizados con material poco costoso. Describimos experimentos sobre la atracción y la repulsión, mostramos cómo cargar cuerpos por fricción, contacto o inducción, analizamos las diferentes propiedades de los conductores y los aislantes, etc. Además, mostramos cómo se forman y modifican los conceptos teóricos durante este proceso, al igual que las leyes fundamentales que describen estos fenómenos.

A continuación, ilustramos cómo se pueden comprender y aclarar fenómenos más complejos a partir de los experimentos elementales anteriores. También se presentan algunos experimentos lúdicos y curiosos. Están diseñados para estimular la creatividad y el espíritu crítico. Algunas también tratan de relacionar fenómenos cotidianos con las leyes fundamentales de la física.

Se hace hincapié en las actividades experimentales. A partir de los experimentos, formulamos las definiciones, los conceptos, los postulados, los principios y las leyes que describen los fenómenos. El material utilizado es muy sencillo, fácil de encontrar en casa o en el comercio, y poco costoso. No obstante, nos permite realizar experimentos precisos y construir instrumentos científicos muy sensibles. Por lo tanto, el lector no necesita depender de un laboratorio escolar o de investigación, ya que construirá su propio material y realizará todas las mediciones. Para ayudarlo a alcanzar este objetivo, presentamos varios montajes diferentes para cada instrumento y varias formas de realizar las mediciones.

Otra motivación importante que teníamos en mente antes de escribir este libro era ofrecer a profesores y estudiantes las herramientas principales para alcanzar la autonomía científica. Para ello, citamos extractos de los trabajos más importantes de los científicos que realizaron grandes descubrimientos fundamentales en el campo de la electricidad. También mostramos cómo realizar experimentos que ilustran sus descubrimientos utilizando instrumentos económicos. De este modo, esperamos que los lectores adquieran independencia científica en varios aspectos: cómo construir instrumentos, cómo realizar mediciones, cómo formular conceptos y teorías para aclarar o explicar sus descubrimientos, etc.

Si los experimentos aquí presentados se realizan en clase, cada alumno debe

realizar las actividades y construir su propio material (electroscopio, versorio,¹ péndulo eléctrico). Los alumnos deben llevarse todo este material personal a casa. Este procedimiento es mucho más enriquecedor que cuando el profesor se limita a mostrar los experimentos, ya que los alumnos no suelen participar activamente. Creemos que la ciencia práctica es una de las técnicas de aprendizaje más eficaces.

Más allá de la parte experimental, esta obra también es rica en información histórica, que proporciona el contexto en el que surgieron ciertos fenómenos y leyes. También ofrece diferentes interpretaciones de los hechos observados. Se prestó especial atención a la formulación y la exposición de los conceptos y principios físicos tratados. Intentamos ser prudentes en la elección de las palabras, esforzándonos por distinguir claramente las definiciones, los postulados y los resultados experimentales. También distinguimos entre la descripción y la explicación de un fenómeno. El objetivo es ilustrar los elementos humanos y sociológicos que intervienen en la formulación de las leyes físicas. No seguimos el orden cronológico de los descubrimientos. Sin embargo, en la medida de lo posible, describimos el contexto en el que se descubrió cada fenómeno y también mencionamos a los principales científicos que participaron en ese descubrimiento. La información histórica principal que se presenta aquí se extrajo de las obras originales citadas en el texto, así como de los excelentes libros de Heilbron.² Nuestro objetivo no es presentar las diferentes explicaciones y los modelos teóricos que se propusieron a lo largo de los siglos para explicar los fenómenos eléctricos. Las obras de Heilbron constituyen una de las mejores fuentes para cualquiera que esté interesado en estos últimos aspectos.

Con el fin de limitar el tamaño de esta obra, seleccionamos algunos temas específicos que se tratarán con más detalle. En una próxima obra, esperamos abordar otros aspectos importantes de la electricidad siguiendo un procedimiento similar. Entonces trataremos las chispas y las descargas, el efecto punta, el viento eléctrico, el electroforo de Volta, la botella de Leiden, la jaula de Faraday, Gray y la conservación de las cargas eléctricas (la longevidad de la electrización de los objetos, o cómo almacenar la electricidad durante mucho tiempo), la ley de Ohm, las electrizaciones por contacto, por rodadura y por separación, los generadores de cargas, los electretos, la capacidad y la distribución de las cargas entre conductores, la electricidad atmosférica, las figuras de Lichtenberg, etc.

En la presente obra, mostramos que muchas cuestiones fundamentales de la ciencia pueden explorarse mediante experimentos, realizados con materiales muy sencillos, pero que sin embargo tienen una gran importancia histórica o conceptual. A lo largo del texto, mostramos que algunos de los científicos más importantes de la historia se interesaron por estos fenómenos que hoy en día parecen tan simples y triviales, pero que en realidad esconden misterios muy profundos.

Esta obra está destinada a profesores y estudiantes de física, matemáticas, ciencias e ingeniería. No se trata de un libro de experimentos para niños. Puede utilizarse en liceos o universidades, en función del nivel de análisis de cada fenómeno o ley. Contiene elementos experimentales y teóricos que pueden aplicarse a todos los niveles de enseñanza. Cada profesor puede elegir los elementos aquí presentados y adaptarlos

¹Véase el capítulo 3.

²[Hei79], [Hei82] y [Hei99].

a su entorno pedagógico. Esta obra también puede utilizarse en el marco de cursos de historia y filosofía de las ciencias. Algunas partes de esta obra pueden utilizarse a nivel postuniversitario o para investigaciones científicas más profundas.

La mejor manera de seguir este libro es realizar la mayoría de los experimentos aquí descritos a medida que se lee, en lugar de limitarse a leer el contenido. El enfoque preferido consiste en intentar reproducir, perfeccionar y modificar lo que aquí se propone. Aunque la física tiene muchos aspectos diferentes (filosóficos, teóricos y matemáticos), se trata esencialmente de una ciencia experimental. Es la combinación de todos estos aspectos lo que la hace tan fascinante. Esperamos que el lector disfrute realizando estos experimentos tanto como nosotros disfrutamos diseñándolos.

Me encantaría recibir comentarios de los lectores que hayan intentado reproducir y desarrollar los experimentos aquí descritos, o que hayan intentado aplicarlos en sus liceos y universidades. Yo mismo habría disfrutado mucho aprendiendo física de esta manera. En lugar de aprender varias fórmulas de memoria y pasar la mayor parte de mi tiempo resolviendo ejercicios matemáticos, habría preferido aprender física de la manera que se presenta aquí, teniendo la oportunidad de construir instrumentos y realizar diversos experimentos, aprendiendo en la práctica cómo se descubrieron e interpretaron por primera vez fenómenos importantes, y reproduciendo yo mismo la mayoría de estos efectos con materiales sencillos. También sería muy interesante explorar diferentes modelos y conceptos teóricos para explicar estos fenómenos. Este libro es nuestra contribución a la mejora de la enseñanza de la física, al igual que hicimos con el concepto del centro de gravedad y la ley de la palanca.³ Esperamos que la ciencia pueda así presentarse de una manera más concreta, rica en contexto histórico, con el fin de estimular la creatividad y el espíritu crítico de los alumnos.

Me encantaría que este libro se tradujera a otros idiomas. Sería estupendo que los profesores de física recomendaran esta obra a sus colegas y alumnos. También espero que motive a otras personas a intentar una experiencia similar en otros campos científicos, combinando experimentos realizados con material accesible e información histórica relacionada con el tema tratado.

Antes de comenzar con estos experimentos, debemos llamar la atención del lector sobre algunos puntos importantes. Normalmente, los experimentos funcionan bien en climas fríos y secos. En climas húmedos, cálidos o lluviosos, es posible que muchos de los efectos aquí descritos no se observen, o que los fenómenos sean de baja intensidad, lo que dificulta su observación. En varias ocasiones a lo largo del libro, citamos nombres genéricos de sustancias como plástico, vidrio, madera o caucho. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en realidad, existen muchas variedades de plástico, vidrio, madera, caucho o cualquier otra sustancia. Estas variedades son intrínsecamente diferentes entre sí debido a su composición, proceso de fabricación, antigüedad, etc. Por lo tanto, cuando no se observa un efecto específico con una determinada sustancia (por ejemplo, con un tipo específico de plástico), conviene repetir el experimento con otra sustancia similar para ver qué ocurre.

Las citas proceden de las obras originales y las traducciones fueron realizadas por nosotros. Las expresiones entre corchetes en medio de algunas citas son nuestras y tienen por objeto aclarar el significado de algunas frases.

³[Ass08a] y [Ass08b].

Capítulo 2

La electrización por fricción

2.1 Los inicios del estudio de la electricidad

Experimento 2.1

En el primer experimento, cortamos varios trozos pequeños de papel y los colocamos sobre una mesa. Cogemos una pajita de plástico y la acercamos a los trozos de papel, con cuidado de no tocar el papel. No ocurre nada, figura 2.1.

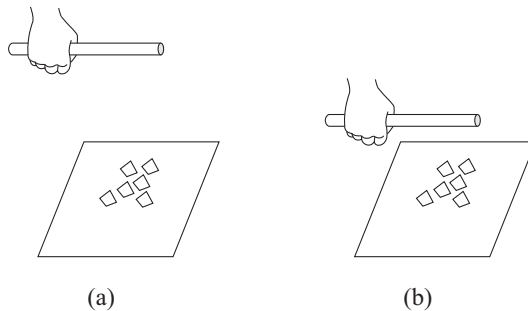


Figura 2.1: (a) Una pajita de plástico lejos de los trozos de papel. (b) Cuando se acerca la pajita de plástico a los trozos de papel, no ocurre nada.

Ahora frotamos la pajita con el cabello o una hoja de papel, moviéndola rápidamente de arriba abajo. Representamos la zona de la pajita que fue frotada con la letra F , tomada de la palabra «fricción», figura 2.2.

A continuación, acercamos la pajita frotada a los trozos de papel, sin tocarlos, manteniéndonos muy cerca. Observamos que, más allá de una cierta distancia, saltan sobre la pajita frotada y se quedan pegados a ella, figura 2.3. Cuando alejamos la pajita de la mesa, los trozos de papel permanecen pegados a ella.

No todos los trozos de papel permanecen adheridos a la pajita frotada. Algunos de ellos tocan la pajita y caen. Otros saltan sobre la mesa. Este fenómeno se abordará en las secciones 4.4 y 4.8.

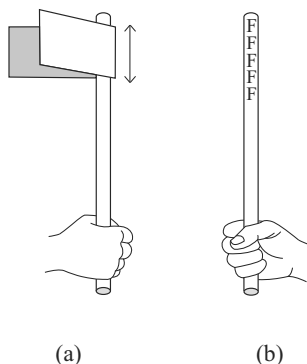


Figura 2.2: (a) Una pajita de plástico frotada con papel. (b) La letra F representa la zona frotada de la pajita.

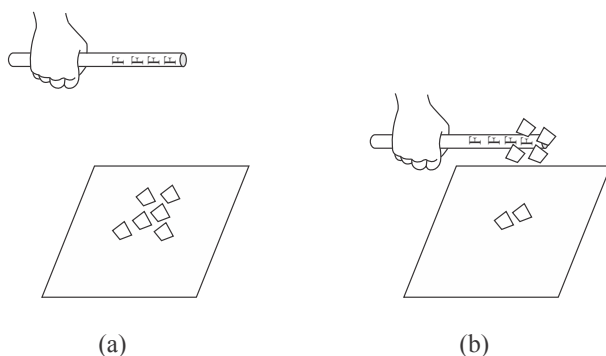


Figura 2.3: (a) Una pajita frotada lejos de pequeños trozos de papel. (b) La pajita frotada atrae los trozos de papel cuando se acerca a ellos.

Se puede realizar un experimento similar con el cuerpo de plástico de un bolígrafo, una regla de plástico o un peine de plástico. Para evitar fenómenos complejos o resultados inesperados, estos objetos deben ser únicamente de plástico, sin partes metálicas, etc. No ocurre nada cuando acercamos estos objetos a los trozos de papel, siempre que no hayan sido frotados previamente. Ahora frotamos uno de estos objetos con el cabello o en una hoja de papel. A continuación, acercamos el plástico frotado a los trozos de papel, sin tocarlos. Estos vuelven a ser atraídos por el plástico y se quedan pegados a él. Cada persona debe encontrar un plástico adecuado que, al frotarlo, atraiga fácilmente los trozos de papel. Normalmente mencionaremos las pajitas, pero también podemos utilizar reglas o peines, dependiendo de lo que haya disponible o de lo que produzca un mayor efecto.

Definiciones: Por lo general, se dice que el plástico que no fue frotado y que no atrae pequeños trozos de papel es «eléctricamente neutro» o, más simplemente, «neutro». Cuando se ha frotado, se dice que el plástico «adquirió una carga eléctrica»,

que «se electrizó», «se cargó eléctricamente» o, más simplemente, «se cargó». Este proceso se denomina «generación de carga por fricción», «generación de carga por roce», «electrización por fricción», «triboelectrización», «electrización por roce» o «electrización por fricción». Esta atracción se denomina a veces «atracción eléctrica» o «atracción electrostática».

En este experimento y en otros que se presentan en este libro, haremos referencia al roce entre un cuerpo de plástico y el cabello (o entre el plástico y una hoja de papel, o entre el plástico y un paño de papel). Para que los experimentos tengan éxito, se recomienda rodear el cuerpo de plástico con una segunda hoja de papel y sujetarlo firmemente con las manos. A continuación, movemos rápidamente el cuerpo y el papel en direcciones opuestas mientras los presionamos uno contra el otro. Por lo general, es mejor realizar este movimiento en una sola dirección para cada cuerpo, en lugar de hacer un movimiento de vaivén. Por ejemplo, podemos mover el plástico hacia nuestro cuerpo y el papel lejos de nosotros. También es útil repetir este procedimiento varias veces antes de comenzar cualquier experimento, ya que mejora los efectos observables. De vez en cuando, es útil sustituir los materiales para observar cómo varía el efecto en función de los diferentes materiales. La práctica permitirá determinar los mejores materiales y procedimientos para que el experimento tenga éxito.

2.2 El efecto del ámbar

La mayoría de nosotros realizamos un experimento similar a este cuando éramos niños o adolescentes. ¡Y fue gracias a un experimento como este que nació toda la ciencia de la electricidad! Desde al menos Platón (alrededor de 428–348 a. C.), se sabe que el ámbar frotado atrae los objetos ligeros que se colocan cerca. La mención más antigua de este hecho, a veces denominado «efecto del ámbar», aparece en su diálogo *Timeo*:¹

Es indispensable continuar examinando el fenómeno de la respiración, é indagar á qué causas debe ser tal como es hoy. Hélas aquí. Como no existe vacío que reciba los cuerpos en movimiento, es evidente que el aliento que se exhala de nuestros labios no entra en el vacío, sino que desaloja el aire vecino del punto que ocupa. Este aire desalojado empuja á su vez al aire próximo; el aire empujado así en toda su extensión y de una manera necesaria hácia el punto de donde ha salido el hálito, se precipita en él y le llena á continuación del soplo espirado; y todo este movimiento se realiza consecutivamente, semejante al de una rueda, y esto es porque no existe el vacío. [...]

No de otra manera se explica el curso de las aguas, la caída del rayo, y la maravillosa propiedad de atraer los cuerpos que tienen el ámbar y la piedra de Heráclea; porque en vano sería buscar en estos cuerpos una fuerza de atracción, sino que no existiendo el vacío, todos los cuerpos se empujan sucesivamente los unos á los otros; se dilatan, se contraen, mudan de lugar entre sí. y vuelven á él; y á causa de todas estas acciones y reacciones se verifican los fenómenos más sorprendentes, como verán cuantos sepan conducir con orden su pensamiento.

Así, pues, la respiración, volviendo á nuestro punto de partida...

¹[Pla72, pp. 244, 246].

Platón no menciona quién descubrió este hecho, pero según su descripción despreocupada, parece que el efecto del ámbar era conocido por sus lectores. Relaciona el efecto del ámbar con el de la piedra de Heracles, o imán natural. Platón rechaza la idea de que exista una verdadera atracción entre el ámbar frotado y los objetos ligeros que se encuentran cerca. Todos estos fenómenos se explican según los mismos principios que la respiración, es decir, la inexistencia del vacío.

El ámbar es una resina dura, translúcida, de color amarillento a marrón,² que a veces se utiliza en joyería. Desde el siglo XIX se sabe que se trata de la resina fósil de pinos que probablemente murieron hace varios millones de años.³ Algunas tiendas venden ámbar que contiene insectos fosilizados, como hormigas, pulgas o arañas. La figura 2.4 muestra dos trozos de ámbar.

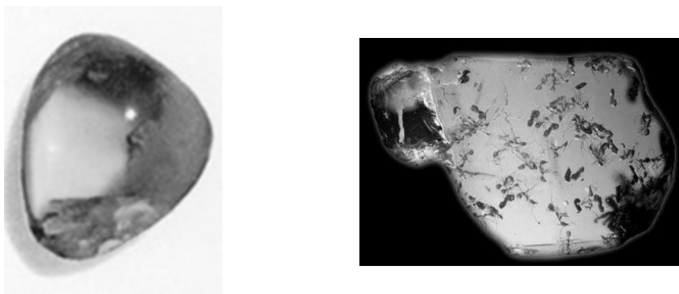


Figura 2.4: Trozos de ámbar.

Aristóteles (384–322 a. C.), en su obra *Meteorológicos*, presentó pruebas de que el ámbar existía originalmente en forma líquida y luego se solidificó:⁴

Aquellos de los <cuerpos> sólidos que se solidifican por <efecto del> frío <son> de agua, v. g.: el hielo, la nieve, el granizo, la escarcha; [...] Así, pues, aquellos de los que se evapora toda <la humedad>, como la arcilla o el ámbar, son todos de tierra (también el ámbar, en efecto, y todas las cosas que se llaman lágrimas se dan por enfriamiento, por ejemplo la mirra, el incienso, la goma; también el ámbar parece ser de este género y se forma por solidificación: en efecto, en su interior aparecen animales encerrados; el calor, al ser expulsado por el frío, como <en el caso> de la miel hervida cuando es arrojada al agua, expulsa su humedad en forma de vapor).

Según algunos autores modernos, el experimento del ámbar fue realizado por primera vez por Tales de Mileto, que vivió entre el 625 y el 546 a. C. Platón lo cita en primer lugar en su lista de los siete sabios de la Antigua Grecia en su diálogo *Protágoras*.⁵ Pero no le atribuye el efecto del ámbar. Tales es considerado por Aristóteles y varios autores antiguos como el primer filósofo naturalista o el primer físico. En su obra *Metafísica*, Aristóteles escribe sobre él (el subrayado en cursiva es nuestro):⁶

²Véase el anexo A.

³[RR53].

⁴[Ari15, Libro IV, capítulo 10, sección 388b, p. 243].

⁵[Pla71, p.64].

⁶[Ari94, Libro I, sección 983b, pp. 80–81].

De los que primero filosofaron, la mayoría pensaron que los únicos principios de todas las cosas son de naturaleza material: y es que aquello de lo cual están constituidas todas las cosas que son, y a partir de lo cual primeramente se generan y en lo cual últimamente se descomponen, permaneciendo la c[a]ntidad por más que ésta cambie en sus cualidades, eso dicen que es el elemento, y eso el principio de las cosas que son, y de ahí que piensen que nada se genera ni se destruye, puesto que tal naturaleza se conserva siempre, al igual que tampoco decimos que Sócrates «se hace» en sentido absoluto cuando se hace hermoso o músico, ni que «se destruye» cuando pierde tales disposiciones, ya que el sujeto, el mismo Sócrates, permanece: del mismo modo tampoco podrá «decirse respecto de» ninguna otra cosa, pues siempre hay alguna naturaleza, sea una o más de una, a partir de la cual se genera lo demás, conservándose aquélla.

Por lo que se refiere al número y a la especie de tal principio, no dicen todos lo mismo, sino que; *Tales, el introductor de este tipo de filosofía*, dice que es el agua (de ahí que dijera también que la tierra está sobre el agua), tomando esta idea posiblemente de que veía que el alimento de todos los seres es húmedo y que a partir de ello se genera lo caliente mismo y de ello vive (pues aquello a partir de lo cual se generan todas las cosas es el principio de todas ellas) —tomando, pues, tal idea de esto, y también de que las semillas de todas las cosas son de naturaleza húmeda, y que el agua es, a su vez, el principio de la naturaleza de las cosas húmedas.

Sin embargo, ninguna de las obras de Tales llegó hasta nosotros. El origen de todas las afirmaciones modernas que relacionan a Tales con el experimento del ámbar se encuentra en los escritos de Diógenes Laercio, que vivió alrededor del siglo III y fue biógrafo de los filósofos griegos. Su obra más importante se titula *Vidas de los filósofos más ilustres* y consta de 10 volúmenes. Sobre Tales dice lo siguiente:⁷

El primero que llamó τριαχάδα (*triacada*) la tercera década del mes; y también el primero, según algunos, que disputó de la naturaleza. Aristóteles e Hipias dicen que Tales atribuyó alma a cosas inanimadas, demostrándolo por la piedra imán y por el electro.

Normalmente, se atribuye un alma a algo que está vivo o que puede moverse por sí mismo. A veces, también se atribuye un alma a algo que puede crecer, como un hombre, una planta o un animal. Estos son los cuerpos vivos o animados. Los cuerpos inanimados, o cuerpos sin alma, son aquellos que no están dotados de vida. Aunque los imanes y el ámbar no crecen ni se mueven por sí mismos, tienen la propiedad de generar el movimiento de los objetos cercanos (como un imán que atrae al hierro o es atraído por el hierro, o un trozo de ámbar frotado que atrae la cáscara de grano). Tal vez Tales atribuyó un alma al imán o al ámbar debido a estas propiedades.

A pesar de estas declaraciones de Diógenes Laercio, es dudoso que Tales fuera realmente el primero en realizar el experimento del ámbar.⁸ Los autores posteriores lo consideran el iniciador de numerosos descubrimientos en física y matemáticas, lo que pone en duda la realidad de todos estos logros. En cuanto a la afirmación anterior, es difícil verificar las fuentes de Laercio. Los escritos de Hipias se perdieron. En

⁷[Lae92].

⁸[The56, pp. 117–118] y [RR53].

cuanto a Aristóteles, no encontramos en sus obras existentes ninguna mención a la atribución del efecto del ámbar a Tales. En su obra *Acerca del alma*, Aristóteles menciona que Tales solo atribuía un alma al imán, ya que este puede mover el hierro, pero no menciona explícitamente el efecto del ámbar:⁹

Parece que también Tales —a juzgar por lo que de él se recuerda— supuso que el alma es un principio motor si es que afirmó que el imán posee alma puesto que mueve al hierro.

Las excavaciones arqueológicas demostraron que el ámbar era conocido varios siglos antes de Platón e incluso de Tales.¹⁰ Se utilizaba en la fabricación de joyas y adornos. Es muy probable que muchas personas que trabajaban con ámbar, lo comercializaban o simplemente lo manipulaban observaran sus atractivas propiedades, probablemente varios siglos antes de Tales, aunque no existe ningún documento escrito que respalde esta hipótesis.

En cualquier caso, se sabe con certeza que, al menos desde la época de Platón, en el siglo IV a. C., el efecto del ámbar era conocido en la Antigua Grecia. En la Antigüedad, el ámbar probablemente se frotaba con paños o con el cabello o la piel de una persona o un animal. Entonces se observaba que atraía cuerpos ligeros como plumones, cáscara de grano o cabello humano.

2.3 Explorar la atracción ejercida por cuerpos frotados

Para obtener un buen nivel de neutralidad eléctrica para los próximos experimentos, es preferible utilizar al menos dos pajitas o dos reglas de plástico. Una de ellas no se frotará nunca. Será nuestra pajita neutra. La otra pajita será la que se frote una o varias veces durante los experimentos. Aunque esta segunda pajita parezca haber perdido su carga eléctrica entre dos experimentos, no debe utilizarse como pajita neutra, ya que es posible que aún conserve una carga eléctrica residual. A veces, el simple hecho de manipular una pajita o quitar el polvo acumulado en su superficie puede cargarla. Por eso, para que una pajita se considere neutra, no debe atraer los objetos ligeros que se encuentren cerca.

Experimento 2.2

Ahora repetimos el experimento 2.1 frotando la pajita de plástico con otros materiales, como una hoja de papel, la piel, un paño o una bolsa de plástico. Al acercar la pajita frotada a pequeños trozos de papel o de cáscara de grano, podemos ver que se sienten atraídos por la pajita, como en el experimento 2.1, cuando se frotaba con el cabello, pero no siempre con la misma intensidad. Una pajita de plástico se electriza mucho cuando se frota con el cabello, papel o un paño de algodón. No siempre se electriza tanto cuando se frota con una bolsa de plástico.

⁹[Ari03, Libro I, capítulo 2, sección 405a, p. 89].

¹⁰[Gui05, p. 59].

2.4 ¿Qué cuerpos se sienten atraídos por el plástico frotado?

Experimento 2.3

En esta sección, queremos responder a la siguiente pregunta: ¿qué cuerpos son atraídos por el plástico frotado? Preguntas como estas, o «¿hay repulsión?», «¿hay acción y reacción?», «¿cuántos tipos de cargas se observan en la naturaleza?», etc., se basan, por supuesto, en los conocimientos actuales. Normalmente, los primeros investigadores no se planteaban estas preguntas, o al menos no de esta forma. Estas preguntas son más bien el resultado de sus trabajos que su motivación. En cualquier caso, planteamos estas preguntas en esta obra con el fin de llamar la atención sobre las principales propiedades de las acciones eléctricas.

Ahora analizaremos qué sustancias son atraídas por un plástico frotado o por un trozo de ámbar frotado. El frotamiento puede realizarse con papel, cabello o un paño de algodón. Para ello, colocamos varios grupos de sustancias ligeras en diferentes partes de una mesa. Las sustancias pueden haberse dividido en trozos pequeños, hilos cortos o pulverizadas. Pueden ser, por ejemplo, cáscara de grano, hilos finos de algodón, trozos pequeños de bolsas de plástico, trozos pequeños de papel de aluminio (como los que se utilizan en la cocina o en los paquetes de cigarrillos), polvo de tiza, harina, limaduras de hierro, lana de acero, pequeñas bolas de poliestireno, plumón, cabello, serrín, azúcar, sal, pequeños trozos de corcho, etc.

Queremos destacar un punto importante antes de realizar estos experimentos. El objeto frotado no debe tocar las sustancias de la mesa, solo debe acercarse a ellas. Si el objeto frotado toca estas sustancias, pueden adherirse a él debido a la humedad u otras materias pegajosas en la superficie del objeto frotado o en la superficie de estas sustancias, y no debido a una atracción electrostática entre ellas.

Cuando acercamos un plástico neutro a estas sustancias, no ocurre nada. Después de frotar el plástico (o el ámbar) y acercarlo a estas sustancias sin tocarlas, se observa generalmente que casi todas son atraídas por el plástico frotado. En otras palabras, se desplazan hacia el plástico frotado y saltan sobre él. Solo los trozos pequeños de plástico no son atraídos, o lo son muy poco en comparación con la atracción observada con las demás sustancias.

Experimento 2.4

Se puede realizar un experimento similar con hilos o alambres de varias sustancias: seda, algodón, poliéster,¹¹ nailon (poliamida sintética), cabello y cobre. En las tiendas de costura se pueden encontrar bobinas de hilo de seda, algodón, poliéster y poliamida a precios económicos. El hilo de seda, en particular, se utilizará en muchos experimentos, por lo que es aconsejable comprar una bobina. En cuanto al cobre, es posible desenrollar alambres trenzados que se venden en tiendas de electricidad. Un alambre trenzado contiene varios alambres de cobre finos yuxtapuestos. En este experimento, solo utilizaremos uno de estos alambres de cobre finos, cortado en trozos pequeños que también llamaremos alambres.

¹¹Véase el anexo A.

Cortamos varios trozos de estos hilos o alambres de la misma longitud, por ejemplo, 1 o 2 cm. En un lugar de la mesa colocamos trozos de seda, en otro trozos de poliéster, y así sucesivamente. Acercamos un plástico neutro a estas sustancias y no ocurre nada. Frotamos otra pajita y la acercamos a cada uno de estos grupos de hilos, sin tocarlos. Observamos que los hilos de algodón y los alambres de cobre son fuertemente atraídos. Las otras sustancias no son atraídas o lo son mucho menos que los hilos de algodón o los alambres de cobre.

En este caso, tenemos hilos o alambres de la misma longitud pero de diferente peso, debido a las diferentes densidades y grosores de estos hilos o alambres. Sin embargo, es fácil ver que los hilos de algodón y los alambres de cobre son los más pesados debido a su mayor densidad y, en ocasiones, también a su mayor grosor. A pesar de ello, son más atraídos por el plástico frotado que las sustancias más ligeras.

En el caso de las sustancias que tienen aproximadamente el mismo peso, observamos a partir de estos experimentos que la mayoría de ellas son atraídas por el plástico frotado, aunque algunas lo son mucho más que otras. Solo unas pocas no parecen ser atraídas o muestran una atracción muy débil.

Experimento 2.5

Un experimento interesante para demostrar la atracción que ejerce el plástico frotado sobre los metales utiliza latas vacías de aluminio de cerveza o refrescos. Una de estas latas se coloca sobre una superficie lisa. Se frota una pajita de plástico y se acerca a la lata, manteniendo la longitud de la pajita paralela a la lata, a la misma altura que el eje de simetría de la lata. Cuando la pajita está muy cerca de la lata, sin tocarla, esta comienza a desplazarse hacia la pajita, figura 2.5. Incluso se puede hacer avanzar y retroceder la lata cambiando la posición de la pajita frotada, delante o detrás de la lata.

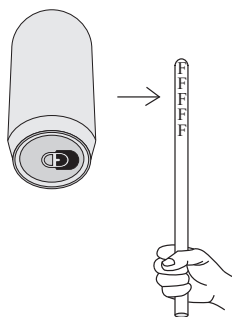


Figura 2.5: Una pajita frotada atrae una lata metálica.

Experimento 2.6

Acercamos un imán natural, como un imán de nevera o un imán de altavoz, a las sustancias descritas en los experimentos 2.3 y 2.4. Observamos que el imán solo atrae

la limadura de hierro y la lana de acero. El imán no tiene ningún efecto sobre las demás sustancias, ni siquiera sobre los alambres de cobre o los trozos de papel de aluminio.

Esta es una de las principales diferencias entre las fuerzas eléctrica y magnética. El ámbar frotado y el plástico frotado atraen casi todas las sustancias ligeras. Un imán permanente, por el contrario, solo atrae algunas sustancias: en general, solo aquellas que contienen hierro.

Las palabras «imán», «magnetismo», «magnético», etc. deben su nombre a una región llamada Magnesia, donde los antiguos griegos encontraron el mineral magnético natural llamado «magnetita», un óxido de hierro que tenía la propiedad de atraer pequeños trozos de hierro.

Experimento 2.7

Intentamos pegar un imán a una cacerola de aluminio, sin éxito. Tampoco conseguimos atraer con el imán la lata de aluminio del experimento 2.5. Esto demuestra una vez más la distinción entre las fuerzas eléctrica y magnética. También confirma que no todos los metales son atraídos por un imán, sino solo algunos tipos de metales, generalmente aquellos que contienen hierro en su composición.

2.5 ¿Es posible atraer líquidos?

Experimento 2.8

En el experimento 2.1, trabajamos con sustancias sólidas. Ahora vamos a examinar el efecto del plástico frotado sobre los líquidos. Una vez más, es preferible acercar la pajita al líquido. La pajita puede estar neutra o haber sido frotada previamente. Hay que evitar siempre que la pajita toque el líquido.

Abrimos el grifo de manera que salga un fino chorro de agua que fluye regularmente, figura 2.6 (a). Acercamos una pajita de plástico neutra al chorro de agua y no ocurre nada.

Frotamos otra pajita y la acercamos al chorro. Esta vez, el chorro se curva hacia la pajita frotada, figura 2.6 (b). Este fenómeno es más fácil de observar si se acerca la pajita frotada a la parte superior del chorro, donde la velocidad del agua es menor. A veces, la atracción es tan intensa que el chorro toca la pajita. El experimento también funciona con agua que gotea. Una vez más, el efecto es más visible cuando la pajita frotada está cerca de las gotas más lentas.

Experimento 2.9

Un fenómeno similar se produce cuando se acerca un trozo de plástico frotado a un chorro de leche, detergente, alcohol, queroseno, champú o aceite vegetal de cocina. De hecho, todos estos chorros son atraídos por el plástico frotado, pero no por una pajita que no haya sido frotada previamente. En el caso del aceite, el efecto, es decir, la curvatura del chorro, no es tan pronunciado como en el caso de los demás líquidos.

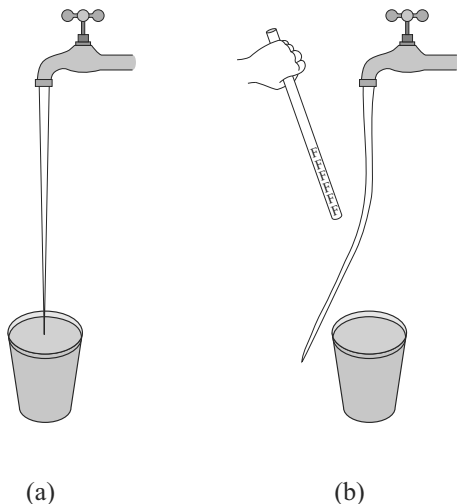


Figura 2.6: Una pajita frotada que atrae un chorro de agua.

Un experimento similar a estos parece haber sido realizado por primera vez por Jean Théophile Desaguliers (1683–1744) en 1741.¹² Al final de este artículo, Desaguliers declaró lo siguiente:¹³

Después de suspender adecuadamente (es decir, suspender mediante algún cuerpo eléctrico, en este caso tripa de gato)¹⁴ una fuente de cobre con el surtidor hacia abajo, abrí el grifo y dejé que el agua saliera a chorro en un recipiente situado debajo. A continuación, tras excitar [por fricción] un gran tubo [de vidrio] a la electricidad, lo sostuve sobre la fuente de cobre, mientras un asistente sostenía el hilo de prueba (es decir, un hilo que colgaba de un palito) cerca de varias partes del chorro, que lo atraía sensiblemente: luego apliqué el tubo frotado cerca del chorro que caía, que lo atraía con fuerza, hasta doblarlo en una curva y, a veces, hacer que se cayera del recipiente que había debajo.

Los alumnos disfrutaron de esta divertida e interesante experiencia. Se tratará con más detalle en la sección 7.11.

Experimento 2.10

Se puede realizar un experimento similar con pequeños charcos de agua colocados sobre una superficie seca. Cuando acercamos una pajita neutra al charco de agua,

¹²[Des41b, pp. 666–667] y [Pri66, p. 85].

¹³Having properly suspended (that is, suspended by some electric body, here Cat-gut) a copper Fountain with the Spout downwards, I opened the Cock, and let the Water spout into a Vessel underneath: Then, having excited [by friction] a great [glass] Tube to Electricity, I held it over the copper Fountain, whilst an Assistant held the Thread of Trial (that is, a Thread hanging from a Stick) near several Parts of the Jet, which attracted it sensibly: Then I applied the rubbed Tube near to the falling Jet, which attracted it strongly, so as to bend it into a Curve, and sometimes cause it to fall out of the Vessel below.

¹⁴Véase el anexo A.

no ocurre nada. Sin embargo, cuando acercamos un plástico frotado al agua, observamos que la superficie del agua se deforma, y las partes más cercanas a la pajita tienden a acercarse al plástico, figura 2.7. A veces, el charco de agua incluso se desliza sobre la superficie seca, desplazándose en su conjunto hacia el plástico frotado. El mismo fenómeno se produce con los demás líquidos mencionados anteriormente, en diversos grados.

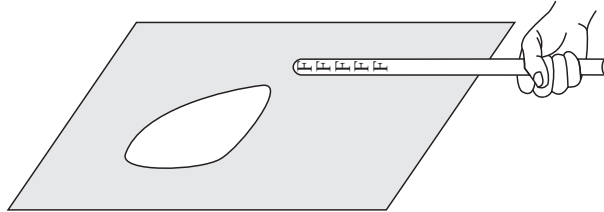


Figura 2.7: Una pajita frotada que atrae un charco de agua.

2.6 Gilbert y algunas de sus experiencias eléctricas

Uno de los científicos que inició las investigaciones modernas sobre el magnetismo y la electricidad fue William Gilbert (1544–1603), figura 2.8, un médico inglés.¹⁵



Figura 2.8: William Gilbert (1544–1603).

En 1600, publicó una obra muy importante en la historia de las ciencias, *De Magne* (Sobre el imán). En nuestro texto, trabajaremos a partir de la traducción al inglés

¹⁵[Kel81].

de P. F. Mottelay: *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*.¹⁶ En esta obra, describía numerosos descubrimientos importantes relacionados con el magnetismo. En aquella época, la orientación de la aguja magnética se explicaba por la alineación de los polos magnéticos de la aguja con los polos de la esfera celeste. Gilbert, por su parte, presentó la idea de que la Tierra es un enorme imán y que, por lo tanto, posee propiedades magnéticas. A continuación, explicó la orientación de la aguja magnética por su alineación con los polos magnéticos de la Tierra. En el segundo capítulo de su obra, Gilbert describió varios experimentos electrostáticos realizados para distinguir los fenómenos asociados a los imanes de los asociados al ámbar:^{17, 18}

De esta sustancia [el ámbar] hay que decir algunas palabras, para mostrar la naturaleza de la atracción que ejerce sobre los cuerpos y señalar la gran diferencia que existe entre ella y las acciones magnéticas; pues los hombres siguen ignorando esto y consideran que la inclinación de los cuerpos hacia el ámbar es una atracción, comparable a la unión magnética.

Llamaba «eléctricos» a los cuerpos que tenían la misma propiedad que el ámbar, nuestro énfasis en cursiva:^{19, 20}

Los griegos llaman a esta sustancia ἤλεκτρον [electrón o ámbar], porque, cuando se calienta al frotarla, atrae hacia sí la paja; [...] Estos diversos cuerpos (*eléctricos*) no solo atraen hacia sí paja y cáscara de grano, sino también todos los metales, madera, hojas, piedras, tierras, incluso agua y aceite; en resumen, cualquier cosa que atraiga a nuestros sentidos o sea sólida: sin embargo, [varios autores antiguos] nos dicen que no atrae nada más que cáscara de grano y ramitas.

O bien:^{21, 22}

Y la semejanza no es la causa de la atracción del ámbar, ya que todas las cosas que vemos en el globo, ya sean similares o diferentes, son atraídas por el ámbar y similares; por lo tanto, no se puede establecer una analogía sólida ni a partir de la semejanza ni a partir de la identidad de la sustancia.

O también:^{23, 24}

¹⁶[Gil78].

¹⁷[Gil78, p. 27].

¹⁸Of this substance [the amber] a few words must be said, to show the nature of the attachments of bodies to it, and to point out the vast difference between this and the magnetic actions; for men still continue in ignorance, and deem that inclination of bodies to amber to be an attraction, and comparable to the magnetic coition.

¹⁹[Gil78, p. 27].

²⁰The Greeks call this substance ἤλεκτρον [electron or amber], because, when heated by rubbing, it attracts to itself chaff; [...] These several bodies (*electrics*) not only draw to themselves straws and chaff, but all metals, wood, leaves, stones, earths, even water and oil; in short, whatever things appeal to our senses or are solid: yet we are told [by several ancient authors] that it attracts nothing but chaff and twigs.

²¹[Gil78, p. 28].

²²And likeness is not the cause of amber's attracting, for all things that we see on the globe, whether similar or dissimilar, are attracted by amber and such like; hence no strong analogy is to be drawn either from likeness or from identity of substance.

²³[Gil78, p. 30].

²⁴A loadstone attracts only magnetic bodies; electrics attract everything.

Una piedra imán solo atrae cuerpos magnéticos; los eléctricos atraen todo.

Gilbert parece haber sido el primero en observar que un líquido era atraído por el ámbar frotado, realizando un experimento similar al representado en la figura 2.7:^{25,26}

Es evidente que [el ámbar frotado] atrae el cuerpo mismo en el caso de una gota esférica de agua que se encuentra sobre una superficie seca; pues un trozo de ámbar mantenido a una distancia adecuada atrae hacia sí las partículas más cercanas y las eleva formando un cono; si fueran atraídas por el aire, toda la gota se acercaría al ámbar.

Las únicas excepciones a la atracción del ámbar frotado mencionadas por Gilbert eran los objetos en llamas o extremadamente enrarecidos:^{27,28}

[...] pues todos los cuerpos son atraídos por todos los elementos eléctricos, salvo los cuerpos en llamas o demasiado enrarecidos, como el aire, que es el efluvio universal del globo.

Demostró que el ámbar frotado no atrae el aire de la siguiente manera:^{29,30}

Y así se demuestra que el ámbar no atrae el aire: tome una vela de cera muy delgada que produzca una llama clara y muy pequeña; acerque un trozo ancho y plano de ámbar o azabache,³¹ cuidadosamente preparado y frotado a fondo, a una distancia de un par de dedos; ahora bien, un ámbar que atrae cuerpos desde un radio considerable no provocará ningún movimiento en la llama, aunque tal movimiento sería inevitable si el aire se moviera, ya que la llama seguiría la corriente de aire.

Más adelante, escribe:^{32,33}

²⁵[Gil78, p. 31].

²⁶It [rubbed amber] plainly attracts the body itself in the case of a spherical drop of water standing on a dry surface; for a piece of amber held at suitable distance pulls toward itself the nearest particles and draws them up into a cone; were they drawn by the air the whole drop would come toward the amber.

²⁷[Gil78, p. 29].

²⁸[...] for all bodies are drawn to all electrics, save bodies aflame or too rarefied, as the air which is the universal effluvium of the globe.

²⁹[Gil78, p. 31].

³⁰And that amber does not attract the air is thus proved: take a very slender wax candle giving a very small clear flame; bring a broad flat piece of amber or jet, carefully prepared and rubbed thoroughly, within a couple of fingers' distance from it; now an amber that will attract bodies from a considerable radius will cause no motion in the flame, though such motion would be inevitable if the air were moving, for the flame would follow the current of air.

³¹Véase el anexo A.

³²[Gil78, pp. 33–34].

³³Electrics attract all things save flame and objects aflame, and thinnest air. And as they do not draw to themselves flame, so they have no effect on a versorium if it have very near it on any side the flame of a lamp or of any burning substance; for it is plain that the effluvia are consumed by flame and igneous heat. Therefore electrics do not attract either flame or bodies near flame; for such effluvia have the virtue and analogy of rarefied humour, and they will produce their effect, bringing about union and continuity, not through the external action of humours, or through heat, or through attenuation of heated bodies, but through the attenuation of the humid substance into its own specific effluvia. Yet they draw to themselves the smoke from an extinguished candle; and the lighter the smoke becomes as it ascends, the less strongly is it attracted, for substances that are too rare do not suffer attraction.

Los elementos eléctricos atraen todas las cosas excepto las llamas y los objetos en llamas, y el aire más fino. Y como no atraen las llamas, tampoco tienen ningún efecto sobre un versorio³⁴ si tiene muy cerca, por cualquier lado, la llama de una lámpara o de cualquier sustancia en combustión; pues es evidente que los efluvios son consumidos por la llama y el calor ígneo. Por lo tanto, los eléctricos no atraen ni la llama ni los cuerpos cercanos a la llama, ya que tales efluvios tienen la virtud y la analogía del humor enrarecido, y producirán su efecto, provocando la unión y la continuidad, no a través de la acción externa de los humores, ni a través del calor, ni a través de la atenuación de los cuerpos calientes, sino a través de la atenuación de la sustancia húmeda en sus propios efluvios específicos. Sin embargo, atraen hacia sí el humo de una vela apagada; y cuanto más ligero se vuelve el humo al ascender, menos fuertemente es atraído, ya que las sustancias demasiado raras no sufren atracción.

Según lo que se pudo observar hasta ahora, no todas las sustancias se ven afectadas por el ámbar frotado (o, al menos, no todas las sustancias son atraídas con la misma fuerza). Incluso algunas sustancias con el mismo peso y forma son claramente más atraídas por un plástico frotado que otras. Por ejemplo, los hilos de algodón o los alambres de cobre del mismo tamaño sienten una atracción más fuerte que los hilos de seda o poliamida sintética.

2.7 ¿Qué sustancias frotadas atraen a los cuerpos ligeros?

Experimento 2.11

Ahora vamos a intentar atraer los trozos de papel colocados sobre una mesa. Acercamos varios objetos frotados cerca de los trozos de papel. Vamos a frotar estos objetos con el cabello, en una hoja de papel o en un paño de algodón. Es importante que los objetos sean homogéneos, es decir, que estén hechos de un solo material, para evitar resultados contradictorios. Por ejemplo, no se debe frotar un bolígrafo de plástico con piezas metálicas. En este caso, es preferible frotar por separado una pajita de plástico y una cuchara de metal.

A continuación enumeramos algunas de estas sustancias: plástico, ámbar, vidrio, madera, metal, acrílico, imán natural, cartón fino, caucho, etc.

Cuando se tomaron las precauciones mencionadas anteriormente, se observa generalmente que, después del roce, el ámbar, el acrílico y los objetos de plástico atraen los trozos pequeños de papel, como en el experimento 2.1, figura 2.3.

Todas las demás sustancias no suelen atraer los trozos de papel, independientemente de la duración o la fuerza del frotamiento. Esto se representa en la figura 2.9 para un palito de madera.

En el caso del vidrio, hay excepciones, ya que existen varios tipos de vidrio con diferentes composiciones y fabricados mediante distintos procesos. Pero, en general, después de frotarlos, los vidrios más comunes no atraen los trozos de papel. Lo mismo

³⁴Véase el capítulo 3.

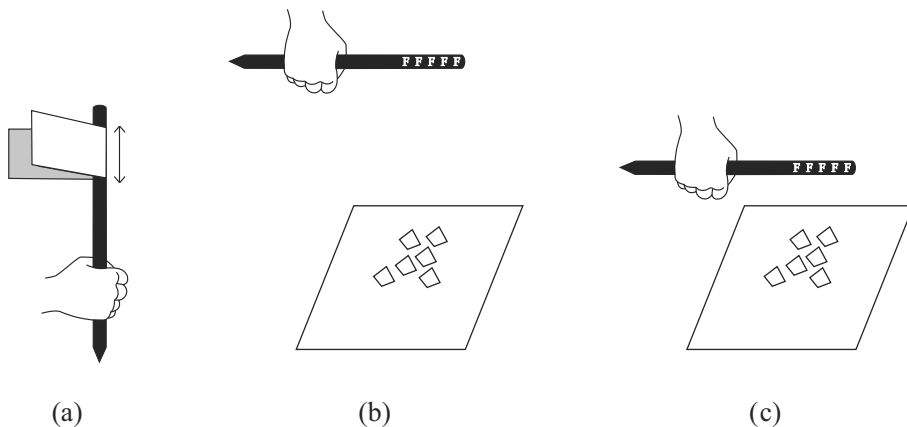


Figura 2.9: (a) Un palito de madera frotado con un paño de algodón o cabello. (b) El palito frotado lejos de los trozos de papel. (c) Observamos que no atrae los trozos de papel cuando lo acercamos a ellos.

ocurre con el caucho, ya que existen varios tipos. Los tipos de caucho que se encuentran habitualmente en el hogar no atraen los trozos de papel.

2.8 La nomenclatura de Gilbert: cuerpos eléctricos y no eléctricos

Hasta la época de Gilbert, solo se conocían unas pocas sustancias que atraían pequeños objetos después de frotarlas. Entre ellas se encontraban el ámbar, el azabache,³⁵ y el diamante. En la Edad Media se descubrió que el azabache, una forma compacta y dura de carbón, también atraía objetos como el ámbar.³⁶ El imán natural atraía el hierro y sus compuestos. Pero no atraía la paja ni la cascara de grano después de ser frotado. Las demás sustancias tampoco atraían objetos ligeros después de haber sido frotadas. Una de las principales contribuciones de Gilbert a la ciencia de la electricidad fue el descubrimiento de numerosas sustancias nuevas que se comportaban como el ámbar después de haber sido frotadas:^{37,38}

³⁵Véase el apéndice A.

³⁶[RR57, p. 546].

³⁷[Gil78, p. 27, palabras de Mottelay entre corchetes].

³⁸The ancients as well as moderns tell (and their report is confined by experience) that amber attracts straw and chaff. The same is done by jet, a stone taken out of the earth in Britain, Germany, and many other regions: it is a hard concretion of black bitumen,—a sort of transformation of bitumen to stone. [...] For not only do amber and (gagates or) jet, as they suppose, attract light corpuscles (substances): the same is done by diamond, sapphire, carbuncle, iris stone, opal, amethyst, vinctina, English gem (Bristol stone, *bristola*), beryl, rock crystal. Like powers of attracting are possessed by glass, especially clear, brilliant glass; by artificial gems made of (paste) glass or rock crystal, antimony glass, many fluor-spars, and belemnites. Sulphur also attracts, and likewise mastich, and sealing-wax [or lac], hard resin, orpiment (weakly). Feeble power of attraction is also possessed in favoring dry atmosphere by sal gemma [native chloride of sodium], mica, rock alum.

Tanto los antiguos como los modernos afirman (y su informe se limita a la experiencia) que el ámbar atrae la paja y la cáscara de grano. Lo mismo ocurre con el azabache, una piedra extraída de la tierra en Gran Bretaña, Alemania y muchas otras regiones: es una concreción dura de betún negro, una especie de transformación del betún en piedra. [...] Porque no solo el ámbar y el azabache (gagates) atraen, como se supone, los corpúsculos ligeros (sustancias): lo mismo ocurre con el diamante, el zafiro, el carbunclo, la piedra iris, el ópalo, la amatista, la vincentina, la gema inglesa (piedra de Bristol, *bristola*), el berilo y el cristal de roca. El vidrio, especialmente el vidrio transparente y brillante, posee poderes de atracción similares, al igual que las gemas artificiales hechas de (pasta de) vidrio o cristal de roca, vidrio de antimonio, muchos fluoritas y belemnites. El azufre también atrae, al igual que la mastique, la cera de sellar [o laca], la resina dura y el oropimente (débilmente). El sal gemma [cloruro de sodio nativo], la mica y el alumbre de roca también poseen un débil poder de atracción que favorece la atmósfera seca.

Las sustancias frotadas que no atraían los cuerpos ligeros se denominaban «no eléctricas». Entre estas sustancias, Gilbert citaba los metales, varios tipos de madera, el imán natural, diferentes piedras preciosas, etc. Citamos su obra:^{39, 40}

Al aire libre, los objetos calientes no pueden atraer, ni siquiera los metales o las piedras calentados a muy alta temperatura por el fuego. Una barra de hierro al rojo vivo, una llama, una vela, una antorcha encendida o un carbón al rojo vivo, cuando se acercan a pajas o a un indicador giratorio (*versorio*), no atraen; y, sin embargo, es evidente que todos ellos hacen que el aire se acerque a ellos en forma de corriente, ya que consumen aire como una lámpara consume aceite.

La siguiente lista es muy importante:^{41, 42}

Pero muchos cuerpos eléctricos (como las piedras preciosas, etc.) no atraen en absoluto a menos que se froten primero; mientras que otros cuerpos diversos, entre ellos algunas gemas, no tienen poder de atracción y no pueden atraer, ni siquiera por fricción; tales cuerpos son la esmeralda, el ágata, la cornalina, las perlas, el jaspe, la calcedonia, el alabastro, el pórfido, coral, mármoles, lapislázuuli (piedra de toque, basanita), pedernal, hematita, esmeril o corindón (*mugris*), hueso, marfil; las maderas más duras, como el ébano; algunas otras maderas, como el cedro, el enebro y el ciprés; metales, como la plata, el oro, el cobre y el hierro. La piedra imán, aunque es susceptible de un pulido muy alto, no tiene atracción eléctrica.

³⁹[Gil78, p. 28].

⁴⁰In open air, heated objects cannot attract, not even metals or stones brought to a very high temperature by fire. For an iron rod at white heat, a flame, a candle, a flaming torch, or a red-hot coal when brought near to straws or to a revolving pointer (*versorium*) does not attract; and yet plainly all these cause the air to come to them in a current, for they consume air as a lamp consumes oil.

⁴¹[Gil78, p. 29].

⁴²But very many electric bodies (as precious stones, etc.) do not attract at all unless they are first rubbed; while sundry other bodies, and among them some gems, have no power of attraction, and cannot be made to attract, even by friction; such bodies are emerald, agate, carnelian, pearls, jasper, chalcedony, alabaster, porphyry, coral, the marbles, lapis lydius (touchstone, basanite), flint, bloodstone, emery or corundum (*mugris*), bone, ivory; the hardest woods, as ebony; some other woods, as cedar, juniper, cypress; metals, as silver, gold, copper, iron. The loadstone, though it is susceptible of a very high polish, has not the electric attraction.

Del mismo modo:^{43,44}

Por esta razón, ni los metales, ni los mármoles, ni los pedernales, ni las maderas, ni las hierbas, ni la carne, ni otras sustancias diversas pueden atraer o solicitar un cuerpo, ya sea magnética o eléctricamente (pues nos complace llamar fuerza eléctrica a aquella fuerza que tiene su origen en los humores). Pero los cuerpos que consisten principalmente en humores y que no están firmemente compactados por naturaleza, por lo que no soportan la fricción, sino que se desmoronan, se ablandan o se vuelven pegajosos, como la brea, la colofonia blanda, el alcanfor, el gálbano, el amoniaco, el estoraque, el asa, la goma benjamín y el asfalto (especialmente en un ambiente cálido), no atraen los corpúsculos. Porque sin fricción pocos cuerpos emiten su verdadera *emanada* y efluvio eléctricos naturales. La resina de trementina en estado líquido no atrae, porque no se puede frotar; pero cuando se endurece y se convierte en masilla, sí atrae.

Varias palabras que se utilizan hoy en día tienen su origen en la palabra ámbar (o «electron» en griego): eléctrico, electrón, electricidad, electreto, electrónica, electricista, electroimán, electrodo, etc. Originalmente, la palabra «electricidad» se refería a la propiedad o el poder de atraer cuerpos ligeros, como ocurría con el ámbar frotado.⁴⁵ Esta palabra apareció por primera vez en una obra impresa de Sir Thomas Browne (1605–1682) en 1646. En 1820, Ørsted introdujo los términos «electromagnetismo» y «electromagnético», mientras que en 1822 Ampère introdujo los términos «electrostática» y «electrodinámica».⁴⁶

Gilbert llamaba «eléctricos» a todos los cuerpos que atraían sustancias ligeras después de haber sido frotados, aunque esta nomenclatura ya no se utiliza en la actualidad. Las razones de este cambio de nomenclatura se explican en los capítulos 6 y 8 y en el anexo B. Para facilitar la comprensión de varias citas históricas que aparecerán en este libro, es importante saber que estos materiales se clasifican ahora como «aislantes» y «conductores». Los aislantes también se denominan «no conductores» o «dieléctricos». Las sustancias que Gilbert clasificaba como eléctricas se denominan ahora aislantes. Y las sustancias que antes se clasificaban como no eléctricas se denominan ahora conductoras.

⁴³[Gil78, p. 30].

⁴⁴For this reason it is that neither metals, marbles, flints, woods, grasses, flesh, nor various other substances can attract or solicit a body, whether magnetically or electrically (for it pleases us to call electric force that force which has its origin in humours). But bodies consisting mostly of humour and not firmly compacted by nature wherefore they do not stand friction, but either fall to pieces or grow soft, or are sticky, as pitch, soft rosin, camphor, galbanum, ammoniacum, storax, asa, gum benjamin, asphaltum (especially in a warm atmosphere), do not attract corpuscles. For without friction few bodies give their true natural electric *emanation* and efluvium. Turpentine resin in the liquid state does not attract, because it cannot be rubbed; but when it hardens to a mastic it does attract.

⁴⁵[RR57, p. 558], [Hea67], y [Hei99, p. 169].

⁴⁶[Amp22, p. 60], [Ørs98a, p. 421], [Ørs98b, p. 426], [Blo82, p. 78], [GG90, p. 920], [GG91, p. 116], y [Cha09, pp. 24–26].

Capítulo 3

El versorio

3.1 El perpendiculo de Fracastoro y el versorio de Gilbert

Ahora hablaremos del instrumento eléctrico más antiguo. Fue creado por Girolamo Fracastoro (1478–1553), figura 3.1. Algunos lo llamaban Fracastoro, otros Fracastorio.¹ Era poeta, médico y filósofo en Verona. Fracastoro es conocido sobre todo por sus trabajos sobre medicina, en particular sobre epidemiología. Dio el nombre de «sífilis» a una enfermedad venérea conocida.



Figura 3.1: Girolamo Fracastoro (1478–1553).

Su instrumento se presentó por primera vez en una obra publicada en 1546.² Lo

¹[Ben98, p. 241].

²[Gli33] y [Hei99, p. 175].

utilizó para demostrar que el ámbar frotado no solo atrae la paja y la cáscara de grano, sino también otro trozo de ámbar e incluso un metal como la plata. También descubrió que el diamante tiene la propiedad de atraer sustancias ligeras después de haber sido frotado, al igual que el ámbar. Fracastoro describe su nuevo instrumento en estos términos:³

De hecho, en presencia de varios de nuestros médicos, realizamos numerosos experimentos con un «perpendicular» bien adaptado, como en una brújula de navegación, y vimos claramente que el imán atrae al imán, el hierro [magnetizado atrae] al hierro, ya que el imán atrae al hierro y el hierro atrae al imán; y además, el ámbar [frotado] atrae los pequeños trozos de ámbar... y del mismo modo, el ámbar [frotado] no solo atrae hacia sí las ramitas y la paja, sino también la plata.

Cuando escribe «perpendicular», Fracastoro quizá se refiera a una plomada,⁴ es decir, un pequeño objeto suspendido de un soporte por un hilo vertical, como un péndulo. El hilo puede moverse libremente en todas las direcciones alrededor del punto al que está sujeto. La palabra «perpendicular» está relacionada con «perpendicular», que significa una línea recta perpendicular al horizonte. Una plomada se utiliza para indicar una dirección vertical. Por lo tanto, es natural suponer que el perpendicular de Fracastoro era similar a una plomada.

Según la descripción anterior, deducimos que Fracastoro fijaba un pequeño trozo de ámbar o plata al extremo del hilo. Cuando acercaba un trozo de ámbar frotado al perpendicular, observaba que este se desviaba de la dirección vertical para acercarse al ámbar frotado, figura 3.2. La ventaja del perpendicular con respecto a la paja o la cascara de grano es que la tensión del hilo contrarresta el peso del cuerpo suspendido. De este modo, es fácil observar su movimiento en sentido horizontal, incluso con una fuerza de atracción débil. Por el contrario, si el pequeño trozo de ámbar o plata se hubiera colocado sobre una mesa, habría sido más difícil observar o detectar cualquier movimiento debido a su peso. En otras palabras, habría sido difícil ver su movimiento vertical hacia un trozo de ámbar frotado colocado cerca.

Gilbert conocía la obra de Fracastoro y la citó en varias ocasiones en su libro:^{5,6}

³ « Nos enim praesentibus multis è nostris medicis experientiam multorum fecimus, perpendiculari bene & concinne aptato, quale est in nauigatoria pyxide, ac manifeste vidimus magnetē trahere magnetē, ferrum ferrū, tum magnetem trahere ferrum, ferrum magnetem porrò electrum parua electri frustula rapere, argentum attrahere argentum, &, quod valde inirati fuimus, magnetem vidimus argentum trahere: item Electrum non solum surculos & paleas mouere ad se, sed & argentum.» [Fra55, p. 85 verso]. En italiano: «Noi infatti alla presenza di molti dei nostri medici facemmo esperienza di molte cose con un perpendicolo bene e convenientemente adattato come è nella bussola da navigare e vedemmo manifestamente che il magnete attrae il magnete, il ferro il ferro, poi che il magnete attrae il ferro e il ferro il magnete; e ancora, l'ambra rapisce pezzettini d'ambra... e parimenti l'ambra non avvicina solamente a sè i fuscilli e le pagliuzze, ma anche l'argento.» [Gli33].

⁴ [Sas02].

⁵ [Gil78, pp. 28–29].

⁶ Fracastorio thinks that all bodies that mutually attract are alike, or of the same species, and that, either in their action or in their proper *subjectum*: “Now the proper *subjectum*,” says he [Fracastoro], “is that from which is emitted that emanational something which attracts, and, in mixed substances, this is not perceptible on account of deformation, whereby they are one thing *actu*, another *potentia*. Hence, perhaps, hairs and twigs are drawn to amber and diamond not because they are hairs, but because there is imprisoned within them either air or some other principle that is first attracted and that has reference and analogy to that which of itself attracts; and herein amber and diamond are as one, in virtue of a principle common to both.” So much for Fracastorio.

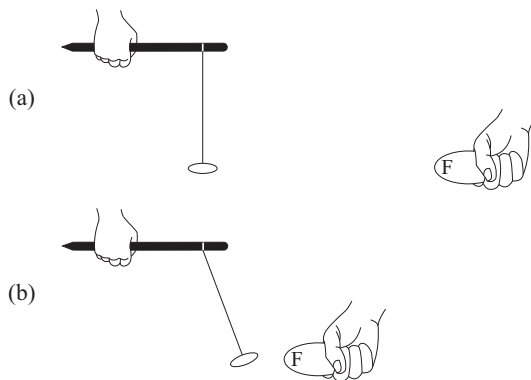


Figura 3.2: Posible representación del perpendicular de Fracastoro y del experimento que podría haber realizado con este instrumento. (a) La mano sostiene un trozo grande de ámbar. La parte frotada de este ámbar se representa con la letra F . En el extremo inferior del perpendicular hay otro trozo pequeño de ámbar o plata que no fue frotado. Cuando el trozo grande de ámbar se aleja del perpendicular, el hilo permanece en reposo en posición vertical. (b) El perpendicular es atraído cuando el ámbar frotado F se acerca al trozo pequeño de ámbar o plata.

Fracastorio cree que todos los cuerpos que se atraen mutuamente son iguales, o de la misma especie, y que, ya sea en su acción o en su propio *subjectum*: «Ahora bien, el *subjectum* propio», dice él [Fracastorio], «es aquello de lo que emana ese algo emanado que atrae y, en las sustancias mixtas, esto no es perceptible debido a la deformación, por lo que son una cosa *actu* y otra *potentia*. Por lo tanto, tal vez los pelos y las ramitas se sienten atraídos por el ámbar y el diamante no porque sean pelos, sino porque hay aprisionado en ellos aire o algún otro principio que es atraído primero y que tiene referencia y analogía con aquello que por sí mismo atrae; y en esto el ámbar y el diamante son uno, en virtud de un principio común a ambos». ¡Qué tontería de la parte de Fracastorio!

Probablemente, Gilbert comenzó a estudiar las propiedades atractivas de otras piedras preciosas después de estudiar este libro de Fracastorio. Gilbert también describe un instrumento al que llamó «versorio»,⁷ aunque no mencionó que Fracastorio había inventado un instrumento similar, el «perpendicular». La imagen original de este instrumento de Gilbert se muestra en la figura 3.3.

El nombre «versorio» proviene de una palabra latina que significa «girar» o «dar vueltas sobre sí mismo». El versorio es un instrumento que suele constar de dos partes: un elemento vertical, que sirve de soporte, y un elemento horizontal sostenido, capaz de girar libremente alrededor del eje vertical definido por el soporte. En este sentido, se parece mucho a una brújula clásica, con la diferencia de que el elemento horizontal no está imantado como en una brújula. Conceptualmente, la capacidad del elemento horizontal para girar libremente significa que es muy sensible a pares externos extremadamente débiles y, por lo tanto, puede utilizarse para detectarlos, de la

⁷[Gil78, pp. 27–28].



Figura 3.3: El versorio de Gilbert.

misma manera que una brújula detecta el par magnético de la Tierra.

En reposo, apunta en una dirección horizontal arbitraria (puede apuntar en dirección este-oeste, por ejemplo, o hacia un árbol).

3.2 Fabricar un versorio

Hay tres formas diferentes de construir un versorio.

3.2.1 Versorio del primer tipo

El versorio del primer tipo es similar al de Gilbert. Se puede construir fijando un alfiler, un palillo de dientes o un clavo, con la punta hacia arriba, sobre una base rígida. La base debe ser pesada o estar fijada a una mesa para evitar que el instrumento se caiga. El soporte vertical puede ser un tapón de corcho con un alfiler, un palillo de dientes clavado verticalmente en plastilina o una tabla delgada con un clavo. El único requisito es que el soporte permanezca fijo con respecto al suelo, mientras que la parte horizontal puede girar libremente en un plano horizontal por encima del eje vertical formado por el soporte. La parte horizontal móvil se sostiene en su centro por la punta del alfiler.

Es importante señalar que, para evitar que la parte móvil se caiga, es esencial que su centro de gravedad se encuentre por debajo del punto de contacto entre esta y la punta del soporte vertical. En el libro *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics* se ofrece una descripción detallada del centro de gravedad (CG) y de los procedimientos experimentales para determinarlo.⁸

Hay varias formas de colocar el CG de una parte móvil debajo de su punto de contacto con el alfiler. Por ejemplo, la parte móvil puede tener la forma de una letra V invertida, o su centro (que estará en contacto con el alfiler) puede curvarse hacia arriba de tal manera que, cuando se coloca sobre el alfiler, la punta de este se encuentre por encima del plano de la parte móvil plana. Se puede fabricar una pieza móvil sencilla a partir de un tensor de papel hecho de latón o acero. En este caso, es preferible doblar ligeramente el centro de la base circular del tensor de papel. Esta parte doblada quedará sostenida por el alfiler. Para doblar el tensor de papel, utilizamos un clavo y un martillo, pero con cuidado, sin perforar la parte superior del tensor de papel, doblándolo ligeramente para crear una pequeña hendidura. La parte móvil quedará sujeta por esta parte doblada colocada en la punta del alfiler, de modo que no se deslice. Una

⁸[Ass08a] y [Ass08b].

vez que las patas del tensor de papel se doblaron hacia abajo para formar una letra *V* invertida, el tensor de papel se puede colocar en el alfiler.

La parte móvil también se puede fabricar con una tira de aluminio (que se puede obtener cortando una lata de refresco), una pajita seca, madera, cartón fino o un trozo de plástico (una tira de plástico duro). Lo importante es dar a la parte móvil la forma de una *V* invertida. El plástico duro también se puede doblar de manera que las dos patas queden orientadas hacia abajo. Cuando la parte móvil se coloca sobre el alfiler, es importante comprobar que puede girar libremente en sentido horario y antihorario en un plano horizontal, sin deslizarse ni pegarse debido a la fricción con el alfiler. Entonces estará lista para los experimentos.

El versorio del primer tipo se muestra en la figura 3.4. En (a) tenemos la base del versorio (en este caso, un alfiler fijado en un tapón de corcho). La parte móvil se muestra en la figura 3.4 (b). En este caso, se trata de un tensor de papel de acero visto desde arriba y de lado, cuyo centro de la cabeza está ligeramente curvado y las patas inclinadas hacia abajo. El versorio completo, montado con el centro del tensor de papel colocado en la punta del alfiler, se muestra en la figura 3.4 (c).

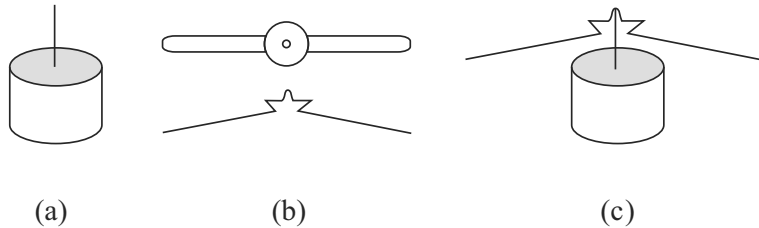


Figura 3.4: Versorio del primer tipo. (a) Base del versorio. (b) Tensor de papel de acero visto desde arriba y desde el lateral. (c) El versorio montado.

3.2.2 Versorio del segundo tipo

La segunda forma de fabricar un versorio consiste en fijar un alfiler a la parte móvil horizontal del versorio. A esta parte móvil la llamaremos «sombrero», que puede ser una tira de plástico o metal. El alfiler se fija firmemente en el centro del sombrero, con la punta hacia abajo. El alfiler gira con el sombrero. Este sistema se sostiene mediante una pequeña superficie plana horizontal fijada al suelo, como la cabeza de un clavo clavado en una tabla o un tapón de corcho. La figura 3.5 representa este tipo de versorio. (a) Su base, en este caso un clavo clavado en una tabla. (b) La parte móvil del versorio, en este caso una tira de plástico o metal con un alfiler fijado en su centro, con la punta hacia abajo. (c) El versorio completo, con la punta del alfiler colocada sobre la cabeza horizontal del clavo clavado en una tabla.

Para evitar que el versorio se deslice, es esencial que el centro de gravedad del sombrero y del alfiler sea más bajo que la punta del alfiler. El centro de gravedad del alfiler solo se encuentra en un punto *A* situado entre la cabeza *H* y la punta *T* del alfiler, figura 3.6 (a). Normalmente, este punto *A* estará más cerca de *H* que de *T*, aunque aquí lo representamos cerca del centro del alfiler. El centro de gravedad del sombrero

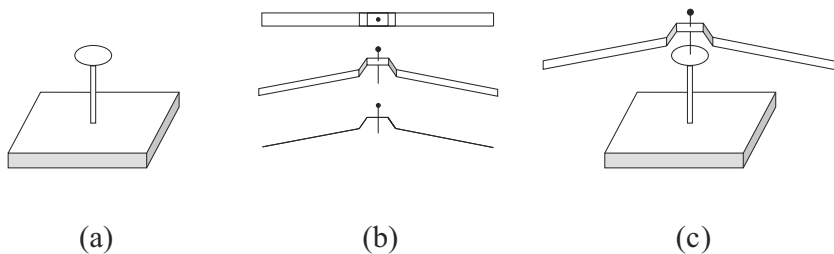


Figura 3.5: Versorio del segundo tipo, con el alfiler fijado en la parte móvil del versorio. (a) Base fija del versorio. (b) Tapa del versorio (banda de plástico o metal) con el alfiler fijado en ella. (c) Versorio montado.

solo se encuentra en un punto B situado en su eje de simetría vertical, entre sus partes superior e inferior, figura 3.6 (b).

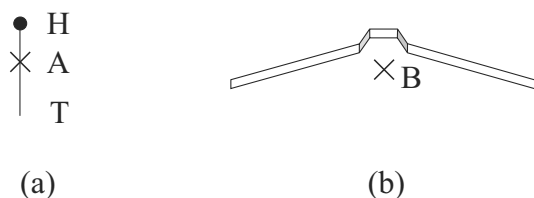


Figura 3.6: (a) El centro de gravedad del alfiler es A . (b) El punto B es el centro de gravedad del sombrero.

El centro de gravedad de toda la parte móvil (sombrero y alfiler) de este tipo de versorio se encuentra en un punto C entre A , el centro de gravedad del alfiler, y B , el centro de gravedad del sombrero. Existen tres posibilidades, como se muestra en la figura 3.7. (a) Si el alfiler tiene el mismo peso que la tapa, entonces C se encontrará en el medio entre A y B . (b) Si el alfiler es más pesado que la tapa, C estará más cerca de A . (c) Si el alfiler es más ligero que el sombrero, C estará más cerca de B .

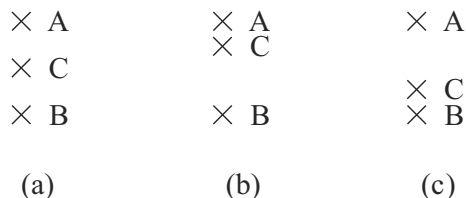


Figura 3.7: Ubicación del centro de gravedad C de la parte móvil del versorio. (a) Alfiler y sombrero del mismo peso. (b) Alfiler más pesado que el sombrero. (c) Alfiler más ligero que el sombrero.

Si C es más alto que la punta T del alfiler, el versorio se deslizará del clavo, lo que imposibilitará su equilibrio sobre el clavo. La razón es que la parte móvil del versorio

estará en equilibrio inestable en esta configuración. En la figura 3.8 (a), ilustramos esta situación de equilibrio inestable con el punto C (de la figura 3.7) representado por el símbolo $\times$. Aquí, $\times$ está verticalmente por encima de T , en su posición más alta. Supongamos que la parte móvil se desvía ligeramente de esta situación inestable, es decir, que la parte móvil se inclina ligeramente en sentido horario o antihorario alrededor de la punta T del alfiler, lo que baja una de sus patas mientras levanta la otra. En este caso, el centro de gravedad $\times$ de la parte móvil se desplazará por debajo de su posición inicial. El centro de gravedad de cualquier sistema tiende a acercarse a la superficie de la Tierra cuando existe esta posibilidad. Por lo tanto, el versorio seguirá girando en sentido horario o antihorario, lo que provocará la caída de la parte móvil.

La única forma de equilibrar la parte móvil del versorio sobre el clavo es tener el punto C debajo de la punta T del alfiler. Esto se representa en la figura 3.8 (b), donde el símbolo $\times$ indica la posición del centro de gravedad de la parte móvil del versorio (compuesta por el alfiler y el sombrero). Se trata de la configuración de equilibrio estable, con $\times$ en su posición más baja, es decir, verticalmente debajo de la punta T del alfiler. En esta configuración estable, cualquier movimiento del versorio en sentido horario o antihorario alrededor de la punta T del alfiler elevará el centro de gravedad $\times$ con respecto a su altura cuando se encuentra verticalmente debajo de la punta T . El sistema volverá entonces a la configuración de equilibrio estable debido al par de retorno gravitatorio que ejerce sobre él la Tierra.

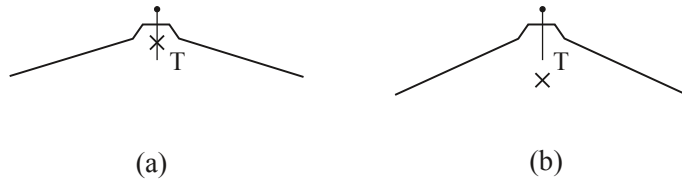


Figura 3.8: El símbolo $\times$ representa el centro de gravedad C de la parte móvil del versorio (compuesta por el alfiler y el sombrero). (a) Versorio del segundo tipo en equilibrio inestable, con $\times$ por encima de la punta T del alfiler. (b) Versorio en equilibrio estable, con $\times$ por debajo de la punta T .

A veces es difícil conseguir esta configuración de equilibrio estable con una parte móvil ligera compuesta por una pajita de plástico. Para evitar este problema, se puede utilizar una pajita dentro de otra pajita, o una tira de plástico compuesta por un material más denso y pesado, con el fin de contrarrestar el peso del alfiler. Otra alternativa consiste en cortar la parte superior más pesada del alfiler (incluida la cabeza) con unos alicates, conservando solo la parte inferior (incluida la punta). También puede doblar las patas del sombrero del versorio hacia abajo para bajar su centro de gravedad o simplemente utilizar sombreros más largos. Otra alternativa consiste en sustituir el alfiler por un pequeño clavo que atraviese el centro de la parte móvil o pegado a su centro con pegamento o plastilina. Cuando el sistema esté listo, es importante comprobar que puede girar libremente en ambos sentidos en un plano horizontal alrededor de un eje vertical sin deslizarse. Si se desliza hacia un lado, puede equilibrarlo bajando una

de las patas o aumentando la longitud de una de ellas. Entonces estaremos listos para comenzar los experimentos.

3.2.3 Versorio del tercer tipo

La tercera forma de fabricar un versorio es quizás la más sencilla. Para la parte móvil, elegimos una tira de metal, madera u otro material adecuado, y atamos un hilo de algodón o seda en su centro. La tira debe permanecer horizontal cuando está en reposo y sujeta por su centro. A continuación, fijamos el extremo superior del hilo a un soporte que está fijado al suelo. La parte móvil fijada al extremo inferior del hilo puede entonces girar libremente en horizontal en ambos sentidos alrededor del hilo vertical. La figura 3.9 ilustra este tipo de versorio, cuya parte móvil está sostenida en su centro por un hilo vertical atado a un lápiz. El «perpendicular» de Fracastoro era probablemente un versorio de este tipo.

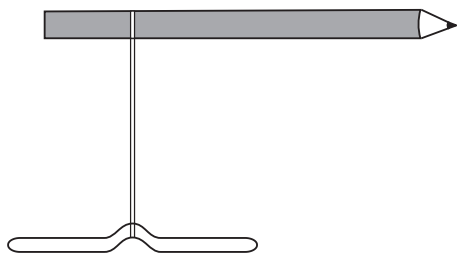


Figura 3.9: Versorio del tercer tipo.

El versorio del tercer tipo tiene una propiedad que lo diferencia de los otros dos tipos. La parte móvil de los versorios del primer y segundo tipo solo puede inclinarse o girar alrededor de su centro, que permanece inmóvil con respecto al suelo. El versorio del tercer tipo, por el contrario, no solo puede girar alrededor de un eje vertical, sino que también, como un péndulo, puede desplazarse en su conjunto cuando es atraído por otro cuerpo. Esto supone una ventaja en términos de versatilidad de su movimiento. Sin embargo, a veces complica el análisis de los fenómenos que queremos describir u observar. En los siguientes experimentos, inicialmente solo utilizamos versorios del primer y segundo tipo.

Con un par externo constante, es más fácil hacer girar una parte móvil más ligera de un versorio que una parte más pesada. Esto significa que un versorio ligero tiene mayor sensibilidad que uno pesado.

Aunque Gilbert solo construyó versorios de metal, estos pueden fabricarse con diferentes materiales: metal, plástico, cartón fino, paja seca, madera, etc. Al principio, solo trabajaremos con versorios de metal, a los que llamaremos simplemente versorios. Cuando la aguja giratoria sea de plástico, papel u otro material no metálico, llamaremos al sistema versorio de plástico, versorio de papel o cualquier otro nombre apropiado. De esta manera, podremos distinguir estos versorios del versorio de Gilbert.

3.3 Experiencias con el versorio

Experimento 3.1

Acercamos un plástico neutro a un versorio metálico, sin que entren en contacto. No ocurre nada, figura 3.10.

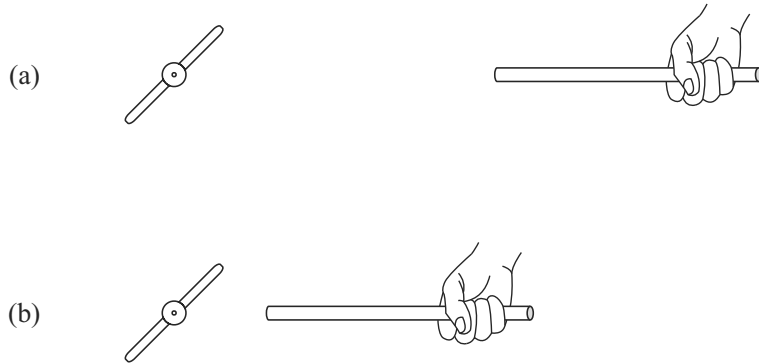


Figura 3.10: (a) Un versorio metálico apunta en una dirección arbitraria cuando se aleja de un trozo de plástico neutro. (b) El versorio permanece inmóvil cuando se acerca el plástico neutro.

Frotamos otro trozo de plástico y repetimos el experimento. En este caso, observamos que el versorio metálico se orienta hacia el plástico frotado, apuntando hacia él, figura 3.11. Lo mismo ocurre con un versorio de madera y un versorio de papel.

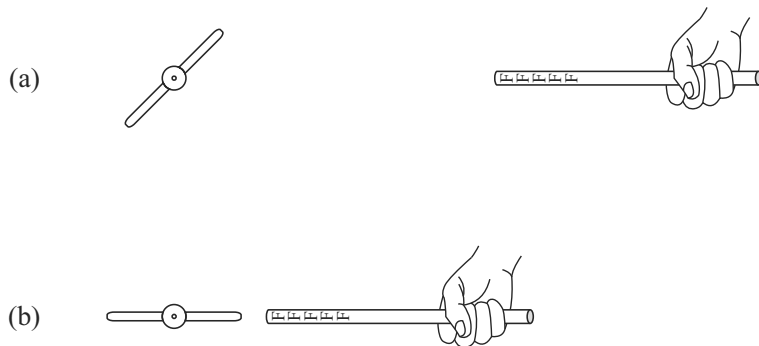


Figura 3.11: (a) Un versorio metálico apunta en una dirección arbitraria cuando se aleja de un trozo de plástico frotado. (b) Cuando se acerca el plástico, el versorio se alinea con él y apunta constantemente hacia el plástico.

Este experimento demuestra que el plástico frotado afecta a los cuerpos cercanos, como vimos en el experimento 2.1. Sin embargo, existen dos diferencias principales

entre ambos experimentos. La primera diferencia es que en el experimento 2.1 se produjo un movimiento de los trozos de papel. En el presente experimento, solo el versorio cambia de dirección, mientras que su centro permanece inmóvil sobre el alfiler. La segunda diferencia es que el versorio se mueve más fácilmente que los trozos de papel. En otras palabras, algunos objetos frotados no pueden atraer hacia sí cuerpos ligeros. Sin embargo, esos mismos objetos frotados pueden mover los versorios metálicos. El versorio es un mejor detector de electrización débil que los trozos de papel o la paja. Gilbert utilizó esta gran sensibilidad para descubrir muchos nuevos objetos eléctricos, es decir, objetos frotados que pueden atraer u orientar otras sustancias colocadas cerca.

Gilbert describió el versorio de la siguiente manera:^{9,10}

Ahora bien, para comprender claramente por experiencia cómo se produce dicha atracción y cuáles pueden ser esas sustancias que atraen a otros cuerpos (y en el caso de muchas de estas sustancias eléctricas, aunque los cuerpos influenciados por ellas se inclinan hacia ellas, debido a la debilidad de la atracción no son atraídos completamente hacia ellas, sino que se elevan fácilmente), construya una aguja giratoria (electroscopio—*versorio*) de cualquier tipo de metal, de tres o cuatro dedos de largo, bastante ligera y equilibrada en una punta afilada a la manera de una aguja magnética. Acerque a uno de sus extremos un trozo de ámbar o una gema, ligeramente frotada, pulida y brillante: inmediatamente el instrumento girará.

La palabra «electroscopio» en esta cita fue introducida por Mottelay en su traducción al inglés de la obra de Gilbert. No aparece en el texto original en latín, en el que solo se utiliza la palabra «versorio».¹¹ La palabra «electroscopio» tampoco aparece en la traducción del libro de Gilbert realizada por Thompson.¹² Mottelay utilizó la palabra «electroscopio» en el sentido de que este instrumento podía indicar, por su orientación, qué objetos se comportaban como el ámbar después de haber sido frotados. «Electroscopio» es el nombre genérico de cualquier dispositivo lo suficientemente sensible como para detectar una fuerza o un par de origen eléctrico. En esta obra, sin embargo, reservaremos el nombre de «electroscopio» específicamente para el instrumento descrito en la sección 6.1.

Ahora disponemos de un segundo criterio para afirmar que un plástico u otro material es «eléctricamente neutro». El primer criterio se presentó en el experimento 2.1, a saber, no atraer cuerpos ligeros. El segundo criterio es que no produzca movimiento de orientación de un versorio metálico cuando este material se coloca cerca de una de las patas. En los siguientes experimentos, es importante conservar una pajita o una regla de plástico neutra que no atraiga los cuerpos ligeros y no oriente los versorios

⁹[Gil78, pp. 27–28].

¹⁰Now in order clearly to understand by experience how such attraction takes place, and what those substances may be that so attract other bodies (and in the case of many of these electrical substances, though the bodies influenced by them lean toward them, yet because of the feebleness of the attraction they are not drawn clean up to them, but are easily made to rise), make yourself a rotating-needle (electroscope—*versorium*) of any sort of metal, three or four fingers long, pretty light, and poised on a sharp point after the manner of a magnetic pointer. Bring near to one end of it a piece of amber or a gem, lightly rubbed, polished and shining: at once the instrument revolves.

¹¹[Gil00a, pp. 48–49 y glosario] y [Hea67].

¹²[Gil00b, pp. vj y 48–49] y [Hea67].

metálicos. Esta pajita o regla no debe frotarse en ningún caso, ya que se utilizará como nuestra norma neutra.

Fracastoro no describió cómo creó el perpendículo, que precedió al versorio de Gilbert. Solo podemos especular sobre cómo lo fabricó. Uno de los objetivos de su libro era el estudio del magnetismo. También quería distinguir la atracción del ámbar de la que ejerce un imán natural. Quizás frotó un trozo de ámbar para realizar un experimento eléctrico y notó por casualidad que era capaz de hacer girar la aguja de una brújula. Dado que el ámbar no es magnético, se frote o no, debería haber concluido que la orientación de la brújula se debía a una atracción eléctrica, similar a la atracción de los cuerpos ligeros por el ámbar frotado. Entonces podría haber decidido fabricar agujas metálicas similares a las agujas magnéticas, pero no magnetizadas. Estas habrían girado hacia un trozo de ámbar frotado, pero no hacia un imán (suponiendo que las agujas fueran de cobre o plata, y no de hierro o acero). De este modo, habría creado el primer instrumento artificial para el estudio de la electricidad.

Experimento 3.2

Acercamos un imán a un versorio. Observamos que solo los versorios de acero, hierro, níquel u otros materiales ferromagnéticos giran y se orientan hacia el imán. Los versorios fabricados con otros materiales no se ven afectados por el imán. También observamos que varios metales, como el cobre y el aluminio, no se ven afectados por el imán. Lo mismo ocurre con la mayoría de las sustancias (papel, plástico, madera, etc.).

Este experimento nos permite distinguir la interacción magnética de la interacción eléctrica, como hicimos anteriormente con los experimentos 2.6 y 2.7, pero con mayor precisión.

3.4 ¿Es posible cartografiar la fuerza eléctrica?

¿Es posible cartografiar la fuerza eléctrica ejercida por un cuerpo de plástico frotado? ¿Se puede visualizar en qué dirección una pajita larga frotada atraerá un trozo de papel colocado cerca? En esta sección respondemos a esta pregunta.

En los siguientes experimentos, podemos utilizar varios versorios simultáneamente. También podemos utilizar un solo versorio colocado alternativamente en varias posiciones alrededor del cuerpo frotado para cada experimento. En las siguientes figuras mostramos varios versorios al mismo tiempo. Es preferible utilizar versorios pequeños, como los fabricados con pequeños tensores de papel colocados sobre alfileres. Estos alfileres se pueden fijar a varios tapones de corcho o clavarse todos en un panel de poliestireno. Al principio, solo trabajamos con versorios de metal.

Experimento 3.3

Acercamos una pajita neutra a los versorios, no pasa nada. Frotamos el extremo de otra pajita de plástico. Colocamos este extremo frotado a la misma altura que el plano formado por varios versorios sobre una mesa. Observamos que giran y apuntan hacia el extremo frotado de la pajita, figura 3.12. En esta figura, el círculo central con la letra F indica el extremo frotado de la pajita. La influencia de la pajita frotada

se extiende aproximadamente 10 cm. Los versorios más alejados no parecen verse afectados por la pajita frotada, a menos que se coloque cerca de ellos.

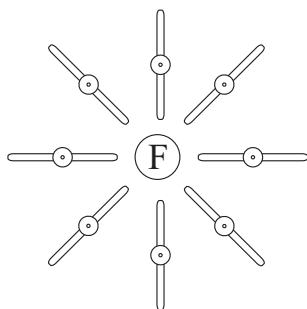


Figura 3.12: Los versorios adyacentes están orientados hacia el extremo frotado del plástico.

Las orientaciones indicadas por los versorios representan las direcciones de la fuerza eléctrica ejercida por el plástico frotado. En otras palabras, si hay trozos de papel en la ubicación de los versorios y si la fuerza de atracción de la pajita frotada es lo suficientemente fuerte, la orientación de los versorios indica las direcciones del movimiento que se produciría en los trozos de papel debido a la presencia del plástico frotado. Esto significa que serían atraídos radialmente hacia la punta frotada.

En este experimento, los versorios funcionan como limaduras de hierro distribuidas alrededor de un imán permanente, indicando las direcciones de las fuerzas magnéticas ejercidas por el imán sobre otros polos magnéticos o sobre pequeños trozos de hierro.

Experimento 3.4

Se pueden realizar experimentos similares con diferentes configuraciones. Por ejemplo, podemos frotar una pajita de plástico a lo largo de toda su longitud y luego colocarla verticalmente sobre una base, como un palillo clavado en plastilina. Los versorios adyacente apuntarán hacia la pajita frotada.

También podemos sostener esta pajita frotada horizontalmente fijándola por los extremos. La configuración final de los versorios en este caso es similar a la de la figura 3.13. La mayoría de los versorios apuntarán hacia estos extremos.

Experimento 3.5

Ahora repetimos estos experimentos utilizando dos pajitas frotadas colocadas verticalmente. En este caso, la configuración de los versorios se ilustra en la figura 3.14. Los círculos marcados con la letra F representan las partes frotadas de las pajitas que se encuentran al mismo nivel que los versorios. Esta configuración indica una suma vectorial de los pares ejercidos por cada pajita de plástico sobre los versorios. Los vectores se suman para producir la resultante según la regla del paralelogramo.

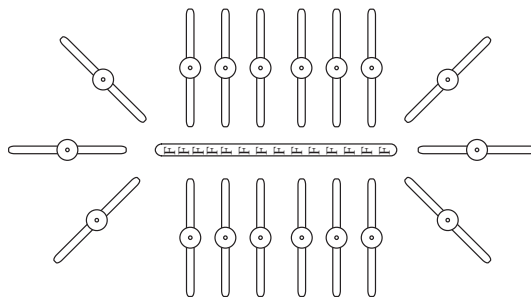


Figura 3.13: Orientación de los versorios hacia una pajita horizontal que fue frotada en toda su longitud.

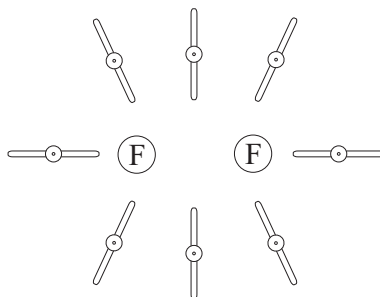


Figura 3.14: Orientación de versorios gracias a dos pajitas de plástico frotadas.

Es interesante señalar que Gilbert no utilizó un versorio para cartografiar la fuerza eléctrica como hacemos aquí. Sin embargo, utilizó agujas de brújula magnetizadas para cartografiar la fuerza magnética de un imán. En la figura 3.15, mostramos los resultados que obtuvo para imanes cilíndricos y esféricos.¹³ El imán esférico orienta las brújulas de forma similar a la orientación de las brújulas sobre la Tierra, que apuntan hacia los polos magnéticos norte y sur. En otras palabras, el pequeño imán esférico también tiene dos polos, que son los puntos de la superficie de la esfera cerca de los cuales las brújulas permanecen perpendiculares a la superficie de la esfera, apuntando hacia el centro de la esfera. Es posible trazar los meridianos magnéticos sobre la superficie de esta esfera. Son círculos que conectan estos dos polos, cuyos centros coinciden con el centro de la esfera. El ecuador magnético es el gran círculo cuyo plano es perpendicular a la línea que conecta los dos polos. El centro del ecuador magnético coincide con el centro de la esfera. Gilbert utilizó esta analogía entre el comportamiento de las pequeñas brújulas cerca de una pequeña esfera magnetizada y el comportamiento de las brújulas normales en la superficie de la Tierra para afirmar que la Tierra es un enorme imán. Gracias a este modelo, pudo justificar la orientación de las brújulas normales utilizadas en la navegación terrestre.

¹³[Gil78, pp. 10 y 82].

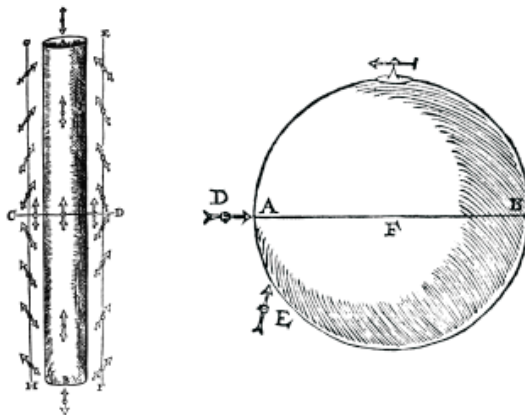


Figura 3.15: Cartografía de la fuerza magnética realizada por Gilbert utilizando agujas imantadas acercadas a imanes cilíndricos y esféricos. Los polos de este imán esférico se encuentran en A y B .

3.5 ¿Existe acción y reacción en la electrostática?

Hasta ahora, vimos que el ámbar frotado, o el plástico frotado, atrae y desplaza objetos ligeros y hace girar los versorios. Ahora analizaremos el proceso inverso.

Experimento 3.6

Se coloca una pajita de plástico neutra en contacto con una pared y se suelta desde la posición de reposo. Cae al suelo, figura 3.16 (a). Frotamos otra pajita a lo largo de toda su longitud con un trozo de papel o con cabello. A continuación, la colocamos en contacto con la pared y la soltamos desde la posición de reposo. Vemos que permanece pegada a la pared a pesar de la atracción gravitatoria de la Tierra, figura 3.16 (b). Se observa el mismo efecto cuando toca un vidrio, un mueble metálico o una pizarra escolar. ¡Incluso puede pegarse al techo!

Este experimento también se puede utilizar para determinar si una pajita está bien electrizada. Si se queda pegada a la pared después de frotarla, significa que está bien electrizada. Si se desliza o cae al suelo muy rápidamente después de frotarla y soltarla, significa que está poco electrizada. La mayoría de los experimentos presentados en este libro funcionarán si utilizamos pajitas de plástico bien electrizadas. Esta prueba de la pared se puede utilizar para descubrir los materiales capaces de almacenar una gran cantidad de electricidad, así como los mejores métodos o los más eficaces para aplicar la fricción. Por ejemplo, ¿cómo se consigue una mejor electrización: frotando una pajita con el cabello, con un trozo de papel o con una bolsa de plástico? Esta prueba de la pared es un método muy útil, práctico y sencillo para comprobar la electrización de una pajita de plástico.

A veces, la pajita frotada no se pega a la pared, incluso después de una fricción considerable. Esto puede ocurrir con pajitas densas y pesadas. En este caso, el peso de la pajita será mayor que la fuerza eléctrica, pero también que la fuerza de fricción

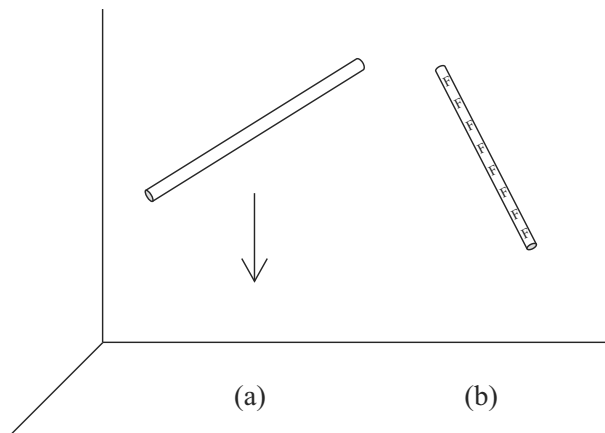


Figura 3.16: (a) Una pajita de plástico neutra cae al suelo tras soltarla. (b) Una pajita de plástico frotada a lo largo de toda su longitud permanece pegada a una pared tras soltarla.

entre la pajita frotada y la pared. Por lo tanto, la pajita caerá al suelo. Cuando esto ocurra, es mejor utilizar otro tipo de pajita, más fina y ligera.

La misma prueba se puede realizar con un trozo de bolsa de plástico en lugar de una pajita. Un trozo de bolsa de plástico neutro caerá al suelo tras tocar una pared y soltarse. Por el contrario, un trozo de bolsa de plástico frotado permanecerá pegado a la pared durante mucho tiempo.

Experimento 3.7

Se puede realizar un experimento similar con un globo de goma inflado. Cuando lo rozamos contra una pared y lo soltamos, cae al suelo. A continuación, frotamos el globo con el cabello. Tocamos la pared con la parte frotada del globo y lo soltamos. Si está bien electrizado, se quedará pegado a la pared después de soltarlo. Para que este experimento tenga éxito, el globo debe frotarse energicamente sobre una superficie grande.

Son experimentos muy sencillos, pero los resultados son impresionantes. A veces, la pajita puede permanecer pegada a la pared durante varios minutos, incluso una hora. Los experimentos indican que la pajita frotada es atraída por la pared o el techo. La pajita frotada es atraída por varias sustancias diferentes: pared, vidrio, metal, madera, etc.

Experimento 3.8

Ahora realizamos algunos experimentos con un versorio de plástico, similar al versorio del segundo tipo. Al principio, trabajamos con un versorio neutro que puede girar libremente en ambos sentidos alrededor de un eje vertical que pasa por su centro. Acercamos varios objetos a una de las patas del versorio. Estos objetos pueden

ser un dedo, una cuchara o un alambre metálico, un palito de madera para barbacoa, una hoja de papel o un trozo de tela. Cada cuerpo se mueve cerca del versorio independientemente de los demás. No ocurre nada con el versorio. En otras palabras, su orientación arbitraria anterior no se ve afectada, figura 3.17.

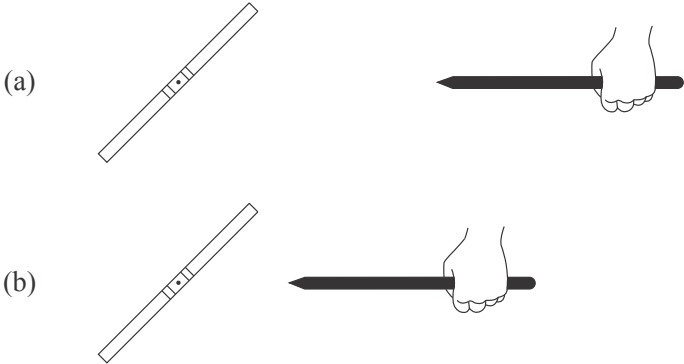


Figura 3.17: Un versorio de plástico neutro no se orienta cuando se acerca un dedo, un trozo de metal, madera, papel o tela a una de sus patas.

Ahora frotamos solo una de las patas del versorio de plástico con una hoja de papel o un paño. Repetimos el procedimiento cuando acercamos un dedo a esa pata frotada. También podemos acercar un trozo de metal o madera a la pata frotada del versorio de plástico. Esta vez, observamos que la pata frotada del versorio de plástico gira para apuntar hacia el objeto que se acerca, como se muestra en la figura 3.18.

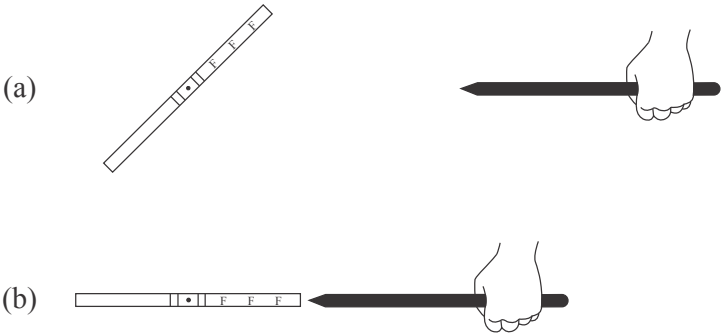


Figura 3.18: (a) El versorio de plástico apunta en una dirección arbitraria cuando se aleja de un palito de madera. (b) La pata frotada de un versorio de plástico se orienta hacia un palito de madera colocado cerca.

Este experimento muestra lo contrario del experimento 3.1. Anteriormente, un trozo de plástico frotado orientaba un versorio metálico. Ahora observamos que un dedo, un trozo de madera o de metal orienta un versorio de plástico frotado. En algunos casos, un versorio de plástico que no fue frotado intencionadamente es atraído por un dedo o una hoja de papel. Como mencionamos anteriormente, esto se

debe a que, a veces, el simple hecho de manipular el versorio de plástico es suficiente para cargarlo eléctricamente. Si esto ocurre, indica que el versorio de plástico no es realmente neutro, sino que adquirió una carga eléctrica residual al ser manipulado. Los versorios de plástico que son realmente neutros son aquellos que no son atraídos ni orientados por estos objetos.

Experimento 3.9

En el experimento 3.8, observamos la orientación de un versorio de plástico, pero su centro permaneció inmóvil sobre el soporte. La mejor manera de ver cómo un cuerpo de plástico frotado es atraído por un metal es trabajar con un versorio del tercer tipo (véase la sección 3.1), pero esta vez de plástico, es decir, una tira de plástico suspendida en su centro por un hilo de seda o nailon. Cuanto más ligera sea la tira, más fácilmente se moverá en su conjunto. Por otro lado, no debe ser demasiado corta, ya que debemos frotarla con el cabello, con una hoja de papel o con un paño. Una pajita de plástico es ideal como versorio de este tipo debido a su gran longitud y su bajo peso. Si acercamos la mano, una hoja de papel o una placa metálica a este versorio neutro, no ocurre nada.

Ahora frotamos la mitad del versorio de plástico (es decir, solo frotamos una de sus patas) y lo colgamos con el hilo de seda o nailon. Volvemos a acercar la mano al versorio. También podemos acercar una hoja de papel, un palito de madera para barbacoa o una placa metálica al versorio. Esta vez, el versorio de plástico frotado no solo gira hacia el objeto que se acerca, sino que también se desplaza en su conjunto hacia él. En otras palabras, actúan sobre él un par neto y una fuerza neta. Esto hace que sea atraído por el objeto que se acerca.

Este experimento es lo contrario de los experimentos 2.1, 2.3 y 2.4. Ahora tenemos una hoja de papel o una placa metálica que atrae un trozo de plástico frotado. En el caso de los experimentos 2.1, 2.3 y 2.4, no era posible observar o detectar esta acción mutua, ya que la pajita, la regla o el peine de plástico eran mucho más pesados que los trozos de papel y otros objetos pequeños. Además, la mano de una persona no es lo suficientemente sensible como para detectar la débil fuerza ejercida por los trozos de papel sobre la pajita o el peine de plástico. En los experimentos 3.8 y 3.9, en cambio, disponemos de un instrumento mucho más sensible. Esto se debe a que el peso del cuerpo sometido a prueba (en este caso, la banda de plástico del versorio) se ve contrarrestado por el soporte situado debajo o encima. Al estar el peso del versorio de plástico equilibrado por otra fuerza, resulta mucho más fácil ver o detectar su rotación o movimiento lateral debido a una influencia externa.

Experimento 3.10

El hecho de que un cuerpo cargado eléctricamente sea atraído por otros cuerpos cercanos (un dedo, un trozo de madera o un trozo de metal) fue utilizado por Stephen Gray (1666–1736) en 1720 para descubrir nuevos materiales eléctricos (es decir, materiales que se comportan como el ámbar).

Gray frotó varias sustancias entre sus dedos. Tras este procedimiento, comprobó si las sustancias eran atraídas por un dedo u otro cuerpo sólido cuando se acercaban

a las sustancias frotadas. A continuación citamos algunos extractos de su obra en los que describe experimentos fáciles de reproducir:¹⁴

Habiendo observado a menudo en los experimentos eléctricos realizados con un tubo de vidrio [frotado] y un plumón atado al extremo de un palito, que después de que sus fibras hubieran sido atraídas hacia el tubo, cuando este [el tubo] se retiraba, la mayoría de ellas eran atraídas hacia el palito, como si [el plumón] hubiera sido un cuerpo eléctrico, o como si se hubiera comunicado alguna electricidad al palito o al plumón; esto me llevó a pensar si, al pasar un plumón entre mis dedos, no se produciría el mismo efecto, al adquirir cierto grado de electricidad. Esto funcionó en mi primer intento, ya que las pequeñas fibras plumosas del plumón más cercanas al tallo se veían atraídas por mi dedo cuando lo acercaba a ella: [...]. A continuación, procedí a comprobar si el cabello tenía la misma propiedad, tomando uno de mi peluca y pasándolo tres o cuatro veces entre mis dedos, o más bien entre mi pulgar y mi índice, y pronto descubrí que llegaba a mi dedo a una distancia de media pulgada [1.3 cm]; [...].

Habiendo tenido tanto éxito en estos [experimentos], pasé a cantidades mayores de los mismos materiales, como trozos de cinta de seda gruesa y fina de varios colores, y descubrí que, tomando un trozo de cualquiera de ellos de aproximadamente media yarda de largo [45 cm], y sujetando el extremo con una mano y tirando de él con la otra mano entre el pulgar y los dedos, adquiriría electricidad, de modo que si se acercaba la mano al extremo inferior, era atraída por él a una distancia de 5 o 6 pulgadas [13 o 15 cm]; pero en algunas ocasiones la electricidad era mucho más débil que en otras, lo que supuse que se debía a que la cinta podía haber absorbido algunas partículas acuosas del aire húmedo, lo que comprobé que era [cierto] al probarlo en esa ocasión; pues cuando calentaba bien la cinta junto al fuego, nunca dejaba de adquirir una fuerte carga eléctrica.¹⁵

¹⁴[Gra20, pp. 104–106].

¹⁵Having often observed in the Electrical Experiments made with a [rubbed] Glass Tube, and a Down Feather tied to the end of a small Stick, that after its Fibres had been drawn towards the Tube, when that [the tube] has been withdrawn, most of them would be drawn to the Stick, as if it [the down feather] had been an Electric Body, or as if there had been some Electricity communicated to the Stick or Feather; this put me upon thinking, whether if a Feather were drawn through my Fingers, it might not produce the same Effect, by acquiring some degree of Electricity. This succeeded accordingly upon my first trial, the small downy Fibres of the Feather next the Quill being drawn by my Finger when held near it: [...] I then proceeded to try whether Hair might not have the same Property, by taking one from my Wig, and drawing it 3 or 4 times through my Fingers, or rather between my Thumb and Forefinger, and soon found it would come to my Finger at the distance of half an Inch [1.3 cm]; [...].

Having succeeded so well in these [experiments], I proceeded to larger quantities of the same Materials, as pieces of Ribband both of coarse and fine Silk of several colours, and found that by taking a piece of either of these of about half a yard long [45 cm], and by holding the end in one Hand, and drawing it through my other Hand between my Thumb and Fingers, it would acquire an Electricity, so that if the Hand were held near the lower end of it, it would be attracted by it at the distance of 5 or 6 inches [13 or 15 cm]; but at some times the Electricity would be much weaker than at others, the reason of which I conjectur'd to be, that the Ribband might have imbibed some aqueous Particles from the moist Air, which I found to be [true] upon trial the occasion of it; for when I had well warmed the Ribband by the Fire, it never failed to be strongly Electrical.

3.6 Fabri y Boyle descubren la acción eléctrica mutua

Los experimentos 3.6 a 3.10 son muy importantes. Demuestran que existe una acción recíproca entre el plástico frotado y los objetos que lo rodean. El plástico frotado atrae a estos objetos, que a su vez atraen al plástico frotado. Gilbert no realizó ningún experimento con un versorio frotado hecho de ámbar o cualquier otra sustancia eléctrica (es decir, cualquier sustancia que se comportara como el ámbar, como él las llamaba). Este hecho puede haber contribuido a su creencia errónea de que no existía una acción recíproca entre el ámbar frotado y los objetos circundantes. El mismo punto de vista erróneo fue adoptado por Girolamo Cardano (1501–1576) antes que Gilbert, y también fue mencionado por N. Cabeo (1596–1650) después de Gilbert. Sin embargo, todos ellos eran conscientes de la acción mutua entre dos imanes, o entre un imán y un trozo de hierro. Para caracterizar esta acción magnética mutua, Gilbert adoptó los nombres «coitación» o «confluencia», mientras que para la acción eléctrica utilizó el término «atracción».¹⁶

Hoy sabemos que la acción eléctrica también es mutua y que, por lo tanto, puede caracterizarse con la expresión «interacción eléctrica». La interacción eléctrica se refiere tanto a la fuerza neta ejercida por un objeto sobre otro (que los hace moverse con respecto al suelo) como al par neto ejercido por un objeto sobre otro (que los hace girar con respecto al suelo). Cuando hablamos de fuerza eléctrica, hay que tener en cuenta que no solo el objeto *A* atrae al objeto *B*, sino que el objeto *B* también atrae al objeto *A* en la dirección opuesta. Del mismo modo, si el objeto *A* ejerce un par eléctrico sobre el objeto *B*, el objeto *B* ejercerá un par opuesto sobre el objeto *A*. Si el objeto *A* tiende a girar en el sentido de las agujas del reloj bajo la influencia del objeto *B*, entonces *B* tenderá a girar en sentido contrario a las agujas del reloj bajo la influencia de *A*.

Los primeros en descubrir que la acción eléctrica es una acción mutua entre el ámbar frotado y los objetos que lo rodean fueron Honoré Fabri (1607–1688) en 1660, figura 3.19, y Robert Boyle (1627–1691) en 1675, figura 3.20.¹⁷

Fabri se convirtió en miembro correspondiente de la Accademia del Cimento en 1660. Entre los miembros de la Academia se encontraban G. A. Borelli (1608–1671), Vincenzo Viviani (1622–1703), que era discípulo de Galileo (1564–1642), y F. Redi (1626–1697/8). Fue fundada en 1657 y existió durante 10 años. Los trabajos de la Academia, llamados *Saggi*, o *Ensayos*, se publicaron en 1667. Los estudios sobre la electricidad realizados en esta Academia comenzaron en 1660. Entre sus informes se encuentran los siguientes comentarios:^{18,19}

Se cree comúnmente que el *ámbar* atrae hacia sí a los pequeños cuerpos; pero la acción es en realidad *mutua*, y no pertenece más propiamente al *ámbar* que a los cuerpos movidos, por los cuales también él mismo es atraído.

¹⁶[Gil78, pp. 26 y 34] y [Hei99, pp. 174–182].

¹⁷[Hei99, pp. 195–205].

¹⁸[Hei99, p. 201]

¹⁹It is commonly believed, That *Amber* attracts the little Bodies to itself; but the action is indeed *mutual*, not more properly belonging to the *Amber*, than to the Bodies moved, by which also itself is attracted.



Figura 3.19: Honoré Fabri (1607–1688).



Figura 3.20: Robert Boyle (1627–1691).

Según Heilbron, los académicos verificaron esto suspendiendo un trozo de ámbar frotado en un hilo o colocándolo en un pivote. El ámbar, según los académicos,²⁰

se inclinaba ligeramente hacia esos pequeños cuerpos, que se presentaban también *proporcionalmente* a él, y obedecían gustosamente su llamada.

Ese mismo año, Magalotti (1637–1712) refutó los puntos de vista de Cabeo, que había rechazado la naturaleza mutua de las interacciones eléctricas. Magalotti declaró:^{21,22}

Sus opiniones son refutadas por la experiencia, ya que la *ambra versoria* sigue a todos los cuerpos que se le presentan.

Según Heilbron, Magalotti obtuvo esta información de Fabri. Los informes anteriores de la Accademia del Cimento también se debían a Fabri, según Heilbron. Existe

²⁰made a little stoop to those little bodies, which likewise *proportionally* presented themselves thereto, and readily obeyed its call.

²¹[Hei99, p. 201].

²²His views are refuted by experience, for the *ambra versoria* follows all bodies presented to it.

un manuscrito que contiene borradores para una sección sobre la electricidad de los *Ensayos*, en la carta de Fabri, en la que se menciona que^{23,24}

un trozo de cera para sellar suspendido libremente y luego frotado se acerca a otros cuerpos.

Estas declaraciones nos permiten observar que las experiencias de Fabri eran en cierto modo similares a las presentadas en la sección 3.5, en la que utilizamos plástico frotado en lugar de ámbar o cera frotados.

Boyle presentó sus resultados sobre la acción mutua entre el ámbar frotado y los objetos cercanos en 1675. Es posible que lo aprendiera gracias a los informes de Fabri o que lo descubriera por su cuenta. Pensaba que el ámbar emitía un efluvio material que le permitía atraer cuerpos ligeros, tal vez porque ese efluvio era pegajoso y elástico.

Sobre la atracción que ejerce el ámbar, escribió lo siguiente:^{25,26}

Que la atracción eléctrica no depende de ninguna simpatía particular entre un cuerpo eléctrico y aquel sobre el que actúa parece más probable, ya que el ámbar, por ejemplo, no atrae solo a un tipo determinado de cuerpos, como la piedra imán atrae al hierro y a aquellos cuerpos en los que abunda; sino que, por lo que comprobé hasta ahora, atrae indistintamente a todos los cuerpos que se encuentran a una distancia adecuada de él (ya que mi pieza de ámbar más selecta no solo atrae arena y polvos minerales, sino también limaduras de acero y cobre, e incluso oro batido), siempre que sean lo suficientemente pequeños o ligeros, excepto quizás el fuego;

En otro pasaje, encontramos esta crucial toma de conciencia:^{27,28}

²³[Hei99, p. 202].

²⁴a piece of sealing wax suspended freely and then rubbed approaches other bodies.

²⁵[Boy00, p. 515].

²⁶That 'tis not in any peculiar sympathy between an Electric and a body whereon it operates, that Electrical Attraction depends, seems the more probable, because Amber, for instance, does not attract only one determinate sort of bodies, as the Loadstone does Iron, and those bodies wherein it abounds; but as far as I have yet tried, it draws indifferently all bodies whatsoever, being plac'd within a due distance from it, (as my choicest piece of Amber draws not only Sand and Mineral Powders, but Filings of Steel and Copper, and beaten Gold it self) provided they be minute or light enough, except perhaps it be fire;

²⁷[Boy00, p. 516].

²⁸We have found by Experiment, That a vigorous and well excited piece of Amber will draw, not only the powder of Amber, but less minute fragments of it. And as in many cases one contrary directs to another, so this Trial suggested a further, which, in case of good success, would probably argue, that in Electrical Attraction not only *Effluvia* are emitted by the Electrical body, but these *Effluvia* fasten upon the body to be drawn, and that in such a way, that the intervening viscous strings, which may be supposed to be made up of those cohering *Effluvia*, are, when their agitation ceases, contracted or made to shrink inwards towards both ends, almost as a highly stretch'd Lute-string does when 'tis permitted to retreat into shorter dimensions. But the Conjecture itself was much more easie to be made than the Experiment requisite to examine it. For we found it no easie matter to suspend an Electric, great and vigorous enough, in such a manner, that it might, whilst suspended, be excited, and be so nicely poised, that so faint a force as that wherewith it attracts light bodies should be able to procure a Local Motion to the whole Body it self. But after some fruitless attempts with other Electricks, I had recourse to the very vigorous piece of polish'd Amber, formerly mention'd, and when we had with the help of a little Wax suspended it by a silken thread, we chased very well one of the blunt edges of it upon a kind of large Pin-cushion cover'd with a coarse and black woollen stuff, and then brought the Electric, as soon as we could, to settle notwithstanding its hanging freely at the bottom of the string. This course of rubbing on the edge of the Amber we pitch'd upon

Descubrimos mediante experimentos que una pieza de ámbar vigorosa y bien excitada atraerá no solo el polvo de ámbar, sino también fragmentos más pequeños del mismo. Y como en muchos casos un contrario dirige a otro, este ensayo sugirió otro más que, en caso de tener éxito, probablemente demostraría que en la atracción eléctrica no solo el cuerpo eléctrico emite *efluvios*, sino que estos *efluvios* se adhieren al cuerpo que se va a atraer, y de tal manera que las cuerdas viscosas intermedias, que se supone que están formadas por esos *efluvios* cohesionados, cuando cesa su agitación, se contraen o se encogen hacia ambos extremos, casi como lo hace una cuerda de laúd muy tensada cuando se le permite retroceder a dimensiones más cortas. Pero la conjetura en sí misma era mucho más fácil de formular que el experimento necesario para examinarla. Porque no nos resultó fácil suspender un elemento eléctrico lo suficientemente grande y vigoroso, de tal manera que, mientras estuviera suspendido, pudiera ser excitado y estar tan bien equilibrado que una fuerza tan débil como la que atrae a los cuerpos ligeros pudiera provocar un movimiento local en todo el cuerpo. Pero después de algunos intentos infructuosos con otros elementos eléctricos, recurrí a la pieza de ámbar pulido muy vigorosa que mencioné anteriormente, y cuando, con la ayuda de un poco de cera, la suspendimos con un hilo de seda, frotamos muy bien uno de sus bordes romos sobre una especie de alfilerero grande cubierto con un paño de lana gruesa y negra, y luego llevamos el eléctrico, tan pronto como pudimos, a asentarse a pesar de que colgaba libremente en la parte inferior de la cuerda. Elegimos frotar el borde del ámbar por más de una razón; si hubiéramos frotado el lado plano, el ámbar no habría podido acercarse al cuerpo sobre el que se había frotado sin cambiar de lugar en todo el eléctrico y, lo que es peor, sin hacer que se moviera (contrario a la naturaleza de los cuerpos pesados) algo hacia arriba; mientras que el ámbar, debido a su suspensión, tenía partes contrapuestas entre sí; para hacer que el borde excitado se acercara a otro cuerpo, ese borde no necesitaba ascender en absoluto, sino solo moverse horizontalmente, a lo que la gravedad del eléctrico (que la cuerda impedía que se moviera hacia abajo) no podía oponerse más que poco o nada. Y de acuerdo con esto, descubrimos que si, tan pronto como el eléctrico suspendido y bien frotado se asentaba libremente, aplicábamos al borde frotado, pero sin tocarlo, el cojín mencionado anteriormente, que, debido a su *superficie* rugosa y porosidad, era adecuado para que el *efluvio* eléctrico se adhiriera a él, el borde se desviaría claramente hacia el cojín mantenido firme, y si este se retiraba lentamente, lo seguiría un buen trecho; y cuando este cuerpo ya no lo retuviera, volvería a la postura en la que se había asentado antes. Y este poder de acercarse al cojín por virtud de la acción de sus propios vapores era tan

for more than one reason; for if we had chafed the flat side, the Amber could not have approached the body it had been rub'd on without making a change of place in the whole Electric, and, which is worse, without making it move (contrary to the nature of heavy bodies) somewhat upwards; whereas the Amber having, by reason of its suspension, in parts counterpoised by one another; to make the excited edge approach to another body, that edge needed not at all ascend, but onely be moved horizontally, to which way of moving the gravity of the Electric (which the string kept from moving downwards) could be but little or no hinderance. And agreeably to this we found, that if, as soon as the suspended and well rubb'd electric was brought to settle freely, we applied to the chafed edge, but without touching it, the lately mention'd Cushion, which, by reason of its rough *Superficies* and porosity, was fit for the electrical *Effluvia* to fasten upon, the edge would manifestly be drawn aside by the Cushion steadily held, and if this were slowly removed, would follow it a good way; and when this body no longer detain'd it, would return to the posture wherein it had settled before. And this power of approaching the Cushion by vertue of the operation of its own steams, was so durable in our vigorous piece of Amber, that by once chasing it, I was able to make it follow the Cushion no less than ten or eleven times.

duradero en nuestro vigoroso trozo de ámbar que, tras perseguirlo una vez, pude hacer que siguiera al cojín nada menos que diez u once veces.

Los experimentos de Fabri y Boyle demostraron que el ámbar frotado no solo orientaba y atraía objetos ligeros, sino que también el ámbar frotado y la cera para sellos frotada eran orientados y atraídos por otros objetos. Sus experimentos son diametralmente opuestos a las observaciones de Fracastoro, descritas en la sección 3.1. Fracastoro colgó pequeños trozos de ámbar y plata con su perpendículo y observó que eran atraídos por otro trozo de ámbar frotado colocado cerca, como se muestra en la figura 3.2. Fabri y Boyle, por su parte, observaron que un trozo de ámbar frotado suspendido de un hilo era atraído y orientado por otro objeto colocado cerca, como se muestra en la figura 3.21.

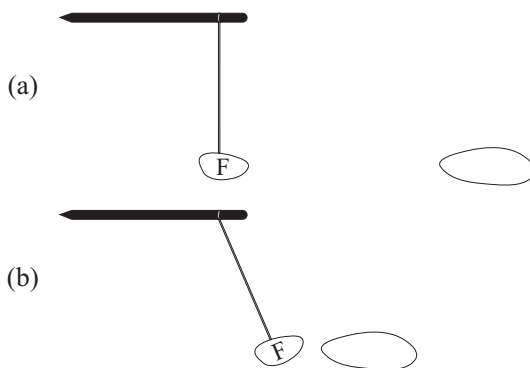


Figura 3.21: (a) Un trozo de ámbar frotado, representado por F , cuelga verticalmente cuando se aleja de cualquier objeto neutro. (b) El trozo de ámbar frotado F es atraído por un cuerpo neutro que se acerca a él.

Se trata de un descubrimiento físico muy importante. Demuestra que existe una acción y una reacción en la electrostática. En otras palabras, existe una interacción eléctrica mutua entre el objeto frotado y los objetos cercanos. El objeto frotado ejerce una fuerza y un par sobre los objetos neutros cercanos. Y estos objetos, a su vez, ejercen una fuerza y un par opuestos sobre el objeto frotado.

Entre 1660 y 1675, Fabri y Boyle concluyeron experimentalmente que existía una acción y una reacción en la electricidad. Se trataba solo de pruebas cualitativas, como los experimentos descritos en esta sección. No midieron la fuerza ejercida por el ámbar ni la fuerza opuesta ejercida por los cuerpos circundantes.

3.7 Newton y la electricidad

Como vimos en la sección 3.6, entre 1660 y 1675, Fabri y Boyle descubrieron que las acciones eléctricas son recíprocas. Unos años más tarde, en 1687, Isaac Newton

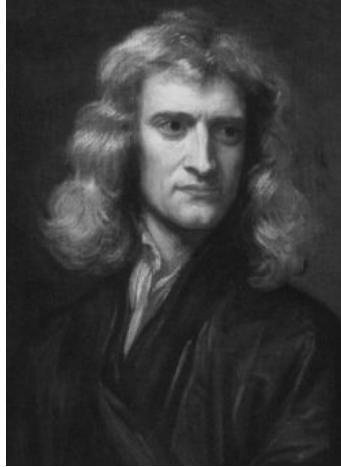


Figura 3.22: Isaac Newton (1642–1727). Se trata del retrato más famoso de Newton. Fue realizado por Godfrey Kneller (1646–1723) en 1689. Newton aparece con su cabello natural, en la cima de su carrera científica, dos años después de la publicación de los *Principia*.

(1642–1727), figura 3.22, incluyó el principio de acción y reacción como uno de los pilares de toda la física.

Se trata del tercer axioma o ley del movimiento que incluyó en su famosa obra, conocida por su nombre latino, *Principia*. El autor es responsable de la traducción al portugués de los *Principia*.²⁹ Utilizaremos la traducción al castellano, realizada por Eloy Rada García, *Principios matemáticos de la filosofía natural*.³⁰ El tercer axioma de Newton, o tercera ley del movimiento, se formuló de la siguiente manera:³¹

Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: O sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en direcciones opuestas.

Es importante señalar que Newton pensaba que este axioma debía ser válido para todas las interacciones conocidas: gravitacionales, eléctricas, magnéticas, elásticas, fuerzas de contacto, fricciones, colisiones, etc. Además, para Newton, este principio tenía tanto un significado cualitativo como un aspecto cuantitativo muy preciso, a saber, que cada acción siempre provoca una reacción de igual intensidad. Además, están alineadas a lo largo de la línea recta que une los dos cuerpos, dirigidas hacia las partes correspondientes. Por acción y reacción, Newton se refería a las fuerzas mutuas entre los dos cuerpos, que se miden cuantitativamente por las variaciones de la cantidad de movimiento lineal de cada cuerpo por unidad de tiempo. Lo que llamamos cantidad de movimiento lineal, Newton lo llamaba cantidad de movimiento, ya que es proporcional a la masa del cuerpo multiplicada por su velocidad en relación

²⁹[New90c], [New08] y [New10].

³⁰[New16].

³¹[New16, p. 103].

con el espacio absoluto. Este trabajo fundamental de Newton marca una nueva era en la física, una era en la que la ciencia alcanzó un alto grado de precisión.

En los *Principia*, Newton presentó las colisiones y las fuerzas de contacto como ejemplos de interacciones que satisfacen el principio de acción y reacción. En cuanto a las acciones a distancia, citó los ejemplos de la gravedad y el magnetismo, discutiendo este último en los siguientes términos:³²

En las atracciones muestro esto brevemente como sigue: Imaginemos dos cuerpos cualesquiera A, B que se atraen mutuamente; imaginemos un obstáculo cualquiera interpuesto entre ellos que impida su choque. Si uno de los dos cuerpos A es atraído hacia B más que B hacia A , el obstáculo será empujado más por la presión del cuerpo A que por la presión del cuerpo B y, en consecuencia, no permanecerá en equilibrio. Prevalecerá la presión más fuerte y hará que el sistema de los dos cuerpos y el obstáculo se mueva hacia B en línea recta y, con un movimiento continuamente acelerado, en espacios libres iría hasta el infinito. Lo cual es absurdo y contrario a la primera Ley, pues por la primera Ley el sistema deberá permanecer en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo y, por tanto, ambos cuerpos empujarán igualmente al obstáculo y, por tanto, se atraerán mutuamente con igualdad. Ensayé esto con hierro e imán. Si se colocan éstos aparte en vasijas adecuadas y contiguas y flotan juntas en un baño de agua, ninguno de ellos impulsará al otro sino que mutuamente con iguales atracciones cada uno sostendrá los impulsos del otro y finalmente puestos en equilibrio reposarán.

En la Cuestión 8ª de la *Óptica*, describe experimentos sobre la electricidad:³³

Cuestión 8ª—¿ Emiten luz y tienen brillo todos los cuerpos sólidos cuando se les calienta más allá de cierto límite, y esa emisión la produce el movimiento vibratorio de sus partículas ? ¿ Emiten luz todos los cuerpos que contienen principalmente partículas térreas, especialmente si son sulfurosas, cuando esas partículas son suficientemente agitadas, sea que esa agitación esté producida por el calor, la fricción, la percusión, la putrefacción, por algún movimiento vital o por cualquier otra causa ? [...]

Así también, un globo de vidrio de 8 a 10 pulgadas [de 20 a 25 cm] de diámetro, colocado en un marco en el que pueda girar rápidamente alrededor de un eje, llega a brillar cuando roza con la palma de la mano aplicada sobre el mismo, y, si al mismo tiempo se pone un trozo de papel blanco, una tela blanca o la punta de un dedo a una distancia como de un cuarto de pulgada [0.6 cm] de la parte del globo que se mueve más rápidamente, el vapor eléctrico excitado por la fricción del vidrio con la mano, al chocar con el papel, la tela o el dedo, se agita de tal modo que llega a emitir luz, y hacer que el papel blanco, la tela o el dedo aparezcan luminosos como un gusano de luz; y ese vapor al desprenderse con fuerza del vidrio contra el dedo produce a veces en éste una presión perceptible. Los mismos fenómenos han sido observados frotando un cilindro largo y grueso de vidrio o de ámbar con un papel, sostenido con la mano, hasta que el cilindro se pone caliente.

La electricidad también se menciona en la Cuestión 31ª, donde Newton destaca las interacciones mutuas a distancia entre los cuerpos:³⁴

³²[New16, pp. 113–114].

³³[New47, p. 317] con traducción al portugués en [New96].

³⁴[New47, pp. 351–352].

Cuestión 31^a—¿ Tienen las pequeñas partículas de los cuerpos ciertas potencias, virtudes o fuerzas mediante las cuales actúan a distancia, no solamente sobre los rayos de luz, reflejándolos, refractándolos y encorvándolos, sino también unas sobre otras, para producir gran parte de los fenómenos de la Naturaleza ? Es bien sabido que los cuerpos actúan unos sobre otros mediante las atracciones de la gravedad, del magnetismo y de la electricidad, y esos casos indican el tenor y el orden de la Naturaleza, y que es posible la existencia de otras potencias atractivas, puesto que la Naturaleza es muy constante y conforme a sí misma. No trato de examinar aquí cómo tienen lugar esas atracciones. Lo que llamo atracción puede realizarse por impulsiones o por otros medios, para mí desconocidos; empleo aquí esa palabra solamente para indicar cualquier fuerza mediante la cual los cuerpos tienden a dirigirse los unos hacia los otros, cualquiera que sea la causa de esa tendencia. Porque debemos aprender en los fenómenos de la Naturaleza qué cuerpos se atraen y cuáles son las leyes y las propiedades de esa atracción, antes de investigar la causa que la produce. Las atracciones de la gravedad, del magnetismo y de la electricidad se ejercen a distancias considerables, y por eso han sido observadas por los ojos del vulgo; pero puede haber otras que por ejercerse sólo a distancias muy pequeñas hayan escapado hasta ahora a la observación; es posible que la atracción eléctrica exista a distancias muy pequeñas, aun sin ser excitada por la fricción.

También menciona las atracciones eléctricas en los *Principia*. En el libro III:³⁵

Proposición VII. Teorema VII.

La gravedad ocurre en todos los cuerpos y es proporcional a la cantidad de materia existente en cada uno. [...]

COROLARIO 1. Por consiguiente, la gravedad hacia todo el planeta surge y se compone de la gravedad hacia cada parte. De lo cual tenemos ejemplos en las atracciones magnéticas y eléctricas. Pues la atracción entera hacia el todo surge de las atracciones hacia cada parte.

En el Scholium general al final del libro, también menciona la electricidad, subrayando una vez más las interacciones mutuas entre los cuerpos:³⁶

Bien podríamos ahora añadir algo de cierto espíritu sutilísimo que atraviesa todos los cuerpos gruesos y permanece latente en ellos; por cuya fuerza y acciones las partículas de los cuerpos se atraen entre ellas a las mínimas distancias y una vez que están contiguas permanecen unidas; y los cuerpos eléctricos actúan a distancias mayores, tanto repeliendo como atrayendo a los corpúsculos vecinos; y la luz se emite, se refleja, se refracta e inflexiona y calienta a los cuerpos; y toda sensación es excitada, y los miembros de los animales se mueven a voluntad, a saber mediante las vibraciones de ese espíritu propagadas por los filamentos sólidos de los nervios desde los órganos externos de los sentidos hasta el cerebro y desde el cerebro hacia los músculos. Pero esto no puede exponerse en pocas palabras; y tampoco está disponible un número suficiente de experimentos mediante los cuales deben determinarse y mostrarse exactamente las leyes de las acciones de este espíritu.

Estas citas muestran que, en la mente de Newton, la electricidad desempeñaba un papel fundamental en los fenómenos naturales.

³⁵[New16, pp. 21–22].

³⁶[New16, p. 646].

Capítulo 4

La atracción y la repulsión eléctricas

4.1 ¿Existe la repulsión eléctrica?

Todas las experiencias descritas hasta ahora en este libro se centraron en la atracción entre cuerpos. Pero los fenómenos eléctricos también se caracterizan por la repulsión.

Experimento 4.1

Una forma muy sencilla de observar la repulsión eléctrica es utilizando una tira de bolsa de plástico. Recorte una tira de 2 cm de ancho y de 10 a 20 cm de largo. Cuélguela de un soporte horizontal (un palito de madera, un lápiz o un dedo). Las dos mitades de la tira neutra están inicialmente suspendidas verticalmente, paralelas entre sí, como se muestra en la figura 4.1 (a). A continuación, frotamos las dos mitades con el mismo material (por ejemplo, pasándolas entre los dedos o frotándolas sobre un trozo de papel). Una vez soltadas, se repelen, alejándose lateralmente, figura 4.1 (b).

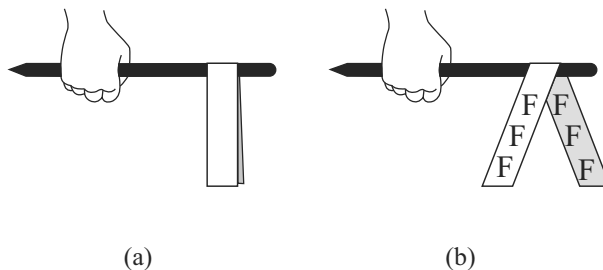


Figura 4.1: (a) Una tira de plástico neutra está suspendida verticalmente de un palito de madera horizontal. (b) Repulsión entre las dos mitades de una tira de plástico frotada.

También es posible observar este efecto con dos trozos de pajita de plástico de unos 5 cm de largo cada uno. Se ata un extremo de cada pajita a cada extremo de un hilo de seda o nailon de unos 10 o 20 cm de largo. El hilo se cuelga por su centro de un soporte horizontal de manera que las dos pajitas neutras permanezcan inicialmente una al lado de la otra en posición vertical, con sus extremos libres apuntando hacia abajo. Cuando se frota las dos pajitas con el mismo material, comienzan a repelerse entre sí después de soltarlas, desplazándose hacia afuera. Cuanto más fino sea el soporte horizontal, más visible será el fenómeno.

Una tercera alternativa utiliza globos de goma inflados. Dos globos, sostenidos por hilos, se cuelgan inicialmente de manera que se toquen. Cuando los globos se frota con el cabello, comienzan a repelerse. Se alejan el uno del otro y dejan de tocarse.

En todos estos casos, observamos la repulsión de cuerpos hechos del mismo material (dos tiras de plástico, dos pajitas o dos globos de goma) que fueron frotados con la misma sustancia. Se trata de un fenómeno nuevo que no se había observado en experimentos anteriores.

Experimento 4.2

Utilizando dos versorios de plástico, podemos observar la orientación eléctrica debida a la repulsión. Frotamos solo una pata de cada versorio con la misma sustancia, por ejemplo, una hoja de papel o nuestro cabello. Los dos versorios se colocan uno al lado del otro, paralelos entre sí, con las patas frotadas apuntando en la misma dirección. Una vez soltados, los extremos frotados se repelen. Debido a esta repulsión, los versorios giran alrededor de su eje vertical de tal manera que, al final del proceso, los extremos frotados permanecen alineados, pero a la mayor distancia posible entre sí, figura 4.2.

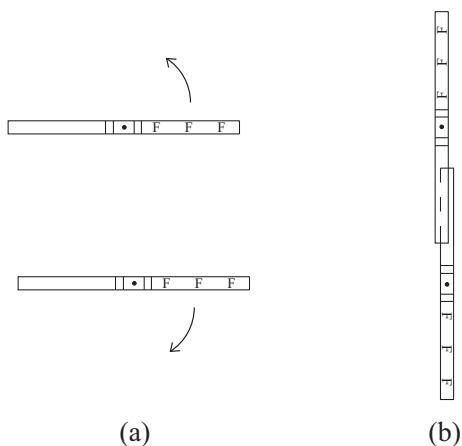


Figura 4.2: (a) Repulsión entre las patas frotadas de dos versorios de plástico, vistas desde arriba, colocadas una al lado de la otra en direcciones paralelas. (b) Orientación de equilibrio final de los dos versorios.

Este efecto es más visible si los dos versorios están inicialmente muy cerca uno del otro. Para evitar cualquier contacto entre las dos patas que no se rozaron después de la rotación de los versorios, puede colocar uno de los versorios ligeramente más alto que el otro, de modo que después de la repulsión, la pata de un versorio quede por encima de la pata del otro.

También hay que tener en cuenta que los versorios giran en direcciones opuestas tras su liberación. Mientras que una gira en el sentido de las agujas del reloj, la otra gira en sentido contrario. Esto significa que el par ejercido por el versorio *A* sobre el versorio *B* es opuesto al par ejercido por el versorio *B* sobre el versorio *A*.

Para recordar más fácilmente qué pata se frotó, se puede marcar con una gota de tinta, un bolígrafo o una pequeña muesca.

Experimento 4.3

Otra variante del experimento 4.2 consiste en frotar las dos patas de cada versorio. A continuación, se colocan en línea recta, con sus extremos muy próximos entre sí, casi en contacto. Una vez liberadas, giran en direcciones opuestas. Cuando se detienen, quedan paralelas entre sí, una al lado de la otra, como se muestra en la figura 4.3.

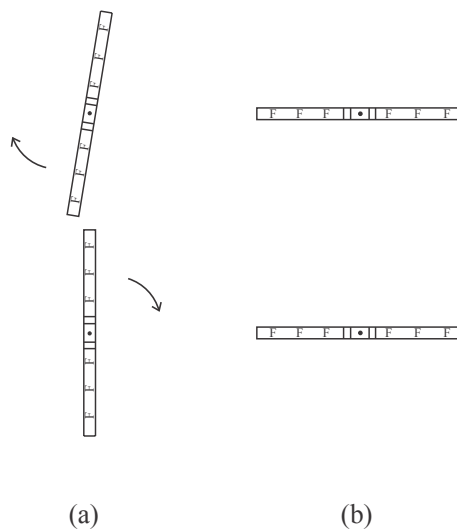


Figura 4.3: (a) Repulsión entre dos versorios de plástico, vistos desde arriba, que se frotaron a lo largo de toda su longitud al colocarlas una junto a otra y alineadas en la misma dirección. (b) Orientaciones finales de equilibrio de los dos versorios.

4.2 El experimento de Guericke con un plumón flotante

Experimento 4.4

Ahora vamos a realizar un nuevo experimento, similar al que tuvo una gran importancia histórica. Primero tomamos un objeto como un plumón, una semilla de diente de león o unas hebras de algodón. Es importante que el objeto elegido tarde mucho tiempo en caer al suelo, por ejemplo, unos 10 segundos para recorrer una distancia de 2 metros. Aún mejor si cae más lentamente. Por el contrario, si cae mucho más rápido, no será posible observar los efectos aquí descritos.

Empezamos frotando una pajita de plástico con el cabello. Para determinar si la pajita está bien cargada, podemos utilizar la prueba de la pared descrita en el experimento 3.6. A continuación, sujetamos la pajita frotada horizontalmente entre los dedos por un extremo. Con la otra mano, soltamos el plumón, la semilla de diente de león o las hebras de algodón un poco por encima de la pajita. El objeto es atraído por la pajita y se adhiere a ella. Si observamos atentamente el objeto, podemos ver cómo se estiran sus fibras, como si quisieran alejarse de la pajita. Esto ocurre por la misma razón por la que los objetos utilizados en el experimento 4.1 se repelen entre sí. A veces, el objeto salta hacia arriba después del contacto, alejándose de la pajita frotada. Si esto no ocurre inmediatamente, podemos hacer que el objeto se desprenda golpeando suavemente la pajita o soplando suavemente sobre el objeto. Una vez que el objeto se desprendió de la pajita y comienza a caer, podemos colocar la pajita frotada debajo del objeto en caída. El objeto es entonces repelido por la pajita y se desplaza hacia arriba. A veces, esto no ocurre inmediatamente, ya que el objeto debe tocar la pajita frotada dos o tres veces y desprenderse después de cada contacto antes de que la pajita pueda repelerlo claramente. Cuanto más electrizada esté la pajita, más rápido se repelerá el objeto después de tocarla. A partir de ahora, supondremos que el objeto ya flota en el aire, repelido por la pajita frotada situada debajo, como en la figura 4.4.

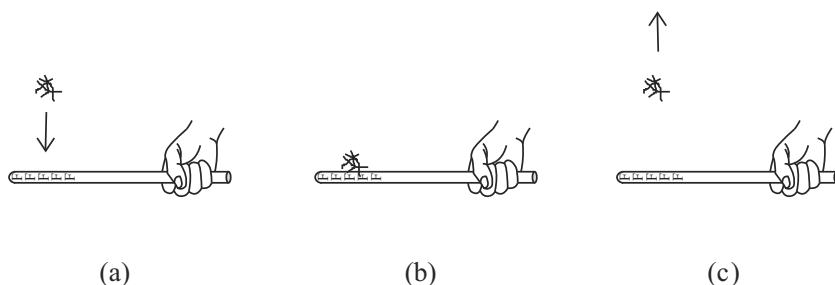


Figura 4.4: (a) Unas hebras de algodón son inicialmente atraídas por una pajita de plástico frotada. (b) El algodón toca la parte frotada de la pajita. (c) Tras el contacto, el algodón es repelido por la pajita. ¡Entonces puede permanecer suspendido sobre la pajita a pesar de la atracción gravitatoria de la Tierra!

La figura 4.5 ilustra un experimento similar realizado con una semilla de diente de

león. La semilla de diente de león cae de forma natural muy lentamente, por lo que es adecuada para este experimento. Es fácil mantenerla en suspensión sobre una pajita de plástico frotada con cabello.

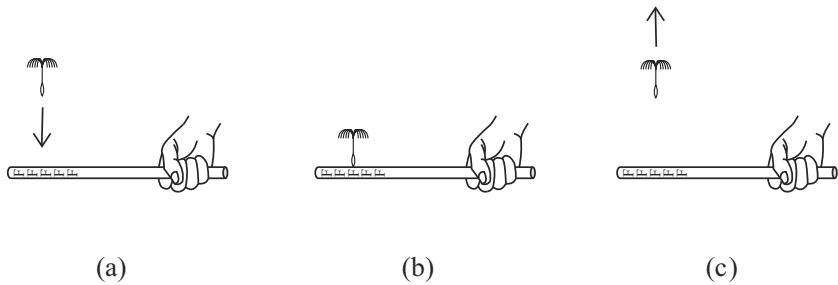


Figura 4.5: El experimento 4.4 se puede realizar fácilmente con una semilla de diente de león flotando sobre una pajita de plástico frotada con cabello.

Al mover lentamente la pajita frotada por debajo del objeto, podemos desplazarlo a cualquier lugar de la habitación. Si el objeto se acerca demasiado a nuestro cuerpo o a cualquier otro objeto de la habitación, es atraído hacia nuestro cuerpo o hacia ese objeto y se pega a él. Para evitarlo, utilizamos la pajita frotada para alejar el objeto de esos cuerpos. En este caso, el objeto puede permanecer fácilmente en suspensión durante un tiempo a una distancia de entre 10 y 20 cm por encima de la pajita, dependiendo del grado de electrización de esta. Para mantener el objeto en suspensión, la pajita frotada debe moverse constantemente por debajo de él, siguiendo su movimiento, con el fin de guiar su trayectoria. Con una semilla de diente de león, el procedimiento suele ser más fácil. Cuando se suelta en el aire por encima de la pajita frotada, es atraída por la pajita, la toca y es repelida inmediatamente. Se trata de un experimento muy sencillo, pero extremadamente curioso. Nadie que lo realice olvida lo que ve.

Un experimento como este tuvo una importancia histórica considerable. Fue realizado por primera vez por Otto von Guericke (1602–1686), figura 4.6.¹

Apareció en su libro sobre «Las nuevas experiencias de Magdeburgo», publicado en 1672 en latín. Según el prefacio de esta obra, el libro se había terminado en realidad en 1663. En un momento dado de su vida, Guericke fue alcalde de Magdeburgo. En este libro, describe la bomba de aire que inventó basándose en el descubrimiento de la capacidad de bombeo del aire. En 1657, la utilizó para realizar en Magdeburgo la ahora famosa demostración pública de las enormes fuerzas debidas a la presión atmosférica.² Disponía de una esfera hueca compuesta por dos hemisferios de cobre que se tocaban uno al lado del otro. El aire del interior de la esfera se extrajo con ayuda de su bomba. Una vez extraído el aire, dos grupos de ocho caballos tirando de cada lado tuvieron enormes dificultades para separar los hemisferios. Sin embargo, cuando se permitió que el aire entrara en la esfera, una sola persona pudo separar fácilmente los dos hemisferios.

¹[Hei99, pp. 215–218].

²[Kra81].



Figura 4.6: Otto von Guericke (1602–1686).

Pero lo que nos interesa aquí es otro experimento realizado por Guericke. Su ilustración que describe este experimento se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7: El experimento de Guericke, en el que mantuvo un plumón suspendido sobre un globo de azufre frotada, así como su máquina eléctrica.

Citaremos su famosa obra, tomando como fuente la versión inglesa:^{3,4}

³[Gue94, Livre 4, chapitre 15, pp. 227–231].

⁴*The Experiment Wherein these Aforementioned Important Virtues can be Excited through Rubbing on a Sulphur Globe*

If one is so minded, he should take a glass sphere, a so-called phial, the size of a baby's head and pour in sulphur that has been powdered in a mortar. Then, by heating it, he should cause the powder to melt. After cooling it he should break the glass sphere, extract the ball which remains and store it away in a dry place of low humidity. [...]

El experimento en el que las importantes virtudes antes mencionadas pueden activarse frotando un globo de azufre

Si alguien lo desea, debe tomar una esfera de vidrio, llamada «fiole», del tamaño de la cabeza de un bebé, y verter en ella azufre molido en un mortero. A continuación, debe calentarla para que el polvo se derrita. Después de enfriarla, debe romper la esfera de vidrio, extraer la bola que queda dentro y guardarla en un lugar seco y con poca humedad. [...]

Sección 2.

Para demostrar la virtud conservadora presente en este globo, se debe colocar una varilla a través de su núcleo sobre dos soportes, *ab*, en un soporte etiquetado como *abcd*. Este debe tener una altura equivalente al ancho de una palma desde la base y debajo de él se deben esparcir todo tipo de fragmentos o trozos de hojas, oro, plata, papel, plantas de lúpulo y otras partículas diminutas. A continuación, se debe tocar la esfera con la mano seca y frotarla o acariciarla dos o tres veces, etc. En ese momento, atraerá hacia sí los fragmentos mencionados anteriormente. Si se gira el globo sobre su eje, llevará consigo estos trozos. Ahora podemos percibir visualmente cómo la esfera de nuestra Tierra sostiene y mantiene a todos los animales y otros cuerpos en su superficie y los transporta con ella en su movimiento diario de veinticuatro horas. [...]

Sección 3.

Se puede demostrar claramente la presencia de la virtud expulsiva en este globo cuando se retira del soporte mencionado anteriormente y se sostiene en la mano, se frota o se acaricia de la manera ya descrita. Entonces, no solo atrae, sino que también repele de nuevo pequeños cuerpos del tipo mencionado anteriormente (dependiendo del tiempo que haga). Una vez que tocó estos cuerpos, no los atrae de nuevo hasta que estos tocaron posteriormente algún otro cuerpo. Esta virtud se aprecia con especial claridad en su efecto sobre plumones muy suaves y ligeros, *a*, (porque caen a la Tierra más lentamente que otros trozos y fragmentos).

Section 2. In order to demonstrate the conserving virtue present in this globe, one should set it up with a rod through its core on two supports, *ab*, on a stand labelled, *abcd*. This should be a palm's width in height from the base and all kinds of shreds or bits of leaves, gold, silver, paper, hop plants and other tiny particles should be strewn beneath it. Then one should touch the sphere with a dry hand and rub or stroke it two or three times etc. At this point it will attract the aforementioned fragments to it. If the globe is rotated on its axis, it will carry these bits along with it. Now we can visually perceive how the sphere of our earth holds and maintains all animals and other bodies on its surface and carries them about with it in its daily twenty-four hour motion. [...]

Section 3. One can clearly demonstrate the presence of the expulsive virtue in this globe when it is removed from the aforementioned stand and being held in the hand, is rubbed or stroked in the manner already described. Then it not only attracts, but also again repels from itself small bodies of the kind mentioned above (depending upon the prevailing weather). Once it has touched these bodies, it does not attract them again until they have subsequently touched some other body. This virtue can be seen particularly clearly in its effect upon very soft and light feathers, *a*, (because they fall to Earth more slowly than other bits and shreds). Thus when the feathers are propelled upwards and hang in the sphere of virtue of this globe, they can float for quite a long time and be carried around the whole room with the globe wherever one wishes. [...]

Así, cuando los plumones son impulsados hacia arriba y quedan suspendidos en la esfera de virtud de este globo, pueden flotar durante bastante tiempo y ser transportados por toda la habitación con el globo, allá donde se desee. [...]

El experimento 4.4 es similar al de Guericke, pero utiliza una pajita de plástico en lugar de un globo de azufre. Sin embargo, hay que señalar que el propio Guericke no consideraba que la repulsión del plumón o, como él decía, la «virtud expulsiva» del globo, fuera un fenómeno intrínsecamente eléctrico. Para Guericke, esta propiedad del globo de azufre era análoga a la fuerza repulsiva ejercida por la Tierra en determinadas circunstancias. En consecuencia, hoy en día se considera que Guericke no descubrió ni reconoció una verdadera repulsión eléctrica.

El aparato de Guericke es considerado por algunos autores como la primera máquina eléctrica, es decir, el primer equipo que permitía electrizar objetos. Pero el propio Guericke probablemente no estaría de acuerdo con esta afirmación. Para Guericke, el globo de azufre era un simulacro de la Tierra. Las diferentes «virtudes» manifestadas por el globo, atractivas y repulsivas, simulaban las virtudes análogas de nuestro planeta. Por lo tanto, para Guericke, estas virtudes no eran verdaderamente eléctricas. En los trabajos de Roller y Roller, Krafft y Heilbron se encuentra un análisis detallado de este tema.⁵

El primer instrumento construido intencionadamente para producir la electrización de los cuerpos se debe a Francis Hauksbee (aproximadamente 1666–1713), figura 4.8.⁶ La manivela y la polea hacen girar la rueda pequeña, que a su vez hace girar el globo de vidrio. Hauksbee frotaba la superficie externa del globo en rotación con una hoja de papel o con las manos desnudas. Un instrumento como este se denomina «máquina eléctrica», «máquina electrostática», «generador triboeléctrico» o «generador eléctrico por fricción».

Gray y Hauksbee realizaron experimentos similares a los de Guericke en 1708. En los experimentos de Gray y Hauksbee, el plumón era atraído y luego repelido por un vidrio flint frotado, que es un tipo especial de vidrio que contiene plomo en su composición.⁷ Más adelante veremos cómo este experimento desempeñó un papel crucial en un gran descubrimiento realizado por Du Fay. El artículo de Gray de 1708 no se publicó hasta 1954.⁸ Gray no cita el libro de Guericke, pero es posible que conociera sus trabajos, aunque no es seguro. Hauksbee vio el artículo original de Gray y contribuyó a impedir su publicación.⁹ Hauksbee publicó experimentos similares con plumones flotantes sin mencionar el nombre de Gray.

En su artículo de 1708, Gray describe doce experimentos realizados con un tubo de vidrio de entre 70 y 80 cm de largo y de 2 a 3 cm de diámetro. Frotó el tubo con las

⁵[RR57, pp. 565–568], [Kra81], y [Hei99, pp. 215–216].

⁶[Hau09, Placa VII], [RR57, pp. 565–568], [Hom67], [Hom81, pp. xiv–xv, 14, 42, 77 y 78n], [Que], [Hei81d] y [Hei99, pp. 230–234].

⁷[Chi54], [Hau08], [RR57, pp. 570 y 584–585], [Hom81, p. 13], y [Hei99, pp. 235–236].

⁸[Chi54].

⁹[Hei81c] y [Hei99, p. 236].

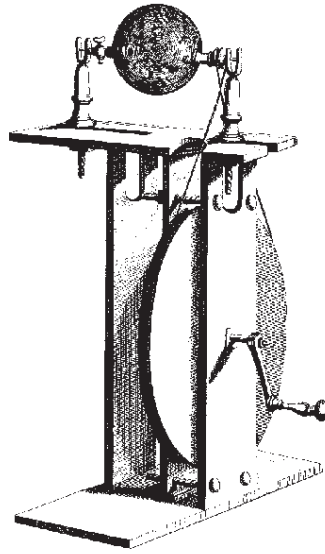


Figura 4.8: La máquina eléctrica de Hauksbee.

manos desnudas. Aquí solo citamos los cuatro primeros experimentos:^{10, 11, 12, 13}

Exp. 1. Un plumón que se soltó de los dedos llegó al tubo [frotado] de vidrio a una distancia de más de 30 pulgadas [76 cm]; algunas de las fibras más pequeñas respondieron al movimiento de la mano mientras el vidrio se frotaba a una distancia de más de 50 pulgadas [1.3 m]. [Una ilustración de este experimento aparece en las figuras 4.9 y 4.10.]

¹⁰[Chi54, pp. 34–35].

¹¹Exper. 1st A down feather being let goe from the fingers came to the [rubbed] Glass [tube] at the distance of more than 30 inches [76 cm] some of the smallest fibres answerd to the motion of then hand whilst the Glass was Rubing at the Distance of more than 50 inches [1.3 m].

¹²Exp. 2^d if when the feather is come to the Glass it be held at about 6 or 8 inches [15 or 20 cm] Distance from the side of a wall edge of a Table Arme of a Chair or the like it will be drawn to it and thence to the Glass again and that for 10 or 15 times together without ceasing it flies to object at a greater Distance but then does not soe often Return.

¹³Exp. 3^d when the feather is on the Glass and half of its fibres are extended towards it the other from it diverging in two cones that Remotest from the Glass is much more obtuse than the other if when the feather is in this posture you Pinch its fibres between your thumb and finger they will draw back soe soon as let goe and Imediatly cleave to the Glass and as if they had Retained some sence of the Injurie offerd them will hardly be Allured to salute your fingers again but this is not ollwais alike Precented.

Exp. 4th When the feather is come to the Glass and thence Reflected if you follow it with the Glass twill flee from it and will by noe means be made to touch it till driven near to the next wall in the Room or some other solid object by which twill be attracted and freely return to the glass again Repeating its Reflections as in the second experiment soe I have sometimes caried the feather round the Room at the Distance of 5 or 6 inches [13 or 15 cm] without touching it and could move it upwards downwards inclineing or Horizontally in a line or Circle according to the motion of the Glass and if when the feather was floating in the air I Rubed the Glass the feather would Remove farther from it yet would respond to the motion of my hand by a vibrating motion not to be accounted for by that of the air.

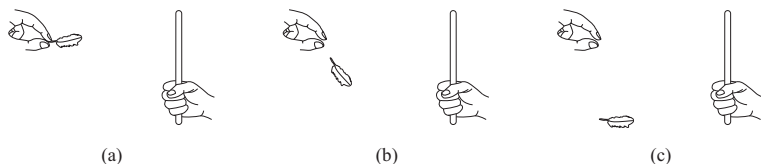


Figura 4.9: Se suelta un plumón cerca de un tubo de vidrio no frotado. Cae al suelo.

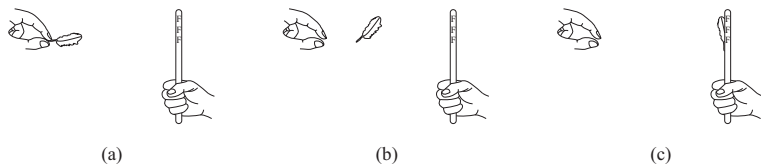


Figura 4.10: El experimento de Gray en el que se muestra cómo un plumón es atraído por un vaso frotado.

Exp. 2. Si cuando el plumón llega al vidrio se sostiene a unas 6 u 8 pulgadas [15 o 20 cm] de distancia del borde de una pared, el borde de una mesa, el brazo de una silla o similar, será atraída hacia él y de ahí hacia el vidrio de nuevo, y eso durante 10 o 15 veces seguidas sin cesar, volará hacia objetos a mayor distancia, pero entonces no volverá tan a menudo. [En la figura 4.11 se muestra una ilustración de este experimento.]

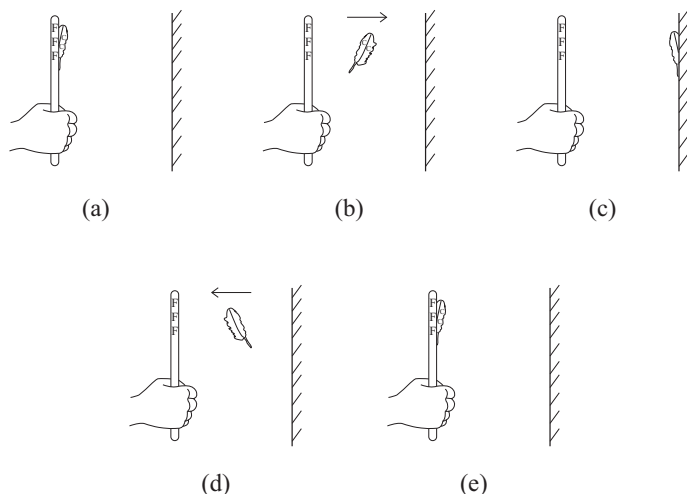


Figura 4.11: El experimento de Gray en el que se muestra un plumón oscilando entre un vaso frotado y una pared.

Exp. 3. Cuando el plumón está sobre el vidrio y la mitad de sus fibras se extienden hacia él y la otra mitad se aleja de él divergiendo en dos conos, el más alejado del

vidrio es mucho más obtuso que el otro; si, cuando el plumón está en esta postura, pellizque sus fibras entre el pulgar y el índice, se retraerán tan pronto como las sueltes y se adherirán inmediatamente al vidrio, como si hubieran conservado algún recuerdo de la injuria que se les infligió, difícilmente se dejarán atraer para saludar de nuevo a sus dedos, pero esto no siempre ocurre así.

Exp. 4. Cuando el plumón llega al vidrio y se refleja en él, si la sigue con el vidrio, huirá de él y no habrá forma de que la toque hasta que la acerque a la pared más cercana de la habitación o a algún otro objeto sólido por el que se sienta atraída y vuelva libremente al vidrio, repitiendo sus reflejos como en el segundo experimento, por lo que a veces llevé el plumón por la habitación a una distancia de 5 o 6 pulgadas [13 o 15 cm] sin tocarla y podía moverla hacia arriba, hacia abajo, inclinándola o horizontalmente en línea recta o en círculo, según el movimiento del vidrio, y si, cuando el plumón flotaba en el aire, yo frotaba el vidrio, el plumón se alejaba aún más de él, pero respondía al movimiento de mi mano con un movimiento vibratorio que no podía explicarse por el del aire.

4.3 Du Fay reconoce la repulsión eléctrica como un fenómeno real

Los experimentos descritos en estas secciones aportan algo nuevo y extremadamente importante. Hasta ahora, solo habíamos observado la atracción o la ausencia de atracción entre un cuerpo frotado y las sustancias ligeras circundantes. Ahora descubrimos que también existe una «repulsión» eléctrica.

Aunque algunos investigadores observaron la repulsión eléctrica en algunas ocasiones, por lo general se interpretaba como un efecto secundario. A veces, este fenómeno se interpretaba como una simple repulsión «aparente». A continuación presentamos algunas explicaciones alternativas. (a) Algunas personas pensaban que este comportamiento se debía a un flujo de aire que alejaba las sustancias ligeras del cuerpo frotado. (b) Otra interpretación era que esta repulsión «aparente» era en realidad una atracción ejercida por otros cuerpos circundantes sobre la sustancia ligera. Según esta interpretación, no era el ámbar frotado el que comenzaba a repeler la sustancia ligera, sino que esta era atraída por otros cuerpos circundantes que, de alguna manera, habían adquirido cierta electricidad. Si ese era el caso, la sustancia ligera podía alejarse del ámbar frotado si sufría una atracción más débil por parte del ámbar que por parte de los cuerpos circundantes. (c) Otra interpretación que a veces se daba para explicar la repulsión observada era que se asemejaba a una colisión. En otras palabras, el cuerpo era primero atraído por el ámbar frotado, colisionaba con él y luego salta a cierta distancia. Este rebote se interpretaba de forma mecánica, y no como una verdadera repulsión eléctrica.

No fue hasta la publicación de los trabajos de Charles François de Cisternay Du Fay en 1733 y 1734 cuando la repulsión se reconoció como un fenómeno legítimo y característico de las interacciones eléctricas.¹⁴ Existe una hermosa biografía de Du Fay, figura 4.12, escrita por Heilbron.¹⁵ Tras los trabajos iniciales de Gray, Du Fay

¹⁴[Hei99, pp. 5 y 255–258].

¹⁵[Hei81b].

logró publicar artículos notables que contenían descubrimientos fundamentales sobre la electricidad.¹⁶



Figura 4.12: Du Fay (1698–1739).

Citaremos aquí las palabras de Du Fay en las que describe cómo llegó a la conclusión de que la repulsión eléctrica era un fenómeno real (el énfasis en cursiva es nuestro).^{17,18} Es interesante señalar que el propio Du Fay no consideraba inicialmente la repulsión como un fenómeno real, pero luego cambió de opinión debido a las pruebas experimentales:

¹⁶ [DF33a], [DF33c], [DF33d], [DF33b], [DF34a], [DF34b], [DF34c], [DF37b] y [DF37a].

¹⁷ [DF33b, pp. 457–458].

¹⁸ *De l'Attraction & Répulsion des Corps Électriques*.

Nous avons toujours considéré jusqu'à présent la vertu électrique en général, & sous ce mot on a entendu non seulement la vertu qu'ont les corps électriques d'attirer, mais aussi celle de repousser les corps qu'ils ont attirés. Cette répulsion n'est pas toujours constante, & elle est sujette à des variétés qui m'ont engagé à l'examiner avec soin, & je crois avoir découvert quelques principes très-simples qu'on n'avoit point encore soupçonnés, & qui rendent raison de toutes ces variétés, ensorte que je ne connois jusqu'à présent aucune expérience qui ne s'y accorde très-naturellement.

J'avois observé que les corps légers n'étoient ordinairement repoussés par le tube que lorsque l'on en approchoit quelque corps d'un volume un peu considérable, & cela me faisoit penser que ces derniers corps étoient rendus électriques par l'approche du tube, & qu'alors ils attiroient à leur tour le duvet, ou la feuille d'or, & qu'ainsi il étoit toujours attiré, soit par le tube, soit par les corps voisins, mais qu'il n'y avoit jamais de répulsion réelle.

Une expérience que M. de Reaumur m'indiqua, s'opposoit à cette explication; elle consiste à poser au bord d'une carte un petit monceau de poudre à mettre sur l'écriture, on approche de ce monceau un bâton de cire d'Espagne rendu électrique, & on voit très-clairement qu'il chasse au de-là de la carte des particules de poudre, sans qu'on puisse soupçonner qu'elles soient attirées par aucun corps voisin.

Une autre expérience aussi simple, & encore plus sensible, *acheva de me prouver que ma conjecture étoit fausse*. Si l'on met des feuilles d'or sur une glace, & que l'on approche le tube par dessous, les feuilles sont chassées en haut sans retomber sur le glace, & on ne peut certainement expliquer ce mouvement par l'attraction d'aucun corps voisin. La même chose arrive à travers la gaze de couleur, & les autres corps qui laissent passer les écoulements électriques, en sorte qu'on ne peut pas douter qu'il n'y ait une répulsion réelle dans l'action des corps électriques.

Hasta ahora siempre consideramos la virtud eléctrica en general, y con este término nos referimos no solo a la virtud que tienen los cuerpos eléctricos de atraer, sino también a la de repeler los cuerpos que atrajeron. Esta repulsión no es siempre constante, y está sujeta a variaciones que me llevaron a examinarla con detenimiento, y creo haber descubierto algunos principios muy sencillos que aún no se habían sospechado y que dan razón de todas estas variaciones, de modo que hasta ahora no conozco ningún experimento que no concuerde con ellos de forma muy natural.

Había observado que los cuerpos ligeros solo eran repelidos por el tubo cuando se acercaba a ellos algún cuerpo de volumen considerable, y eso me hacía pensar que estos últimos cuerpos se volvían eléctricos al acercarse al tubo, y que entonces atraían a su vez el plumón o la hoja de oro, y que así siempre era atraído, ya fuera por el tubo o por los cuerpos vecinos, pero que nunca había una repulsión real.

Un experimento que me indicó el Sr. de Reaumur se oponía a esta explicación; consiste en colocar en el borde de un mapa un pequeño montón de polvo para escribir, se acerca a este montón un palito de cera española electrizado, y se ve muy claramente que expulsa partículas de polvo más allá del mapa, sin que se pueda sospechar que sean atraídas por ningún cuerpo cercano.

Otro experimento igualmente sencillo, y aún más sensible, *me demostró definitivamente que mi conjetura era falsa*. Si se colocan hojas de oro sobre un espejo y se acerca el tubo por debajo, las hojas son expulsadas hacia arriba sin caer sobre el espejo, y ciertamente no se puede explicar este movimiento por la atracción de ningún cuerpo cercano. Lo mismo ocurre a través de la gasa de color y otros cuerpos que dejan pasar las corrientes eléctricas, de modo que no cabe duda de que existe una repulsión real en la acción de los cuerpos eléctricos.

4.4 El péndulo eléctrico

Para detectar con mayor claridad otros fenómenos eléctricos, necesitamos instrumentos específicos. Ahora construiremos un «péndulo eléctrico», también llamado «péndulo electrostático». El procedimiento más sencillo consiste en fijar un hilo de seda a un soporte horizontal, como una pajita de plástico. También se puede utilizar un hilo sintético fino de poliamida, como el nailon, o un hilo de poliéster. *Es importante que este hilo no sea de algodón o lino, como el hilo de coser*. Atamos un trozo de papel o de papel de aluminio al extremo libre inferior del hilo. Este trozo de papel puede ser un disco, un cuadrado, un triángulo, etc., con un diámetro o una longitud máxima del orden de 1 o 2 cm. Por ahora, su forma no tiene importancia. El trozo de papel no debe estar arrugado ni fijado con cinta adhesiva. La cinta adhesiva puede impedir la observación de algunos fenómenos que se describirán aquí. Es preferible hacer un agujero en el trozo de papel con un alfiler y luego fijar el hilo en él, figura 4.13. En general, el papel de aluminio funciona mejor que el papel normal. En la sección 6.5, presentaremos los componentes fundamentales de un péndulo eléctrico como este, después de utilizarlo para realizar varios experimentos.

Otro método práctico consiste en utilizar pajitas de plástico fijas. Empezamos fabricando un soporte para todo el sistema. Puede ser un trozo de plastilina en el que

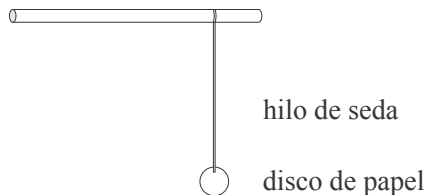


Figura 4.13: Un método sencillo para fabricar un péndulo eléctrico.

clavamos un clavo o un tensor de papel. El clavo o el tensor de papel se colocará dentro de la pajita para mantenerla en posición vertical. Por lo tanto, conviene elegir un clavo con el grosor y la longitud adecuados.

Se puede fabricar un soporte muy práctico a partir de vasos de plástico finos. Hacemos un pequeño agujero en el fondo del vaso y clavamos las dos patas de un tensor de papel. El vaso se coloca con la abertura hacia arriba. Lo llenamos con pasta de yeso húmeda o cemento blanco húmedo. Se secará en esta posición. Se utilizará con la abertura del vaso hacia abajo y el tensor de papel hacia arriba, figura 4.14. Dado que este tipo de soporte también se utilizará en otros instrumentos eléctricos, es útil preparar varios a la vez. Algunos experimentos pueden requerir hasta 10 bases de soporte.

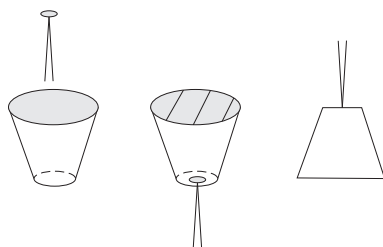


Figura 4.14: Soporte para el péndulo eléctrico compuesto por un vaso de plástico fino, un tensor de papel y pasta para modelar a base de yeso.

Después de este procedimiento, colocamos una pajita con forma de letra *L* invertida sobre el soporte. Otra alternativa consiste en utilizar dos pajitas, una colocada verticalmente sobre el soporte y otra horizontalmente. La segunda pajita se fija a la primera con un segundo tensor de papel. Las patas de este segundo tensor de papel forman un ángulo de 90° , una vertical y otra horizontal.

En el extremo libre de la pajita horizontal, fijamos el hilo de seda con el disco de papel fijado en su extremo inferior. El péndulo eléctrico está entonces terminado, figura 4.15.

Experimento 4.5

Montamos un péndulo eléctrico con un disco de papel en su extremo. Esperamos a que el péndulo esté en reposo, con el hilo de seda y el disco de papel suspendidos verticalmente hacia abajo. Ahora tomamos una pajita de plástico neutra, es decir, una

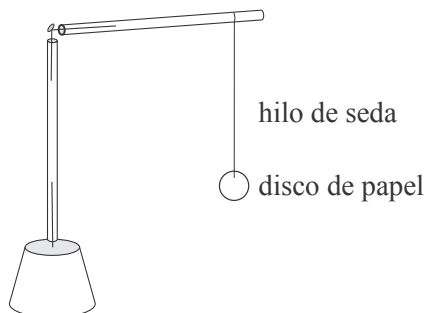


Figura 4.15: Péndulo eléctrico con soporte.

pajita que no atrae los pequeños trozos de papel ligeros que hay sobre una mesa, como en el experimento 2.1, figura 2.1. Acercamos esta pajita de plástico neutra al disco de papel del péndulo eléctrico. No ocurre nada. El péndulo permanece inmóvil en sentido vertical.

Frotamos otra pajita con el cabello, una hoja de papel o un paño. Acercamos lentamente la pajita frotada al péndulo. Observamos que el disco de papel comienza a desplazarse hacia la parte frotada de la pajita. Por ahora, no las pondremos en contacto. En esta situación, el hilo de seda del péndulo permanece inclinado con respecto a la vertical, con el disco de papel cerca de la parte frotada de la pajita de plástico, figura 4.16.

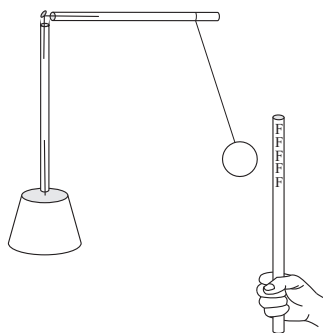


Figura 4.16: Un plástico frotado atrayendo el disco de papel de un péndulo eléctrico situado cerca.

Esta experiencia es similar a la experiencia 2.1, que muestra una atracción entre la pajita frotada y el péndulo. Ahora tenemos un tercer criterio para decir que un cuerpo es «eléctricamente neutro». El primer criterio se presentó en el experimento 2.1, a saber, que el cuerpo no debe atraer hacia arriba a los cuerpos ligeros. El segundo criterio era el del experimento 3.1: el cuerpo no debe orientar un versorio metálico. El tercer criterio es el que se ilustra aquí: no modifica el ángulo vertical del hilo de un péndulo eléctrico situado cerca. Un «cuerpo cargado», por el contrario, atrae los cuerpos ligeros hacia arriba, orienta los versorios y modifica el ángulo del hilo de un péndulo eléctrico.

Experimento 4.6

Podemos hacer que el disco de papel siga el movimiento del plástico frotado moviendo lentamente el plástico de un lado a otro delante del péndulo. Por ahora, no deben estar demasiado cerca el uno del otro, para evitar cualquier contacto. En este caso, cuando el plástico se mueve hacia el péndulo, el disco de papel se acerca al plástico, y cuando el plástico se aleja del péndulo, el disco de papel vuelve a su posición vertical inicial, figura 4.17.

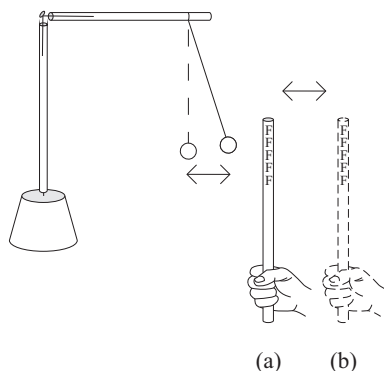


Figura 4.17: Un péndulo eléctrico que sigue el movimiento de un trozo de plástico frotado. (a) Cuando se acerca la pajita al disco de papel, el papel se desplaza hacia ella. (b) Cuando se aleja la pajita, el péndulo vuelve a la posición vertical.

Experimento 4.7

Repetimos el experimento 4.5. Pero esta vez acercamos el plástico frotado al disco de papel, para que entren en contacto. ¡Observamos que el péndulo primero es atraído y luego rápidamente repelido por el plástico frotado! Entre la atracción y la repulsión, ocurre algo crucial: el «contacto» entre el disco de papel y el plástico frotado. Tras este contacto, el papel sale volando del plástico frotado cada vez que intentamos acercarlos, figura 4.18.

A veces, el disco de papel no es repelido inmediatamente por el plástico frotado tras el contacto, permaneciendo en contacto con él durante unos segundos. En estos casos, podemos observar la repulsión golpeando ligeramente la pajita para liberar el disco. También podemos mover la pajita hacia arriba y hacia abajo para liberar el papel, o soplar ligeramente sobre él. Una vez liberado, normalmente es repelido por el plástico frotado. En algunos casos, se necesitan 2 o 3 atracciones del disco por la pajita frotada, dejando siempre su contacto en cada atracción, antes de poder observar su repulsión.

Esta repulsión tras el contacto con un cuerpo frotado pudo producirse en algunos objetos en los experimentos 2.1, 2.3 y 2.4. Pero en estos experimentos, los objetos ligeros, cuando ya no estaban en contacto con el plástico frotado, caían al suelo debido a la atracción gravitatoria de la Tierra. Y no es fácil distinguir esta atracción de la Tierra

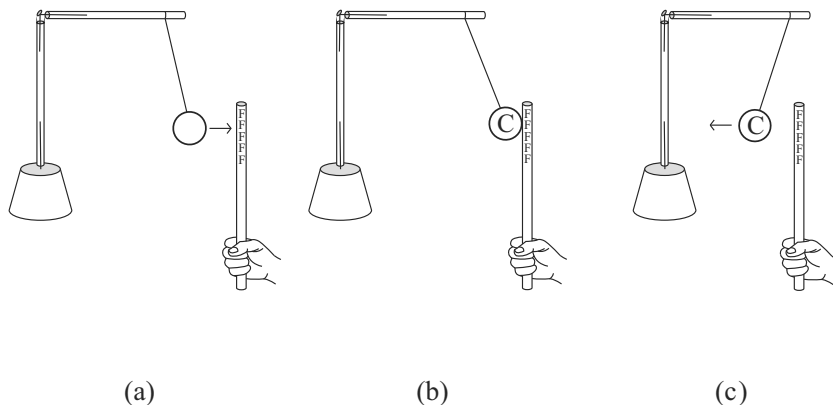


Figura 4.18: (a) El disco de papel es atraído primero por el plástico frotado, (b) lo toca y luego (c) es repelido por la pajita.

de una posible repulsión ejercida sobre ellos por el plástico frotado que se colocaba encima. La ventaja del péndulo eléctrico es que el hilo de seda equilibra la atracción gravitatoria que ejerce la Tierra sobre el disco de papel. Cuando el disco es repelido por la pajita frotada tras el contacto, no cae al suelo, ya que está sostenido por el hilo de seda. Entonces es fácil ver la repulsión entre el plástico frotado y el disco de papel tras su contacto.

En cualquier caso, al repetir los experimentos 2.1, 2.3 y 2.4, podemos percibir la repulsión eléctrica tras el contacto actuando conjuntamente con la atracción gravitatoria, siempre que analicemos atentamente todos los detalles de estos experimentos.

Experimento 4.8

Ahora repetimos el experimento 4.7. Al principio, el péndulo es atraído por el plástico frotado, lo toca y luego comienza a ser repelido después de ser liberado. A continuación, retiramos el plástico frotado y el disco vuelve a su posición vertical. Ahora acercamos un palito de madera neutro (o una hoja de papel, o nuestro dedo) cerca del disco de papel. Este movimiento de aproximación debe ser muy lento, para evitar cualquier contacto. Observamos que el hilo se inclina hacia el palito, lo que indica que el disco de papel es atraído por el palito, figura 4.19.

Como vimos en la sección 3.5, esta atracción indica que el péndulo se cargó eléctricamente en el experimento 4.7. Utilizamos la letra F cuando un plástico neutro se electrizó por «fricción». Ahora observamos que un disco de papel se carga por simple «contacto» con un trozo de plástico frotado. Este proceso de carga se indicará con la letra C . Este es el significado de la letra que aparece en las figuras 4.18 y 4.19.

Definiciones: Decimos que en el experimento 4.7, el disco de papel del péndulo «adquirió una carga eléctrica debido al contacto con otro cuerpo cargado», «se cargó por contacto» o «se electrizó por contacto». Este proceso se denomina «carga por contacto», «transferencia de carga por contacto» o «electrización por contacto».

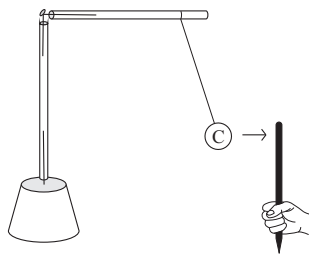


Figura 4.19: El péndulo eléctrico, que era repelido por una pajita frotada después de que ambas entraran en contacto, ahora es atraído por un palito de madera neutra.

En lugar de la palabra «contacto», a veces se utiliza un término más general. Por ejemplo, «electrización por comunicación» o «electrización por transferencia de cargas». Hay una razón para ello. El contacto físico entre el plástico frotado y el disco de papel no siempre es necesario para electrizar el disco de papel. A veces, cuando el plástico frotado y el disco de papel están muy cerca uno del otro, se produce una descarga eléctrica (es decir, una chispa) en el aire. Cuando esto ocurre, se produce una transferencia de carga entre el plástico frotado y el disco de papel. En este caso, el disco de papel, inicialmente descargado, adquiere una carga eléctrica y comienza a ser repelido por el plástico frotado. En este libro no trataremos estos fenómenos de descargas eléctricas en el aire.

4.5 Descarga por puesta a tierra

Experimento 4.9

Para repetir el experimento 4.8 con el mismo péndulo, primero debemos tocar el disco de papel con el dedo. No es necesario sujetar el disco de papel; basta con tocarlo ligeramente. A continuación, cuando acercamos otro dedo (o una hoja de papel, o un palito de madera) al disco de papel, observamos que este no se mueve, ya que el hilo permanece vertical. El disco de papel ya no es atraído por el palito, el dedo o la hoja de papel neutros, como ocurría en el experimento 4.8. Véase la figura 4.20.

Definiciones: Decimos que el disco de papel «perdió su carga eléctrica por contacto» con el dedo, o que «se descargó por contacto», «se descargó eléctricamente» o, simplemente, «se descargó». El proceso se denomina «descarga por contacto», «descarga por conexión a tierra» o «descarga por puesta a tierra». También se denomina «conexión a tierra eléctrica», «puesta a tierra eléctrica», «conectar a tierra» o «poner a tierra». El origen de estos nombres es que el cuerpo cargado se descarga a través del cuerpo humano, que normalmente está en contacto eléctrico con el suelo.

Tras la descarga, cuando acercamos un plástico frotado al péndulo, este ya no es repelido, como ocurrió al final del experimento 4.7. Lo que observamos ahora es el mismo comportamiento que al principio del experimento 4.7. En otras palabras, el

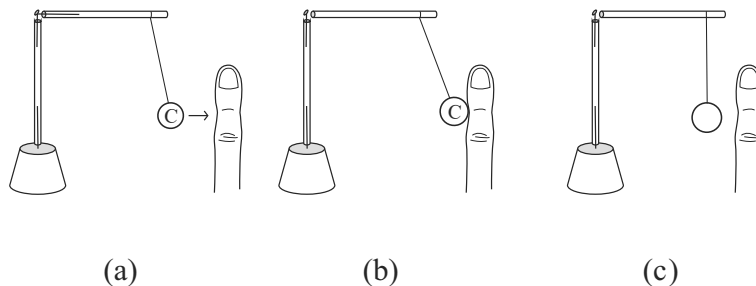


Figura 4.20: (a) Un péndulo cargado eléctricamente es atraído por un dedo. (b) Si se tocan, el péndulo se descarga. (c) Una vez descargado, el péndulo ya no es atraído por un dedo cercano.

péndulo es atraído primero por el plástico frotado, lo toca y solo entonces es repelido por él.

Cada vez que tocamos el disco de papel con el dedo, podemos repetir todo el procedimiento. En otras palabras, el péndulo vuelve a su estado neutro inicial.

Llamemos al plástico frotado de los experimentos 4.7 y 4.9 cuerpo *A*. El disco de papel se llamará cuerpo *B*. Y la mano que toca el disco se llamará cuerpo *C*. En 1729, Gray descubrió que un cuerpo *B*, electrizado por contacto con una sustancia frotada *A*, se descarga por contacto con la mano *C*. Una de sus descripciones del efecto de puesta a tierra aparece en su obra de 1731. Cargó un tubo de vidrio largo por fricción. El tubo se utilizó para electrizar otro cuerpo por contacto. Citamos aquí algunas de sus palabras (cursiva nuestra):^{19,20}

[...] de varios experimentos se desprende que si cualquier otro cuerpo [*C*] *toca* ese [cuerpo *B* electrizado por contacto con un cuerpo *A*] que atrae, su atracción cesa hasta que el cuerpo [*C*, que tocó el cuerpo electrizado *B*] se retira, y el otro [cuerpo *B*, que estaba inicialmente electrizado y que se descargó por contacto con el cuerpo *C*] se excita de nuevo por el tubo [de vidrio frotado] [*A*].

En 1733, Du Fay comenzó a utilizar este procedimiento de forma sistemática. Frotó un tubo de vidrio y lo utilizó para electrizar una bola de madera:^{21,22}

Además, me encargué de tocar la bola con la mano después de cada estación que habíamos hecho con el tubo, con el fin de eliminar cualquier virtud que pudiera haber conservado por el acercamiento del tubo; esto la despoja de toda su electricidad, como señaló el Sr. Gray; [...]

¹⁹[Gra31a, p. 35].

²⁰[...] for from several Experiments it appears, that if any other body [*C*] *touches* that [body *B* electrified by contact with a body *A*] which attracts, its Attraction ceases till that Body [*C*, which touched the electrified body *B*] be removed, and the other [body *B*, which was initially electrified and which was discharged by contact with body *C*] be again excited by the [rubbed glass] Tube [*A*].

²¹[DF33d, p. 247].

²²J'avois de plus le soin de toucher la boule avec la main après chaque station qu'on avoit faite avec le tube, afin de lui ôter toute la vertu qu'elle auroit pû avoir conservée par l'approche du tube; cela la dépouille en effet de toute son électricité, ainsi que l'a remarqué M. Gray; [...]

Experimento 4.10

Ahora vamos a realizar estos experimentos con más detalle para observar todos los efectos. En primer lugar, acercamos nuestro dedo al disco de papel sin carga de un péndulo eléctrico. El disco no se mueve. Frotamos una pajita y la acercamos al disco. El disco es atraído, toca la pajita y comienza a ser repelido por ella, como se muestra en la figura 4.18. Retiramos la pajita y el hilo del péndulo vuelve a la posición vertical.

En ese momento, acercamos lentamente el dedo al disco, sin tocarlo. El disco es atraído por el dedo y se desliza hacia él.

Si el disco toca el dedo, el péndulo vuelve inmediatamente a la posición vertical. Cuando volvemos a acercar el dedo al disco, este no se mueve, ya que el dedo ya no lo atrae. El péndulo volvió a su posición inicial.

Podemos frotar la pajita una vez más y repetir toda esta serie de experimentos.

4.6 El péndulo eléctrico de Gray

La descripción más antigua que se conoce de un péndulo eléctrico fue dada por Gray en 1720. Realizó un experimento similar al experimento 4.5, pero utilizando un plumón en lugar de un disco de papel:^{23,24}

Se ató un plumón al extremo de un fino hilo de seda cruda y el otro extremo a un palito, que se fijó a un pie, para que pudiera mantenerse en pie sobre la mesa: se tomó un trozo de papel marrón, que mediante el método mencionado anteriormente [es decir, el papel se calentó inicialmente con el fuego y luego se frotó pasándolo entre los dedos] se hizo fuertemente eléctrico, y al acercarlo al plumón, esta se adhirió al papel, y lo llevé con él hasta que se acercó a la perpendicular del palito; luego levanté la mano hasta que el papel quedó más allá del plumón, el hilo se extendió y se mantuvo erguido en el aire, como si fuera un trozo de alambre, aunque el plumón estaba a una distancia del papel de casi una pulgada [2.5 cm].

Ilustramos esta experiencia en la figura 4.21.

4.7 El versorio de Du Fay

Otra forma interesante de observar la repulsión eléctrica se basa en un versorio creado por Du Fay.²⁵ En su caso, se trataba de un versorio de vidrio provisto de una esfera metálica hueca en el extremo de una de sus patas. Aquí utilizamos un versorio de plástico similar, tal y como se describe en la sección 3.1, es decir, una tira de plástico

²³[Gra20, p. 107].

²⁴A Down Feather being tied to the end of a fine thread of Raw Silk, and the other end to a small Stick, which was fixed to a Foot, that it might stand upright on the Table: there was taken a piece of brown Paper, which by the above-mentioned method [that is, the paper was initially warmed by the fire and then rubbed by passing it between his fingers] was made to be strongly Electrical, which being held near the Feather, it came to the Paper, and I carried it with the same till it came near the Perpendicular of the Stick; then lifting up my Hand till the Paper was got beyond the Feather, the Thread was extended and stood upright in the Air, as if it had been a piece of Wire, though the Feather was distant from the Paper near an Inch [2.5 cm].

²⁵[DF33b, pp. 473–474].

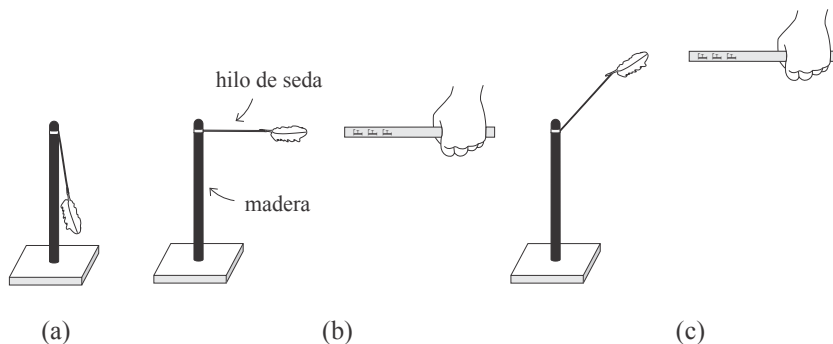


Figura 4.21: Péndulo eléctrico de Gray.

con forma de sombrero, cuyas dos patas están ligeramente inclinadas hacia abajo. Se fija un alfiler en el centro del plástico, con la punta hacia abajo, y se sostiene con la cabeza de un clavo clavado en una tabla. La particularidad del versorio de Du Fay es que envolvemos uno de sus extremos en papel de aluminio. Hay dos posibilidades para equilibrar el versorio si empieza a caerse por ese lado debido a su peso adicional. La primera consiste en pegar plástico en el otro extremo. La segunda consiste en retirar una pequeña parte de la pata donde se fijará la lámina de aluminio antes de realizar el experimento. Lo importante es que el versorio esté equilibrado horizontalmente, con uno de sus extremos envuelto en una lámina de aluminio, figura 4.22.

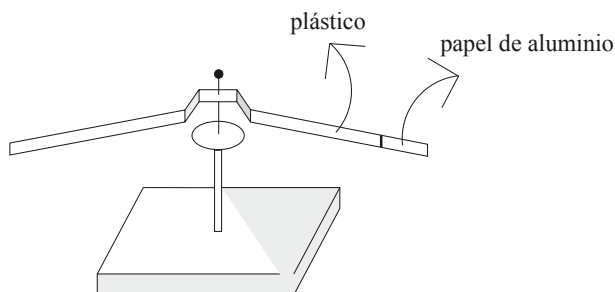


Figura 4.22: El versorio de Du Fay es de plástico, con el extremo de una de sus patas envuelto en papel de aluminio.

Se recomienda tocar una superficie metálica para asegurarse de que se está en estado neutro antes de realizar los siguientes experimentos. Para realizar experimentos con este versorio, es importante asegurarse de que inicialmente se encuentra en estado neutro. Este es el aspecto más delicado, principalmente debido al plástico. Para obtener la neutralidad de carga, tocamos la lámina de aluminio con el dedo para descargarla. A continuación, colocamos el dedo cerca de varias partes del versorio de plástico, sin tocarlas. Si el versorio permanece inmóvil, sin ser orientado por nuestro dedo, decimos que es eléctricamente neutro. Cuando reacciona al acercamiento del dedo, decimos que está cargado. A veces lo cargamos involuntariamente al frotarlo

con la mano durante su fabricación o al enrollar la lámina de aluminio alrededor de uno de sus extremos. Si esto ocurre, podemos esperar unos minutos a que se descargue de forma natural. También podemos limpiarlo con una toalla de papel húmeda y esperar a que se seque. Incluso después de estos procedimientos, siempre debemos verificar si realmente es neutro. A partir de ahora, supondremos que el versorio es neutro antes de comenzar los siguientes experimentos.

Experimento 4.11

Frotamos una pajita de plástico y la acercamos lentamente a la lámina de aluminio del versorio de Du Fay, sin que entren en contacto. Observamos que el versorio gira alrededor de su eje vertical, deteniéndose con la lámina de aluminio apuntando hacia el plástico frotado, figura 4.23. Cuando movemos la pajita, el versorio la sigue. Esto es análogo al experimento 3.1.

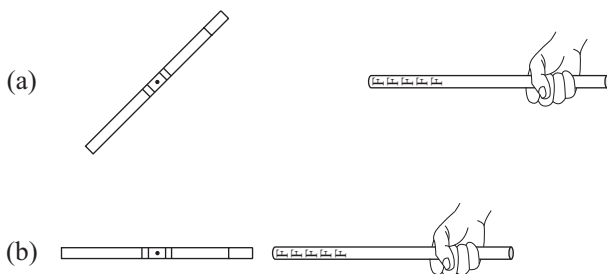


Figura 4.23: Papel de aluminio del versorio de Du Fay atraído por un trozo de plástico frotado que se acerca a él.

Experimento 4.12

Repetimos el experimento 4.11. Pero esta vez acercamos la pajita frotada a la lámina de aluminio, para que entren en contacto. Observamos que primero es atraída por la pajita y luego repelida por ella, alejándose de la pajita, figura 4.24. Entre esta atracción y esta repulsión, ocurre algo crucial: el *contacto* entre la lámina de aluminio y el plástico frotado.

A veces, la lámina de aluminio no se repele inmediatamente después del contacto y permanece adherida a la pajita. Si esto ocurre, será necesario liberar la lámina de aluminio para poder observar la siguiente repulsión. Para ello, puede dar golpecitos a la pajita o moverla hacia arriba y hacia abajo con la lámina de aluminio. Normalmente, se separarán entre sí durante este procedimiento. Una vez liberada, la lámina de aluminio comenzará a ser repelida por la pajita frotada y se alejará de ella.

Experimento 4.13

Repetimos el experimento 4.12. Al final del experimento, retiramos la pajita frotada. A continuación, acercamos lentamente nuestro dedo (o una hoja de papel, o un

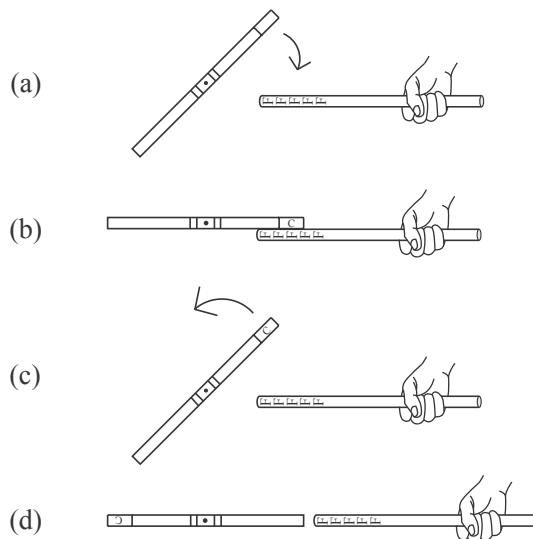


Figura 4.24: (a) La lámina de aluminio es inicialmente atraída por el plástico frotado. (b) La lámina de aluminio toca la parte frotada de la pajita. (c) Tras el contacto, la lámina de aluminio es repelida por la pajita. (d) Orientación final de equilibrio del versorio.

palito de madera) a la lámina de aluminio, sin que entren en contacto. Observamos que la lámina de aluminio es atraída por el dedo, ¡apuntando hacia él y siguiendo su movimiento, figura 4.25!

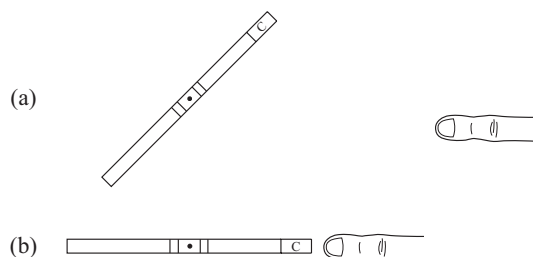


Figura 4.25: La lámina de aluminio que anteriormente había entrado en contacto con un trozo de plástico frotado ahora es atraída por un dedo que se acerca a ella.

Como vimos en la sección 3.5, este experimento demuestra que la lámina de aluminio del versorio de Du Fay se cargó al entrar en contacto con el plástico frotado.

Cabe recordar aquí que este experimento, al igual que muchos otros descritos en este libro, puede no funcionar perfectamente si ha llovido recientemente o si el aire es húmedo. La humedad del aire dificulta la acumulación de cargas eléctricas y, por lo tanto, reduce la magnitud de los efectos observables. Los experimentos electrostáticos suelen funcionar bien en atmósferas secas.

Experimento 4.14

Para repetir toda esta serie de experimentos con el mismo versorio de Du Fay, primero debemos tocar la lámina de aluminio con el dedo. A continuación, cuando volvemos a acercar un dedo o una hoja de papel a la lámina de aluminio, observamos que ya no reacciona y permanece inmóvil. Ya no es atraída por el dedo, como ocurría antes en el experimento 4.13.

Cuando volvemos a acercar la pajita frotada a la lámina de aluminio, observamos el mismo comportamiento que antes, es decir, la atracción, el contacto y la repulsión.

Cada vez que tocamos la lámina de aluminio con el dedo, podemos repetir todo el procedimiento, ya que el versorio vuelve a su estado inicial.

4.8 El mecanismo ACR

En 1733, Du Fay fue el primero en reconocer el mecanismo fundamental de la atracción, el contacto (o comunicación de la electricidad por aproximación) y la repulsión descrito en el experimento 4.10. Heilbron denominó esta sencilla regla de atracción, comunicación de electricidad y repulsión con las siglas «ACR» (Attract, Communicate, Repel, es decir, Atraer, Comunicar, Repeler).²⁶ Du Fay consideró acertadamente este comportamiento regular como un gran descubrimiento. Al fin y al cabo, este principio explica una amplia gama de fenómenos eléctricos.

Du Fay había realizado algunos experimentos previos y observado un comportamiento que le había permitido clasificar o distinguir diferentes sustancias. Cuando frotaba un cuerpo y lo acercaba a sustancias ligeras, observaba que algunas de estas sustancias sufrían una atracción más fuerte que otras sustancias del mismo peso. Observó que las sustancias más fácilmente atraídas correspondían exactamente a las sustancias que adquirirían una carga más débil por fricción. Un ejemplo de este comportamiento se observó en las secciones 2.4 y 2.7. Los pequeños trozos de plástico o seda, por ejemplo, son mucho menos atraídos por un plástico frotado que los pequeños trozos de metal o papel. Por otra parte, podemos electrizar el plástico y la seda más fácilmente por fricción que el papel o el metal.

En la época de Du Fay, los cuerpos que tenían la propiedad de atraer sustancias ligeras cuando se frotaban se denominaban comúnmente «eléctricos». Un cuerpo eléctrico se consideraba bueno o malo según la mayor o menor fuerza con la que atraía a los cuerpos ligeros después de ser frotado. Tras esta introducción, podemos citar las propias palabras de Du Fay describiendo el principio ACR:^{27, 28}

Finalmente, tras reflexionar sobre el hecho de que los cuerpos menos eléctricos por sí mismos eran atraídos con más fuerza que los demás, imaginé que el cuerpo eléctrico tal vez atraía a todos los que no lo eran y repelía a todos los que lo habían legado a ser por su proximidad y por la comunicación de su virtud. [...]

²⁶[Hei99, pp. 5 y 255–258].

²⁷[DF33b, p. 458].

²⁸Enfin ayant réfléchi sur ce que les corps les moins électriques par eux-mêmes étoient plus vivement attirés que les autres, j'ai imaginé que le corps électrique attiroit peut-être tous ceux que ne le sont point, & repoussoit tous ceux que le sont devenus par son approche, & par la communication de sa vertu. [...]

Du Fay continúa y describe los experimentos que llevó a cabo, similares a los de Guericke, Gray y Hauksbee. (Véase el experimento 4.4). De hecho, consiguió hacer flotar en el aire un trozo de hoja de oro que había sido liberado sobre un tubo de vidrio frotado. La hoja fue primero atraída por el tubo, lo tocó y luego fue repelida, flotando sobre él. Continuó escribiendo (el énfasis en cursiva es nuestro).^{29,30}

La explicación de todos estos hechos es muy sencilla, suponiendo el *principio* que acabo de plantear; pues, en el primer experimento, cuando se deja caer la hoja sobre el tubo, este atrae vivamente dicha hoja, que no es en absoluto eléctrica, pero tan pronto como toca el tubo, o simplemente se acerca a él, se vuelve eléctrica y, en consecuencia, es repelida por él y se mantiene alejada de él hasta que el pequeño torbellino eléctrico que había contraído se disipa, o al menos disminuye considerablemente; al no ser repelida entonces, vuelve a caer sobre el tubo, donde adquiere un nuevo torbellino y, por consiguiente, nuevas fuerzas para evitarlo, lo que continuará mientras el tubo conserve su virtud.

Aquí hay otra descripción de este *principio*:^{31,32}

Al realizar el experimento relatado por *Otho de Guerik* en su colección de experimentos de *Spatio Vacuo* [1672], que consiste en hacer que una bola de azufre se electricice para repeler un plumón, percibí que los mismos efectos se producían no solo por el tubo [frotado], sino por todos los cuerpos eléctricos en general; y descubrí un principio muy simple que explica gran parte de las irregularidades y, si se me permite utilizar el término, de los caprichos que parecen acompañar a la mayoría de los experimentos sobre electricidad. Este principio es que los cuerpos eléctricos atraen a todos los que no lo son y los repelen tan pronto como se vuelven eléctricos, por la proximidad o el contacto con el cuerpo eléctrico. Así, el oro laminado es atraído primero por el tubo [de vidrio frotado] y adquiere electricidad al acercarse a él; en consecuencia, es repelido inmediatamente por él. Tampoco vuelve a ser atraído mientras conserva su cualidad eléctrica. Pero si, mientras se

²⁹[DF33b, pp. 459–460].

³⁰L'explication de tous ces faits est bien simple, en supposant le *principe* que je viens d'avancer; car, dans le première expérience, lorsqu'on laisse tomber la feuille sur le tube, il attire vivement cette feuille qui n'est nullement électrique, mais dès qu'elle a touché le tube, ou qu'elle l'a seulement approché, elle est rendue électrique elle-même, & par conséquent elle en est repoussée, & s'en tient toujours éloignée, jusqu'à ce que le petit tourbillon électrique qu'elle avoit contracté soit dissipé, ou du moins considérablement diminué; n'étant plus repoussée alors, elle retombe sur le tube où elle reprend un nouveau tourbillon, & par conséquent de nouvelles forces pour l'éviter, ce qui continuera tant que le tube conservera sa vertu.

³¹[DF34a, pp. 262–263].

³²On making the experiment Related by *Otho de Guerik*, in his Collection of Experiments de *Spatio Vacuo* [1672], which consists in making a Ball of Sulphur render'd Electrical, to repel a Down-Feather, I perceived that the same Effects were produced not only by the [rubbed] Tube, but by all electric Bodies whatsoever; and I discovered a very simple Principle, which accounts for a great Part of the Irregularities, and if I may use the Term, of the Caprices that seem to accompany most of the Experiments on Electricity. This Principle is, that Electric Bodies attract all those that are not so, and repel them as soon as they are become electric, by the Vicinity or Contact of the electric Body. Thus Leaf-Gold is first attracted by the [rubbed glass] Tube; and acquires an Electricity by approaching it; and of consequence is immediately repell'd by it. Nor is it re-attracted, while it retains its electric Quality. But if, while it is thus sustain'd in the Air, it chance to light on some other Body, it straightways loses its Electricity; and consequently is re-attracted by the Tube, which, after having given it a new Electricity, repels it a second time; which continues as long as the Tube keeps its Electricity. Upon applying this Principle to the various Experiments of Electricity, one will be surprized at the Number of obscure and puzzling Facts it clears up.

mantiene así en el aire, cae sobre algún otro cuerpo, pierde inmediatamente su electricidad y, en consecuencia, vuelve a ser atraído por el tubo, que, después de haberle dado una nueva electricidad, lo repele por segunda vez, lo que continúa mientras el tubo conserve su electricidad. Al aplicar este principio a los diversos experimentos de electricidad, uno se sorprenderá por la cantidad de hechos oscuros y desconcertantes que aclara.

Experimento 4.15

Podemos hacer oscilar el péndulo eléctrico realizando un curioso experimento. Colocamos la mano izquierda con cuatro dedos cerca del disco de papel, sin tocarlo. La mano permanecerá siempre en esta posición durante todo el experimento. Frotamos una pajita de plástico y la acercamos lentamente al disco de papel. Una vez que el disco la haya tocado, la pajita debe permanecer inmóvil.

Observamos que el péndulo es atraído primero por el plástico frotado, lo toca, es repelido por él, se desplaza hacia la mano, la toca y vuelve a ser atraído por la pajita. Todo el proceso se repite durante unas cuantas oscilaciones rápidas del papel, que toca alternativamente el plástico frotado y la mano del otro lado. Podemos aumentar el número de estas oscilaciones girando la pajita alrededor de su eje durante el experimento, o moviendo la pajita verticalmente a lo largo de toda su longitud durante las oscilaciones, figura 4.26.

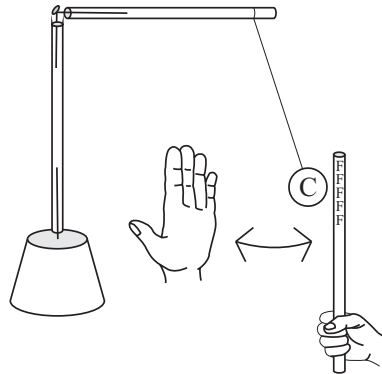


Figura 4.26: Péndulo que oscila entre un plástico frotado y una mano, y toca a cada uno de ellos.

Es posible describir lo que ocurre en este experimento haciendo referencia al mecanismo ACR. Este experimento es análogo al de Gray con el plumón flotante, que oscila en el aire entre el tubo de vidrio frotado y un objeto sólido (como una pared o una silla). Véase la sección 4.2.

Experimento 4.16

Ahora colocamos uno al lado del otro dos péndulos eléctricos similares al utilizado en el experimento 4.7. Cuando ambos están neutros, los dos hilos permanecen

verticales. Podemos obtener este efecto tocando los dos discos de papel con la mano.

Frotamos una pajita de plástico y la acercamos a cada disco de papel, permitiendo que toquen la pajita y sean repelidos por ella. A continuación, retiramos la pajita. Después, acercamos los péndulos que se cargaron por contacto. Observamos que se repelen. Los dos hilos se inclinan con respecto a la vertical, alejándose uno del otro, figura 4.27.

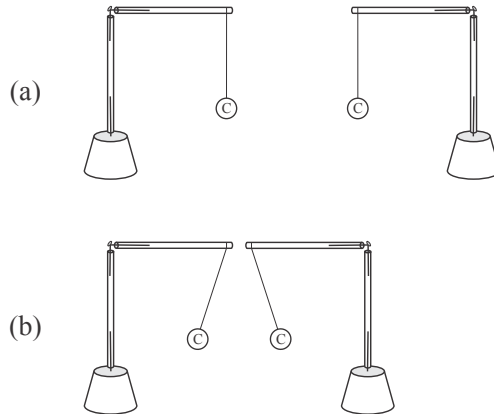


Figura 4.27: (a) Dos péndulos cargados cuelgan verticalmente cuando están alejados el uno del otro. (b) Dos péndulos cargados se repelen cuando están cerca el uno del otro.

A veces es necesario utilizar hilos de seda muy finos para observar esta separación lateral. Cuando los hilos son muy densos y pesados, su peso reduce el ángulo de separación. Además, los hilos más cortos crean ángulos de separación más grandes entre ellos que los hilos más largos, para una misma distancia final entre los discos de papel. Por lo tanto, es preferible trabajar con hilos cortos, ya que esto hace que la repulsión sea más visible.

En este experimento, observamos la repulsión entre dos péndulos que se cargaron por contacto con un solo cuerpo electrizado.

Este experimento también ilustra la acción y reacción entre dos cuerpos electrizados, un tema tratado anteriormente en la sección 3.5.

Experimento 4.17

Se puede realizar un experimento similar sustituyendo los discos de papel por dos pequeñas bolas arrugadas de papel de aluminio. Cada bola puede ser cuadrada o circular, con un lado o diámetro de 2 a 3 cm. Una vez arrugadas, se fijan a los extremos de dos hilos de seda de la misma longitud suspendidos como péndulos. Cargamos las dos bolas por contacto con un plástico frotado, que luego se aleja. Tras este procedimiento, se repelen mutuamente cuando los péndulos se colocan cerca uno del otro. Cuanto más cortos sean los hilos, mayor será el ángulo de separación para una distancia constante entre los extremos superiores de los hilos.

4.9 El hilo pendular de Gray

Además del péndulo eléctrico, también es interesante fabricar otro instrumento llamado «hilo pendular». Fue creado por Stephen Gray en 1729 con el fin de detectar si un cuerpo está cargado.³³

Se trata simplemente de un hilo de algodón o lino sostenido por un palito de madera, figura 4.28. El péndulo eléctrico se fabricaba con un hilo de seda o nailon. En este caso, es importante utilizar un hilo de algodón o lino. Podemos sostener el palito con la mano o fijarla a otro soporte adecuado.

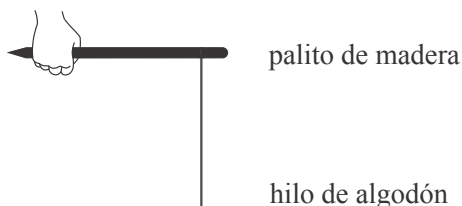


Figura 4.28: Hilo pendular de Gray.

Experimento 4.18

Acercamos un trozo de plástico neutro a un hilo pendular. No ocurre nada, ya que permanece vertical. Ahora acercamos un trozo de plástico frotado a un hilo pendular. El hilo se inclina hacia él, figura 4.29.

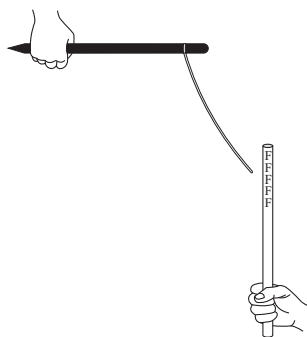


Figura 4.29: Atracción de un hilo suspendido por un plástico frotado.

Esta es la principal utilidad del hilo pendular. Nos indica si un objeto cercano está cargado o no. El hilo pendular de Gray era simplemente un hilo vertical sostenido por su extremo superior, cuyo extremo inferior era libre de moverse en cualquier dirección. El hilo era de algodón o lino, sin ningún plumón ni otro cuerpo en su extremo inferior. Para comprobar si un cuerpo estaba cargado, bastaba con acercarle el hilo.

³³[Gra31b], [Gra31c], y [Gra35b].

Cuando el hilo era atraído por el cuerpo, inclinándose hacia él, significaba que el objeto estaba cargado eléctricamente. El procedimiento normal para determinar si un cuerpo estaba cargado o no consistía en observar si atraía sustancias ligeras cercanas, como en el experimento 2.1. Con su instrumento, Gray había encontrado un nuevo método, la inclinación de su hilo. Mencionaba explícitamente que este nuevo método ofrecía una mayor sensibilidad que el antiguo.^{34,35}

La mejor manera de observar estas atracciones es sosteniendo el cuerpo atrayente en una mano y un fino hilo blanco atado al extremo de un palito en la otra; de esta forma se percibirán grados de atracción mucho menores que utilizando [trozos de] latón laminado.

Experimento 4.19

Ahora dejamos que el hilo pendular toque el plástico frotado. Observamos que se queda pegado a él, figura 4.30.

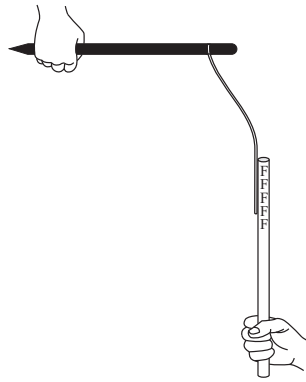


Figura 4.30: El hilo pendular de Gray permanece adherido a un plástico frotado tras el contacto.

Esto difiere de lo que ocurrió en el experimento 4.7. En ese experimento anterior, el péndulo eléctrico fue repelido tras entrar en contacto con el plástico frotado. Esto significa que el péndulo eléctrico y el hilo pendular son instrumentos diferentes, que presentan comportamientos distintos en situaciones análogas. El hilo pendular no es simplemente un péndulo eléctrico sin el disco de papel.

4.10 Cartografía de la fuerza eléctrica

Podemos adaptar un péndulo eléctrico para cartografiar la fuerza eléctrica, por analogía con lo que se hizo con el versorio en la sección 3.4. Para ello, debemos fabricar

³⁴ [Gra31c, p. 289].

³⁵ The manner of observing these Attractions is best performed by holding the Attracting Body in one Hand, and a fine white Thread tied to the End of a Stick, in the other [hand]; by this means far less Degrees of Attraction will be perceived, than by making use of [pieces of] Leaf-Brass.

un indicador de fuerza eléctrica. Se trata básicamente de un péndulo eléctrico en el que sustituimos el disco de papel por una pequeña flecha de papel, lámina de aluminio o cartón fino. Debe apuntar horizontalmente y estar suspendida en su centro por un hilo de seda o nailon. Puede medir entre 2 y 5 cm de largo, con una anchura vertical de 0.2 a 0.5 cm, y una anchura máxima de la punta de 0.5 a 0.7 cm. Se trata únicamente de medidas aproximadas que no son muy importantes.

Una forma práctica de fabricar y fijar la flecha es utilizar una pajita de plástico.³⁶ La flecha de cartón fino puede medir inicialmente entre 4 y 6 cm de largo, con un ancho de asta de entre 0.2 y 0.5 cm y una dimensión máxima de la punta de entre 0.5 y 0.7 cm, por ejemplo. Cortamos una pajita de plástico de entre 3 y 5 cm de largo. Aplicamos pegamento en un lado de la flecha y pegamos la parte inferior del hilo de seda y la pajita en ese lado. Doblamos el asta de la flecha alrededor de la pajita, fijándolos juntos. Debe quedar horizontal cuando cuelga libremente. Si no es así, podemos cortar una parte de la pajita para que la flecha quede en la posición correcta. Se deben construir varios indicadores de fuerza eléctrica como este, figura 4.31.

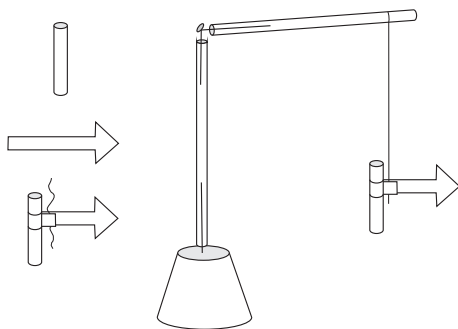


Figura 4.31: Un indicador de fuerza eléctrica.

Experimento 4.20

Ahora repetimos el procedimiento del experimento 4.5. Es decir, frotamos una pajita de plástico colocada verticalmente en un soporte adecuado. A continuación, la acercamos lentamente al indicador de fuerza eléctrica, evitando en un primer momento que la flecha toque el plástico frotado. Observamos que el péndulo es atraído por el plástico frotado, inclinándose el hilo hacia él. Además, la punta de la flecha apunta hacia la pajita frotada, independientemente de su posición con respecto al plástico frotado. Esto demuestra que la fuerza eléctrica ejercida por el plástico frotado apunta hacia este, como vimos en el experimento 3.4.

Experimento 4.21

Ahora repetimos el experimento 4.20, dejando esta vez que la flecha y el plástico frotado entren en contacto. Tras el contacto, el péndulo es repelido por la pajita, ale-

³⁶[FM91].

jándose el hilo de esta. Además, la punta de la flecha apunta radialmente en dirección opuesta al plástico frotado, figura 4.32.

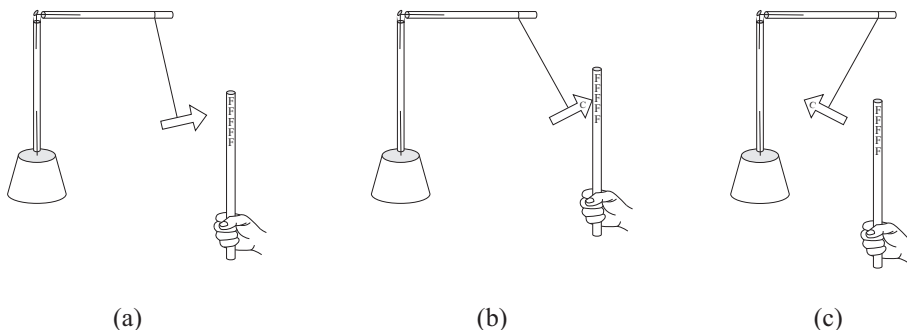


Figura 4.32: (a) Al principio, la flecha apunta hacia el plástico frotado, ya que es atraída por él. (b) Toca la pajita. (c) Tras el contacto, la flecha es repelida por la pajita y su punta se aleja de ella.

Experimento 4.22

Ahora utilizamos varios indicadores de fuerza eléctrica alrededor de un plástico frotado. El procedimiento inicial es similar al del experimento 4.20, es decir, evitar el contacto entre las flechas y la pajita. Observamos que todas apuntan hacia el plástico frotado, figura 4.33 (a). Ahora permitimos que la pajita frotada y las flechas entren en contacto. Observamos que, tras el contacto, todas apuntan radialmente lejos de la pajita, figura 4.33 (b).

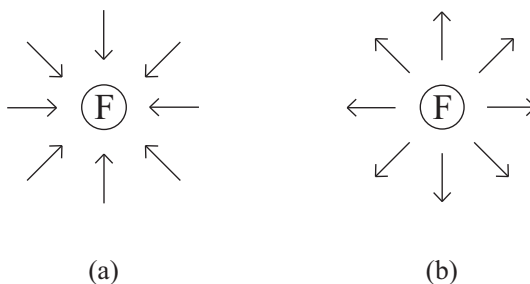


Figura 4.33: (a) Antes del contacto, las flechas apuntan hacia la pajita frotada, atraídas por ella. (b) Después del contacto, apuntan lejos del plástico, repelidas por él.

La principal diferencia entre los experimentos 4.20, 4.21 y 4.22, por un lado, y el experimento 3.4, por otro, es que ahora las flechas no solo indican la dirección de la fuerza (en este caso, una dirección radial), sino también si la fuerza es atractiva (flechas que apuntan hacia la pajita frotada) o repulsiva (flechas que apuntan lejos de la pajita frotada).

Experimento 4.23

La misma experiencia puede repetirse con la pajita frotada en posición horizontal. Antes del contacto, las flechas apuntan hacia ella; después del contacto, se alejan de ella, como se muestra en la figura 4.34.

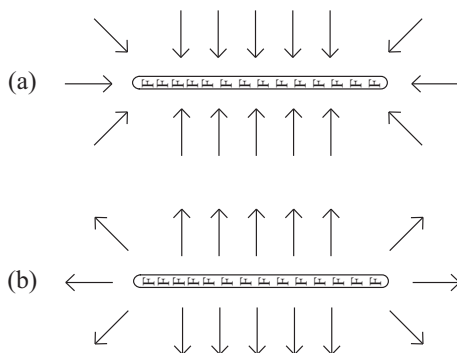


Figura 4.34: (a) Las flechas que no tocaron la pajita frotada son atraídas por ella. (b) Tras el contacto, son repelidas por ella.

Experimento 4.24

Ahora frotamos dos pajitas de plástico a lo largo de toda su longitud con el mismo material, como una hoja de papel. Estas pajitas se colocan una al lado de la otra en posición vertical sobre soportes adecuados. El indicador de fuerza eléctrica se desplaza cerca de las pajitas, sin que estas entren en contacto entre sí. Observamos que la flecha es atraída por las dos pajitas, inclinándose hacia ellas. La orientación de varias flechas en diferentes lugares alrededor de las pajitas se muestra en la figura 4.35 (a). La orientación de cada flecha es el resultado de la influencia de las dos pajitas. Esto se asemeja a una suma vectorial de las fuerzas o pares ejercidos por cada pajita. Esto es análogo al experimento 3.5.

Repetimos este experimento, pero esta vez permitiendo el contacto entre las pajitas y los plásticos frotados. Tras el contacto, las flechas son repelidas por las pajitas, como se muestra en la figura 4.35 (b).

Estos experimentos indican la naturaleza vectorial de las fuerzas eléctricas, ya sean atractivas o repulsivas. La ventaja de estas representaciones mediante flechas, en comparación con la representación mediante versorios, es que las flechas indican no solo la dirección de las fuerzas, sino también si son atractivas o repulsivas.

Experimento 4.25

Se puede obtener el mismo efecto con varios versorios de Du Fay, en lugar de simples versorios metálicos. Frotamos un plástico y colocamos la parte frotada al mismo nivel que el plano de los versorios. Movemos el plástico frotado cerca de los versorios, evitando que se toquen. Los versorios giran alrededor de su eje. Después de alcanzar

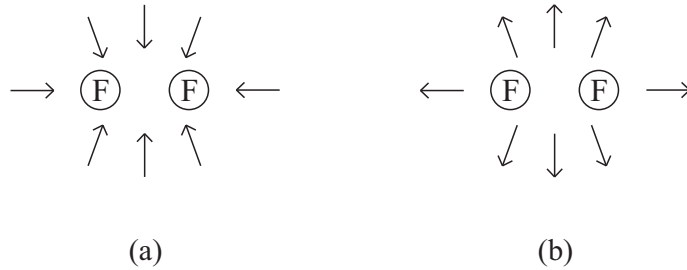


Figura 4.35: Indicadores de fuerza eléctrica (a) atraídos y (b) repelidos por dos plásticos frotados.

el equilibrio y detenerse, las láminas de aluminio de los versorios apuntan hacia el plástico frotado, figura 4.36 (a).

A continuación, permitimos el contacto entre el plástico frotado y las láminas de aluminio, hasta que estas son repelidas por el plástico. Los versorios giran y, en las nuevas posiciones de equilibrio, las láminas de aluminio apuntan lejos de la pajita frotada, figura 4.36 (b).

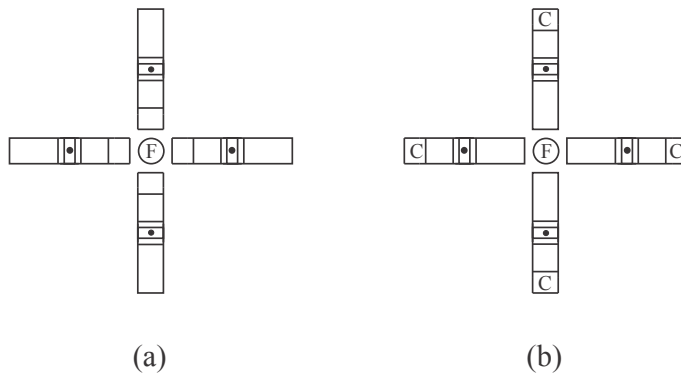


Figura 4.36: (a) La lámina de aluminio de cada versorio de Du Fay es atraída por un trozo de plástico frotado. (b) Tras el contacto, es repelida por la pajita cargada.

Con los versorios de Du Fay, también podemos obtener mapas similares a los de los experimentos 4.23 y 4.24.

4.11 Hauksbee y la cartografía de las fuerzas eléctricas

Hauksbee fue probablemente el primero en cartografiar las fuerzas eléctricas en 1706. Utilizó la máquina eléctrica que había inventado, descrita en la sección 4.2, figura 4.8. Sustituyó el globo de vidrio por un tubo cilíndrico de vidrio, sostenido horizontal o verticalmente, para poder girarlo a gran velocidad sobre su eje. Mientras

giraba, lo frotaba con las manos o con una hoja de papel. Esta es la descripción de su experimento:^{37,38}

Continuación de los experimentos sobre el desgaste del vidrio.

Adquirí un cilindro de vidrio, de aproximadamente siete pulgadas [18 cm] de largo y diámetro, cuyo movimiento [rotación alrededor de su eje de simetría] era impulsado por una máquina de nuevo diseño; su eje era paralelo al horizonte, que en experimentos similares realizados hasta entonces era diametralmente opuesto a él. [...]

Ahora bien, lo que tengo que añadir se deriva de la observación constante de que los cuerpos ligeros que se acercaban a cualquier parte del cilindro africado parecían ser igualmente atraídos o gravitar; por lo que diseñé un semicírculo de alambre, que podía fijar a una distancia constante [del eje del cilindro], rodeando la superficie superior del vidrio a unas 4 o 5 pulgadas [10 o 13 cm] de él. Este alambre tenía enrollada alrededor un cordón de empaque, con lo que podía colgar fácilmente los hilos [de lino, algodón o lana] a distancias casi iguales; los extremos inferiores de los cuales llegaban a menos de una pulgada [2.5 cm] del vidrio, cuando se mantenían cerca del centro del mismo, pero aparecían, cuando estaban libres, como en la figura 1 [de la figura 4.37].³⁹

Y cuando el cilindro giraba con bastante rapidez, esos hilos aparecían, debido al aire agitado, como en la figura 2 [de la figura 4.37]. Pero cuando aplicaba mi mano en la parte inferior del vidrio [giratorio] [con el fin de cargar el vidrio por fricción], los hilos representaban entonces una forma como la de la figura 3 [de la

³⁷ [Hau06, pp. 2332–2335].

³⁸ *A Continuation of the Experiments on the Attrition of Glass.*

I Procur'd a Glass nearly Cylindrical, of the Length and Diameter about seven Inches each [18 cm], whose motion [rotation around its axis of symmetry] was given by a Machine of a new Contrivance; its Axis lying parallel to the Horizon, which in like Experiments heretofore made, was Diametrically opposite to it. [...]

Now what farther I have to add, occur'd from observing always that Light Bodies, approach'd near any part of the affricated Cylinder, would seemingly be equally Attracted, or Gravitate; so that I contrived a Semi-circle of Wire, which I could fasten at a constant distance [from the axis of the cylinder], environing the upper Surface of the Glass at 4 or 5 inches [10 or 13 cm] from it. This Wire had twisted round it some Pack-thread, whereby I could with Ease hang the [linen, cotton, or woollen] Threads at pretty nearly equal distances; the lower ends of which reaching within less than an Inch [2.5 cm] of the Glass, when held approaching the Center of it, but appear'd, when at liberty, as Figure the 1st.

And when the Cylinder was pretty swiftly turn'd about, those Threads would appear by the agitated Air, as in Fig. the 2d. But when on the lower part of the [spinning] Glass was applied my hand [in order to charge the glass by friction], the Threads would then represent a Form like Fig. the 3d. And from all parts seem to Gravitate, or were attracted in a direct Line to the Center of the moving Body [that is, towards the axis of the cylinder], suffering no Inconvenience or Disorder of Posture by the Wind occasioned by the Rapidity of the motion; and I could by shifting the [position of] Attrition, draw them in a Line towards either end of the Cylinder; yet still pointing to the Axis of it. And if the [semi-circular] Wire with the Threads be revers'd, as I have tryed since, that is, encompassing the under part of the Cylinder, as before the upper, it answer'd exactly the same as the other; the Threads all pointing to the Axis of it: See Fig. the 4th. I have likewise given a Motion to the same Glass in a perpendicular Posture, by which means I had the opportunity of placing a Hoop-Wire Horizontally, with Threads as before, and left only one small part expos'd for the touch of my Fingers between them; yet the Threads upon the Motion and Attrition given the Cylinder, elevated themselves from their hanging Posture, making all round an Horizontal Plain, directing their loose ends to the Axis as in the other. Now how far this Experiment may serve to explain the Nature of Electricity, Magnetism, or Gravitation of Bodies, is beyond my Sphere to determine; but with all Humility submit it to those Learned Gentlemen of this Honourable Society, who have already treated on those Subjects.

³⁹ [Hau06] y [RR57, p. 568].

figura 4.37]. Y desde todas las partes parecían gravitar, o eran atraídos en línea recta hacia el centro del cuerpo en movimiento [es decir, hacia el eje del cilindro], sin sufrir ningún inconveniente o desorden de postura por el viento ocasionado por la rapidez del movimiento; y yo podía, cambiando la [posición de] la fricción, atraerlos en línea recta hacia cualquiera de los extremos del cilindro, pero siempre apuntando hacia el eje del mismo. Y si se invierte el alambre [semicircular] con los hilos, como probé desde entonces, es decir, rodeando la parte inferior del cilindro, como antes la superior, respondió exactamente igual que el otro; todos los hilos apuntaban al eje del mismo: Véase la figura 4 [de la figura 4.37]. Asimismo, di movimiento al mismo vidrio en posición perpendicular, lo que me permitió colocar un alambre en forma de lazo horizontalmente, con hilos como antes, y dejando solo una pequeña parte expuesta al tacto de mis dedos entre ellos; sin embargo, los hilos, con el movimiento y la fricción aplicados al cilindro, se elevaron de su posición colgante, formando un plano horizontal completo, dirigiendo sus extremos sueltos hacia el eje, como en el otro. Ahora bien, hasta qué punto este experimento puede servir para explicar la naturaleza de la electricidad, el magnetismo o la gravitación de los cuerpos, está fuera de mi alcance determinarlo; pero con toda humildad lo someto a los eruditos caballeros de esta honorable sociedad, que ya trataron esos temas.

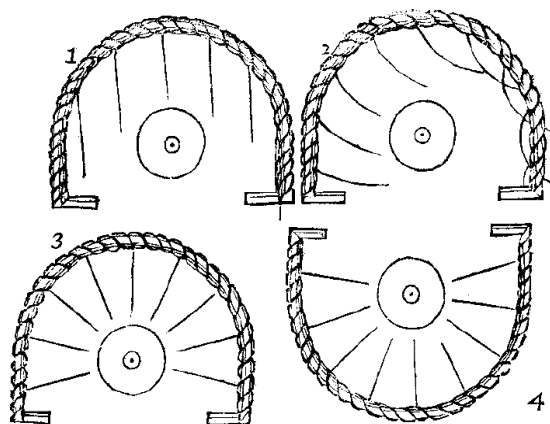


Figura 4.37: Cartografía de la fuerza eléctrica de Hauksbee. Vista extremal del cilindro de vidrio que muestra las posiciones de los hilos cuando el cilindro está: (1) inmóvil e inelectrizado; (2) en rotación e inelectrizado, con las corrientes de aire a su alrededor arrastrando todos los hilos en la misma dirección; (3) y (4) en rotación y electrizado, en cuyo caso, a pesar de la presencia continua de corrientes de aire, cada hilo se endereza y apunta hacia el eje del cilindro.

Capítulo 5

Las cargas positivas y negativas

5.1 ¿Existe un único tipo de carga?

Ahora realizaremos algunos experimentos similares al experimento 4.7. Utilizaremos los siguientes instrumentos: dos péndulos eléctricos, denominados *I* y *II*, y un versorio metálico. Además, también utilizaremos los siguientes materiales: dos pajitas de plástico, dos reglas acrílicas, dos vasos de vidrio, dos medias de seda y dos trozos de tela de hilos acrílicos. Estos materiales y sus formas, tal y como se representan en los siguientes experimentos, se describen en la figura 5.1. En lugar de dos medias de seda, también podemos utilizar dos telas de poliamida sintética.

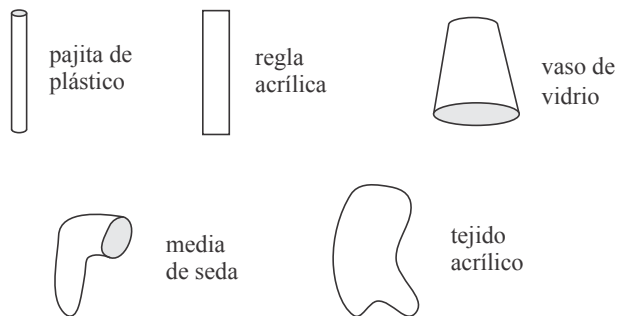


Figura 5.1: Materiales utilizados en los siguientes experimentos.

Las bobinas de «lana» que se venden habitualmente en las tiendas están compuestas hoy en día al 100 % por hilos acrílicos sintéticos. Supondremos que utilizamos un paño o una blusa fabricados con estos hilos acrílicos. En cuanto a las medias, hay que procurar utilizar solo las de seda o las de tejido sintético de poliamida. En las siguientes figuras, llamaremos «medias de seda» a cualquiera de estas medias o a cualquiera de estos paños sintéticos de poliamida.

El objetivo de estos experimentos es demostrar que diferentes materiales frotados presentan diferentes cargas eléctricas. Antes de comenzar cada experimento, debemos tocar el versorio y los discos de papel de los péndulos eléctricos con el dedo para descargarlos. Esta operación debe repetirse antes de acercar cada uno de los objetos frotados a los péndulos. El versorio se utilizará para comprobar si los cuerpos son neutros o están cargados. Una pajita, un vaso, una media y una regla deben ser neutros, sin afectar al versorio, y no se frotarán durante el experimento.

Para que el vidrio se electrice, generalmente debe estar seco. Además, el vaso de vidrio debe calentarse antes de frotarlo, de lo contrario se descargará a través de nuestra mano. La manipulación deja sudor en el vidrio, lo que debe evitarse. Se puede calentar al fuego o en el microondas antes de cada proceso de fricción. Si un vaso de vidrio no se puede cargar, es posible que tenga que probar otras mezclas de vidrio u otros tipos de vidrio hasta encontrar uno que se pueda cargar adecuadamente.

Se utilizarán paños acrílicos para frotar todos estos materiales. Podemos sujetar la pajita de plástico (o la regla acrílica, o la media de seda) con el paño acrílico y tirar rápidamente de la pajita. También podemos frotar rápidamente el paño sobre la superficie del vaso de vidrio.

Cuando frotamos un objeto con la media de seda, esto se representará con la letra *S* en el cuerpo. Cuando este objeto se frota con un paño acrílico, esto se representará con la letra *A*. Utilizaremos dos letras en discos de papel que primero tocaron los cuerpos frotados y luego fueron repelidos por ellos. La primera letra representará la sustancia del objeto tocado por el disco de papel. La segunda letra representará el material con el que se frotó el objeto. Los materiales que componen los objetos se representarán con las letras *P*, *V*, *A* y *S*. Indicarán, respectivamente, plástico, vidrio, acrílico y seda. Por ejemplo, las letras *PA* en un disco de papel indicarán que este tocó un trozo de Plástico que había sido frotado con un paño Acrílico y que, a continuación, el disco de papel fue repelido por el plástico frotado.

Primero tocamos el versorio y los dos discos de papel de los péndulos con el dedo. Acercamos la pajita no frotada (o el vaso, la media, la regla o el paño) al versorio, observando que todos estos cuerpos son eléctricamente neutros, ya que no deben orientar el versorio. Cuando uno de estos materiales no frotados orienta el versorio, debe sustituirse por otro material no frotado que no oriente el versorio y que, por lo tanto, sea realmente eléctricamente neutro. Durante el experimento, frotaremos una pajita, un vaso, una media y una regla. Los siguientes experimentos solo funcionan cuando estos objetos están correctamente cargados por fricción. Para asegurarnos de que este mecanismo de carga funcionó, acercaremos cada uno de estos objetos al versorio antes de acercarlos a los péndulos. Solo debemos continuar con el experimento cuando el versorio se oriente hacia estos cuerpos. Esta precaución es especialmente importante en el caso del vaso. Como se mencionó anteriormente, no siempre es fácil mantener cargado un vaso de vidrio frotado. El contacto con nuestra mano puede descargarlo fácilmente. A partir de ahora, daremos por supuesto que todos los objetos frotados se cargaron con éxito.

Experimento 5.1

Una pajita de plástico que fue frotada con un paño acrílico se acerca al primer péndulo neutro. El péndulo es atraído, toca la pajita y luego es repellido, figura 5.2 (a). Retiramos el plástico y el péndulo vuelve a la posición vertical. Frotamos una media de seda con otro paño acrílico. Acercamos esta media frotada al segundo péndulo neutro. Este es atraído por la media, la toca y luego es repellido, figura 5.2 (b). Retiramos la media y el péndulo vuelve a la posición vertical.

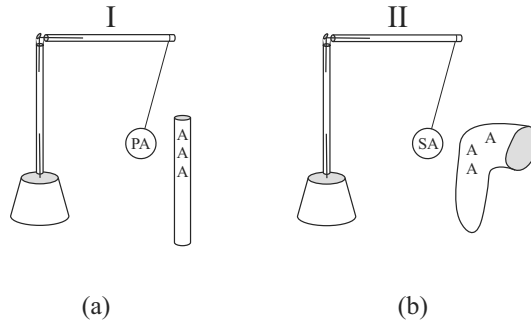


Figura 5.2: Tras el contacto, los péndulos son repellidos por los objetos que los tocaron.

Ahora acercamos lentamente la seda frotada al primer péndulo, sin dejar que entren en contacto. ¡Observamos una fuerte atracción entre ellos, figura 5.3 (a)! Cuando acercamos lentamente la pajita frotada al segundo péndulo, sin que entren en contacto, se produce otra fuerte atracción, figura 5.3 (b).

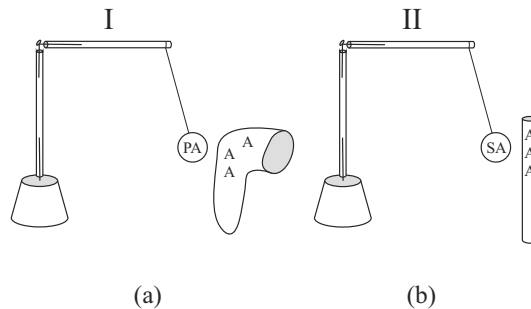


Figura 5.3: (a) El primer péndulo, cargado por contacto con un plástico frotado con un paño acrílico, es atraído por una media de seda frotada con un paño acrílico. (b) El segundo péndulo, cargado por contacto con una media frotada con un paño acrílico, es atraído por una pajita de plástico frotada con un paño acrílico.

Experimento 5.2

El vaso de vidrio se calienta y se frota con un paño acrílico. La parte frotada del vaso se acerca lentamente al primer péndulo, que se cargó por contacto con la pa-

jita en el experimento 5.1, y el vaso y el disco de papel del péndulo no deben entrar en contacto. Observamos una fuerte atracción entre el vaso frotado y el péndulo cargado, figura 5.4 (a). Por otro lado, cuando la parte frotada del vaso se acerca lentamente al segundo péndulo, que se cargó por contacto con la seda en el experimento 5.1 (sin contacto entre el vaso y el disco de papel del péndulo), observamos que se repelen mutuamente, figura 5.4 (b). Por lo tanto, concluimos que el vaso cargado actúa de la misma manera que la media cargada y no como la pajita cargada.

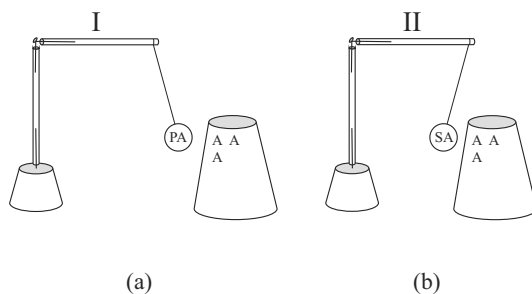


Figura 5.4: (a) El primer péndulo, cargado por contacto con un plástico frotado con un paño acrílico, es atraído por un vaso frotado con un paño acrílico. (b) El segundo péndulo, cargado por contacto con una media de seda frotada con un paño acrílico, es repelido por un vaso frotado con un paño acrílico.

Experimento 5.3

Frotamos la regla acrílica con el paño acrílico y, a continuación, acercamos lentamente la regla al primer péndulo, que se cargó al entrar en contacto con la pajita frotada con el paño acrílico, evitando cualquier contacto entre la regla y el péndulo. Observamos que se repelen mutuamente, figura 5.5 (a). Por el contrario, cuando la regla frotada se acerca lentamente al segundo péndulo, que se cargó por contacto con la media de seda frotada con el paño acrílico, se atraen fuertemente entre sí, figura 5.5 (b). Por lo tanto, concluimos que la regla cargada actúa de la misma manera que la pajita cargada y no como la media cargada o el vaso cargado.

El orden de este experimento puede invertirse y el resultado será el mismo. Por ejemplo, descargamos los péndulos, frotamos la regla acrílica con un paño acrílico y esta regla carga el primer péndulo por contacto. El vaso de vidrio se calienta, luego se frota con un paño acrílico y carga el segundo péndulo por contacto. Cuando la regla (o la pajita) frotada con un paño acrílico se acerca lentamente al primer péndulo, sin entrar en contacto con él, se produce una repulsión. Cuando esta regla (o pajita) se acerca lentamente al segundo péndulo, sin entrar en contacto con él, se produce una atracción. Por el contrario, cuando acercamos lentamente el vaso frotado (o la seda frotada) con un paño acrílico al primer péndulo cargado, sin contacto, se produce una fuerte atracción. Al acercar lentamente el vaso frotado (o la seda frotada) con un paño acrílico al segundo péndulo cargado, sin contacto, se produce una repulsión.

Estos experimentos pueden repetirse con otros materiales, obteniéndose resul-

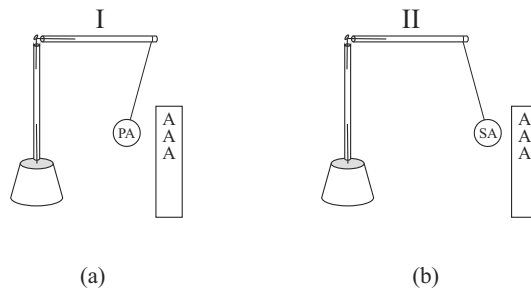


Figura 5.5: (a) El primer péndulo, cargado por contacto con un plástico frotado con un paño acrílico, es repelido por una regla acrílica frotada con un paño acrílico. (b) Por el contrario, el segundo péndulo, cargado por contacto con una media de seda frotada con un paño acrílico, es atraído por una regla acrílica frotada con un paño acrílico.

tados similares. Siempre hay atracciones o repulsiones entre los cuerpos cargados por fricción y los péndulos cargados por contacto. Y los cuerpos cargados pueden dividirse en dos grupos distintos. En nuestro ejemplo, el primer grupo está compuesto por la pajita de plástico frotada con un paño acrílico, la regla acrílica frotada con un paño acrílico, el péndulo eléctrico cargado por contacto con una pajita frotada con un paño acrílico o con una regla frotada con un paño acrílico. El segundo grupo está compuesto por el vaso de vidrio frotado con un paño acrílico, la media de seda frotada con un paño acrílico, el péndulo eléctrico cargado por contacto con el vidrio frotado con un paño acrílico o con la media de seda frotada con un paño acrílico.

Observaciones experimentales: Se observa lo siguiente: los objetos del primer grupo se repelen entre sí; los objetos del segundo grupo se repelen entre sí, y los objetos de los diferentes grupos se atraen entre sí.

Definiciones: Los objetos del primer grupo se denominan «cargados negativamente», «negativos», o decimos que adquirieron una «carga negativa». Los objetos del segundo grupo se denominan «cargados positivamente», «positivos», o decimos que adquirieron una «carga positiva». En las siguientes figuras, representamos esta convención con los símbolos «-» y «+», respectivamente.

Existe repulsión entre los cuerpos con cargas del mismo signo en las figuras 5.2 (a) y (b), 5.4 (b) y 5.5 (a). Existen atracciones entre los cuerpos cargados con cargas opuestas en las figuras 5.3 (a) y (b), 5.4 (a) y 5.5 (b).

Experimento 5.4

Las atracciones descritas en el experimento 5.1 son diferentes de las atracciones que se producen entre un péndulo cargado y un cuerpo neutro. Para verificar este hecho, repetimos la primera parte del experimento, cargando el péndulo *I* negativamente por contacto con una pajita de plástico negativa (frotada con un paño acrílico), y cargando el péndulo *II* positivamente por contacto con una media de seda positiva

(frotada con un paño acrílico). Cuando acercamos lentamente la pajita frotada al péndulo *II*, sin dejar que entren en contacto, observamos una atracción mucho más fuerte que la que se produce entre este péndulo y una pajita neutra.

La intensidad de la fuerza se puede medir utilizando tres magnitudes, a saber: (a) la distancia mínima, (b) el ángulo de inclinación para una distancia fija entre la pajita y la vertical que pasa por el punto de apoyo del hilo del péndulo, y (c) el ángulo de inclinación para una distancia fija entre la pajita y el disco del péndulo.

(a) La primera magnitud es la distancia mínima a la que comienza a detectarse la atracción, como lo demuestra el movimiento inicial del péndulo debido a la aproximación de la pajita. Esta distancia mínima es mayor para la atracción entre cuerpos de cargas opuestas que para la atracción entre un cuerpo cargado y un cuerpo neutro. (b) La segunda cantidad es el ángulo de inclinación de un péndulo con respecto a la vertical para la misma distancia entre el cuerpo y la vertical que pasa por el punto de apoyo del hilo del péndulo. Una vez más, observamos que este ángulo es mayor para la atracción entre cuerpos de cargas opuestas que el ángulo para la atracción entre un cuerpo cargado y un cuerpo neutro. (c) La tercera cantidad es el ángulo de inclinación del péndulo con respecto a la vertical, considerando la misma distancia entre el disco y la pajita. Este ángulo es mayor para la atracción entre cuerpos de cargas opuestas que el ángulo para la atracción entre un cuerpo cargado y un cuerpo neutro, figura 5.6. Estas tres magnitudes muestran que esta fuerza de atracción es claramente mucho mayor entre cuerpos de cargas opuestas que entre un cuerpo cargado y un cuerpo neutro. Por lo tanto, concluimos que la intensidad depende de si el objeto que se aproxima al péndulo es neutro o está cargado.

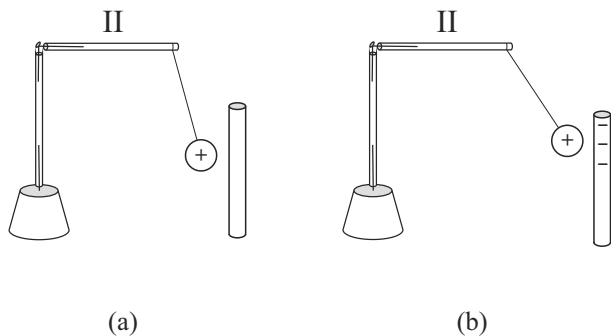


Figura 5.6: (a) La atracción entre un péndulo positivo y una pajita neutra es más débil que (b) la atracción entre un péndulo positivo y una pajita negativa.

Del mismo modo, cuando acercamos lentamente la media frotada al péndulo cargado negativamente *I*, sin dejar que entren en contacto, observamos una atracción más fuerte entre ellos que la atracción entre una media neutra y el péndulo cargado negativamente *I*, figura 5.7.

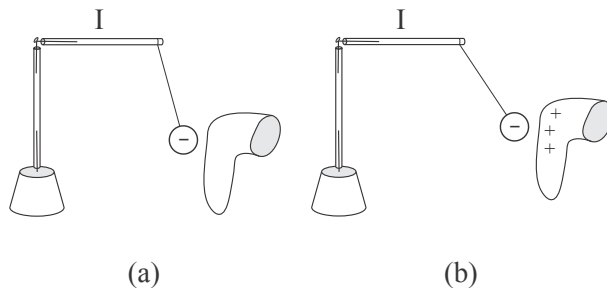


Figura 5.7: (a) La atracción entre una media neutra y un péndulo negativo es más débil que la atracción entre un péndulo negativo y una media positiva (b).

Experimento 5.5

También es posible observar otra distinción entre los cuerpos neutros y los cuerpos cargados. Supongamos que el péndulo *I* está cargado negativamente y que el péndulo *II* está cargado positivamente, como en el experimento 5.1. Hay repulsión cuando un cuerpo con carga negativa se acerca lentamente al péndulo *I*, mientras que hay atracción cuando ese cuerpo se acerca lentamente al péndulo *II*, véase la figura 5.8 (a). Lo contrario ocurre cuando un cuerpo con carga positiva se acerca lentamente a estos péndulos. Por el contrario, hay una atracción cuando acercamos un cuerpo neutro al péndulo *I* o al péndulo *II*. Véase la figura 5.8 (b). A veces, esta atracción es tan débil que resulta difícil detectarla.

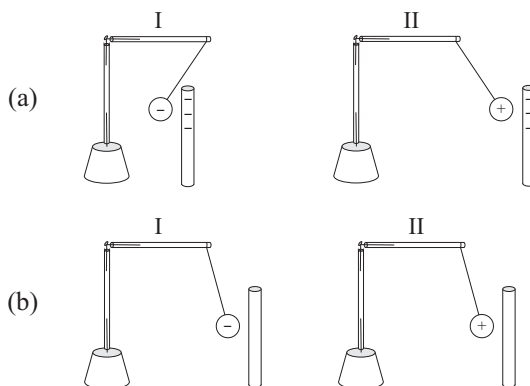


Figura 5.8: (a) Un cuerpo negativo (la pajita frotada) repele fuertemente a otro cuerpo negativo (el disco de papel del péndulo *I*) y atrae fuertemente a un cuerpo positivo (el disco de papel del péndulo *II*). (b) Un cuerpo neutro (la pajita no frotada) atrae a los cuerpos negativos y positivos (los discos de papel de los péndulos *I* y *II*). Además, la intensidad de estas fuerzas en los casos (a) es mayor que la observada en los casos (b).

Experimento 5.6

Ahora vamos a realizar algunos experimentos similares al experimento 4.4. Son más fáciles de realizar entre dos personas. Se necesitan dos pajitas de plástico, dos paños acrílicos (véase el experimento 5.1) y dos grupos de hebras de algodón. Un grupo de hebras de algodón debe tardar unos 10 segundos en caer desde una altura de 2 metros. También se pueden utilizar semillas de diente de león en lugar de hebras de algodón. Las dos pajitas deben frotarse bien con un paño acrílico para que se carguen negativamente. Cada persona sostiene una pajita en horizontal por uno de sus extremos. Con la otra mano, cada persona suelta sus hebras de algodón un poco por encima de su pajita. Las hebras de algodón son atraídos por la pajita y se adhieren a ella. Pero los hilos son empujados hacia fuera, repelidos por la pajita. A veces, las hebras de algodón saltan hacia arriba y comienzan a caer en el aire. Cuando esto no ocurre, hay que soplar suavemente sobre el algodón hasta que se desprenda de la pajita. Entonces se puede mantener suspendido en el aire moviendo continuamente la pajita frotada por debajo del algodón, ya que este es repelido por la pajita. En esta situación, el algodón y la pajita están cargados negativamente.

Ahora puede comenzar el nuevo experimento. Las dos personas mantienen sus hebras de algodón flotando en el aire encima de sus pajitas frotadas. Ahora deben intentar dirigir sus hebras de algodón uno hacia el otro, tratando de ponerlos en contacto en el aire. Sin embargo, nunca se tocan, por mucho que lo intenten. Nunca se acercan lo suficiente como para entrar en contacto. Es fácil comprender este hecho utilizando el principio ACR de Du Fay. Unas hebras de algodón flotante son repelidas por la pajita situada debajo, ya que ambas tienen cargas del mismo signo (negativo en este caso). Como los dos grupos de hebras de algodón tienen carga negativa, se repelen mutuamente. Por lo tanto, no podemos hacer que se toquen, por mucho que lo intentemos, figura 5.9.

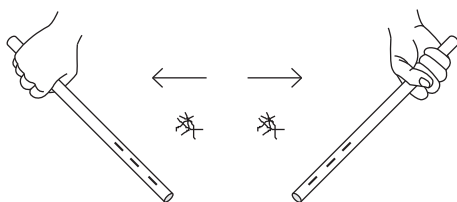


Figura 5.9: No es posible unir dos grupos de hebras de algodón con carga negativa.

Experimento 5.7

En este experimento, volvemos a utilizar dos pajitas de plástico que se cargaron negativamente frotándolas con un paño acrílico, como en el experimento 5.6. Pero esta vez solo utilizamos un grupo de hebras de algodón. Al principio, podemos hacer flotar el algodón encima de la pajita frotada previamente con un paño acrílico, gracias al mecanismo ACR, como en el experimento 4.4. En ese momento, acercamos la segunda pajita negativa horizontalmente cerca del algodón flotante. Observamos que el algodón se aleja de esta segunda pajita, ya que también es repelido, figura 5.10.

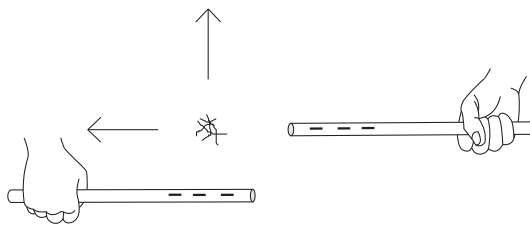


Figura 5.10: Fuerzas eléctricas que actúan sobre unas hebras de algodón con carga negativa.

Experimento 5.8

Repetimos el experimento 5.7, manteniendo inicialmente las hebras de algodón negativas flotando encima de una pajita de plástico cargada negativamente. Esta vez, acercamos lateralmente un vaso de vidrio cargado positivamente (es decir, previamente calentado y frotado con un paño acrílico) a las hebras de algodón. En este caso, las hebras de algodón son atraídas por el vaso frotado y se desplazan hacia él, figura 5.11. Es preferible acercarse lentamente, evitando cualquier contacto entre el algodón y el vaso, para impedir que las hebras de algodón se carguen de nuevo por el mecanismo ACR, esta vez de forma positiva.

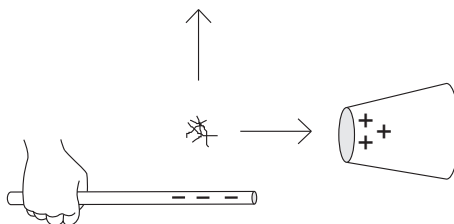


Figura 5.11: Unas hebras de algodón con carga negativa son atraídas por un trozo de vidrio con carga positiva.

Experimento 5.9

Ahora utilizamos unas hebras de algodón, dos paños acrílicos, una pajita de plástico y un vaso de vidrio. Este experimento debe realizarlo dos personas. Sin embargo, con un poco de práctica, también puede hacerlo una sola persona. La pajita y el vaso se frotarán con un paño acrílico. Sabemos que, en este caso, la pajita se volverá negativa y el vaso, positivo. Para crear una fuerte carga en el vaso, es importante calentarlo antes de frotarlo, como se mencionó anteriormente.

El comienzo de esta actividad es idéntico al del experimento 4.4. Es decir, frotamos el vaso contra el paño acrílico y sujetamos el vaso por la parte que no fue frotada. Se sueltan las hebras de algodón por encima. El algodón es atraído por la parte frotada del vidrio, la toca y sus fibras se estiran hacia fuera. A veces, el algodón salta del vidrio al cabo de unos segundos. Si esto no ocurre, podemos volver a soplar ligeramente

sobre el algodón hasta que se desprenda del vidrio. Si colocamos el vaso debajo del algodón, podemos mantener el algodón suspendido encima del vaso. A veces, esto no ocurre inmediatamente, por lo que es atraído una o varias veces por el vaso hasta que adquiere suficiente carga para permanecer suspendido encima de él. Cuanto más electrizado esté el vaso, más rápido mantendrá las hebras de algodón flotando encima de él. A partir de ahora, daremos por concluida esta parte del experimento. En este caso, tanto el vaso como el algodón que flota encima de él están cargados positivamente, figura 5.12 (a).

Mientras el algodón flota encima del vaso frotado, acercamos lentamente una pajita de plástico cargada negativamente al algodón, acercándola por arriba. En este caso, observamos que el algodón es atraído por la pajita, al contrario de lo que ocurrió en el experimento 5.7. Lo ideal sería que el algodón no tocara la pajita de plástico. Es decir, cada vez que el algodón se mueva hacia la pajita, esta debe alejarse de él. Con suficiente práctica, podemos mantener el algodón flotando entre el vaso de abajo y la pajita de arriba, figura 5.12 (b).

En este caso, es incluso posible retirar el vaso, de modo que el algodón seguirá flotando únicamente gracias a la atracción de la pajita cargada que se encuentra encima de él. En esta situación, tenemos lo contrario del experimento 4.4. En el experimento 4.4, el algodón negativo flotaba gracias a la repulsión de la pajita situada debajo. Aquí, en cambio, el algodón positivo flota gracias a la atracción de la pajita situada encima, figura 5.12 (c). Para que el algodón siga flotando bajo la pajita, es importante moverla constantemente; no puede permanecer inmóvil con respecto a la Tierra, ya que se trata de un equilibrio inestable. Cuando la pajita está muy cerca del algodón, este se desplaza rápidamente hacia ella y se pega a ella, poniendo fin al experimento. Por el contrario, si la pajita se encuentra a una gran distancia por encima del algodón, este comienza a caer al suelo. Además, las hebras de algodón tienden a desplazarse hacia un lado u otro del plano vertical que pasa por la pajita. Por lo tanto, es necesario mantener la pajita en constante movimiento, de modo que las hebras de algodón puedan seguir su movimiento, pero sin tocarla.

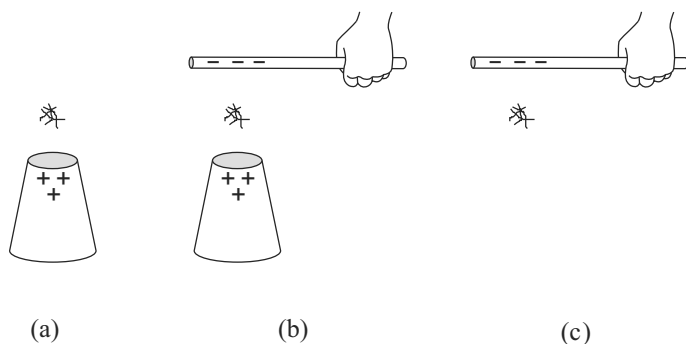


Figura 5.12: (a) Unas hebras de algodón positivas pueden flotar encima de un vaso de vidrio positivo. (b) También pueden flotar entre un vaso positivo debajo y una pajita negativa encima. (c) Podemos retirar el vaso y mantener las hebras de algodón flotando bajo la pajita negativa.

Cuando el algodón toca la pajita superior, se adhiere a ella. A veces, cae al cabo de unos segundos. Entonces podemos mantenerlo suspendido encima de la pajita, ya que volvió a adquirir una carga del mismo signo que la de la pajita. En otros casos, solo se desprenderá de la pajita cuando soplemos sobre él. En cualquier caso, cuando vuelve a flotar encima de la pajita, podemos invertir la situación. Cuando acercamos un vaso positivo al algodón negativo por arriba, el algodón permanece suspendido entre los dos cuerpos: la pajita negativa por debajo y el vaso positivo por encima.

En el experimento 5.16, veremos cómo realizar este experimento más fácilmente con dos pajitas de plástico electrizadas.

Experimento 5.10

Para este experimento necesitamos dos personas, una pajita de plástico, un vaso, dos paños acrílicos y dos grupos de hebras de algodón. Una persona frota el vaso con un paño acrílico y luego mantiene unas otras hebras de algodón suspendidas encima de él. En este caso, los dos cuerpos se cargan positivamente, figura 5.13 (a). La otra persona frota la pajita con un paño acrílico y luego mantiene unas hebras de algodón flotando encima. En este caso, los dos objetos están cargados negativamente, figura 5.13 (b).

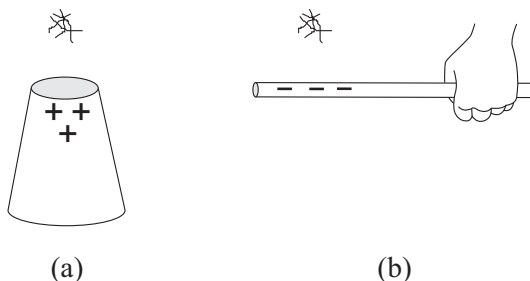


Figura 5.13: (a) Unas hebras de algodón positivas flotan encima de un vaso de vidrio positivo. (b) Unas hebras de algodón negativas flotan encima de un plástico con carga negativa.

Después de eso, cada persona intenta dirigir sus hebras de algodón hacia las otras hebras de algodón. En este caso, los dos grupos de hebras de algodón se atraen, se pegan entre sí y caen al suelo, figura 5.14. Es lo contrario de lo que ocurrió en el experimento 5.6.

5.2 Du Fay descubre dos tipos de electricidad

El primero en proponer la existencia de dos tipos de electricidad fue Du Fay en 1733, cuando realizó experimentos similares a los que acabamos de presentar. Hasta entonces, se sabía que los cuerpos electrizados atraían a los cuerpos ligeros y eran atraídos por ellos. Du Fay había observado otra regularidad, a saber, la repulsión entre dos cuerpos cargados. Se trataba de otra propiedad de los cuerpos cargados, tal y

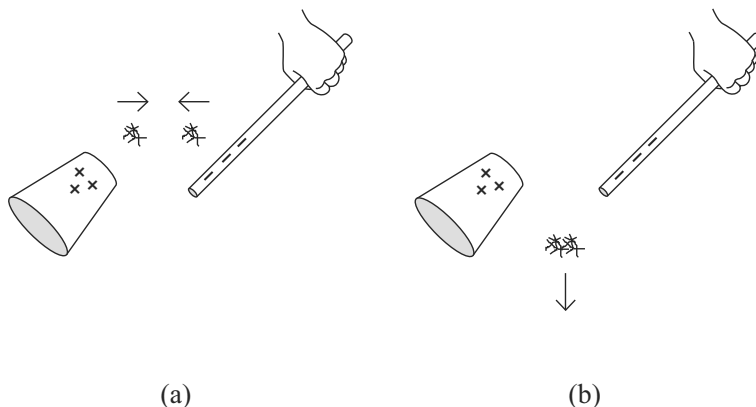


Figura 5.14: (a) Unas hebras de algodón positivas son atraídas por unas hebras negativas. (b) Después de tocarse, caen juntos al suelo.

como se describe en la sección 4.1. También había descubierto el mecanismo ACR, es decir, atracción–comunicación (o contacto)–repulsión. Su descubrimiento de dos tipos de electricidad fue totalmente inesperado. Es el resultado de un curioso experimento que dio un resultado totalmente contrario a sus expectativas. Comenzó reproduciendo los experimentos con un plumón flotante realizados por Guericke, Gray y Hauksbee. Véase el experimento 4.4. Al principio, electrizó un tubo de vidrio por fricción. A continuación, liberó pequeñas hojas de oro delgadas encima del tubo frotado. Estas fueron atraídas por el tubo, se pegaron a él y luego fueron repelidas por él. De esta manera, permanecieron suspendidas sobre él. A continuación, citamos sus palabras que describen el momento crucial de su gran descubrimiento (el énfasis en cursiva es nuestro):^{1,2}

¹[DF33b, pp. 464–465] y [RR57, p. 586].

²[...] Il demeure donc pour constant, que les corps devenus électriques par communication [c'est-à-dire, par le mécanisme ACR], sont chassés par ceux qui les ont rendus électriques; mais le sont-ils de même par les autres corps électriques de tous les genres? & les corps électriques ne différent-ils entre-eux que par les divers degrés d'électricité? *cet examen m'a conduit à une autre vérité que je n'aurois jamais soupçonnée, & dont je crois que personne n'a encore eu la moindre idée.*

J'ai commencé par soutenir en l'air avec le même tube, deux feuilles d'or [électrifiées par le mécanisme ACR], & elles se sont toujours éloignées l'une de l'autre, quelques efforts que j'aye faits pour les rapprocher, & cela devoit arriver de la sorte, puisque elles étoient toutes deux électriques; mais si-tôt que l'une des deux avoit touché la main ou quelque autre corps, elles se joignoient sur le champ l'une à l'autre, parce que celle-ci ayant [touché la main et] perdu son électricité, l'autre [feuille électrifiée] l'attiroit & tendoit vers elle: tout cela s'accordoit parfaitement avec mon hypothèse, *mais ce qui me déconcerta prodigieusement, fut l'expérience suivante.*

Ayant élevé en l'air une feuille d'or par le moyen du tube [en verre électrifié], j'en approchai un morceau de gomme copal frottée, & rendue électrique, la feuille fut s'y appliquer sur le champ [c'est-à-dire que la feuille d'or était attirée par la gomme copal frottée], & y demeura; *j'avoué que je m'attendois à un effet tout contraire*, parce que selon mon raisonnement, la copal qui étoit électrique devoit repousser la feuille qui l'étoit aussi [c'est-à-dire, Du Fay s'attendait à une répulsion entre les deux corps électrifiés, comme il l'avait toujours observé]; je répétai l'expérience un grand nombre de fois, croyant que je ne présentais pas à la feuille l'endroit [de la copal] qui avoit été frotté, & qu'ainsi elle ne s'y portoit que comme elle auroit fait à mon doigt, ou à tout autre corps [non électrifié], mais ayant pris sur cela mes mesures, de façon à ne

[...] Por lo tanto, sigue siendo cierto que los cuerpos que se electrizaron por comunicación [es decir, por el mecanismo ACR], son repelidos por aquellos que los electrizaron; pero ¿lo son igualmente por otros cuerpos eléctricos de todo tipo? & ¿los cuerpos eléctricos solo se diferencian entre sí por los distintos grados de electricidad? *Este examen me llevó a otra verdad que nunca habría sospechado*, & de la que creo que nadie tuvo aún la menor idea.

Empecé por sostener en el aire, con el mismo tubo, dos hojas de oro [electrizadas por el mecanismo ACR], & siempre se alejaban una de otra, por mucho que yo intentara acercarlas, & así debía suceder, ya que ambas eran eléctricas; pero tan pronto como una de las dos tocaba la mano o cualquier otro cuerpo, se unían inmediatamente entre sí, porque al [tocar la mano y] perder su electricidad, la otra [hoja electrizada] la atraía & se tendía hacia ella [Una ilustración de este experimento figura en la figura 5.15]: todo esto encajaba perfectamente con mi hipótesis, *pero lo que me desconcertó enormemente* fue el siguiente experimento.

Habiendo elevado al aire una hoja de oro por medio del tubo [de vidrio electrizado], acerqué un trozo de goma copal³ frotado y electrizado, y la hoja se adhirió a él inmediatamente [es decir, la hoja de oro fue atraída por la goma copal frotada] y permaneció allí [En la figura 5.16 se muestra una ilustración de este experimento]; *reconozco que esperaba un efecto totalmente contrario*, porque según mi razonamiento, el copal, que era eléctrico, debía repeler la hoja, que también lo era [es decir, Du Fay esperaba una repulsión entre los dos cuerpos electrizados, como siempre había observado]; repetí el experimento muchas veces, creyendo que no estaba presentando a la hoja el lugar [del copal] que había sido frotado, & que, por lo tanto, se comportaba como lo habría hecho con mi dedo o con cualquier otro cuerpo [no electrizado], pero, tras tomar mis medidas al respecto, de modo que no me quedara ninguna duda, quedé convencido de que el copal atraía la hoja de oro, aunque fuera repelida por el tubo: lo mismo ocurría al acercar a la hoja de oro un trozo de ámbar [frotado] o de cera de España frotada.

Después de varios intentos más que no me satisfacían en absoluto, acerqué a la hoja de oro repelida por el tubo una bola de cristal de roca frotada y electrizada, y esta [la bola] repelió la hoja al igual que el tubo. Otro tubo [de vidrio electrizado] que acerqué a la misma hoja la repelió de la misma manera, por fin, no pude dudar de que el vidrio y el cristal de roca hacían precisamente lo contrario que la goma copal, el ámbar y la cera de España, de modo que la hoja repelida por unos [el primer grupo frotado], debido a la electricidad que había contraído, era atraída por los otros [el segundo grupo frotado]; *esto me hizo pensar que tal vez había dos tipos diferentes de electricidad*, & las siguientes experiencias confirmaron esta idea.

me laisser aucun doute, je fus bien convaincu que la copal attiroit la feuille d'or, quoiqu'elle fût repoussée par le tube: la même chose arrivoit en approchant de la feuille d'or un morceau d'ambre [frotté], ou de cire d'Espagne frotté.

Après plusieurs autres tentatives qui ne me satisfaisoient aucunement, j'approchai de la feuille d'or chassée par le tube, une boule de cristal de roche frottée & rendue électrique, elle [la balle] repoussa cette feuille de même que le tube. Un autre tube [en verre électrisé] que je fis présenter à la même feuille la chassa de même, enfin je ne pus pas douter que le verre & le cristal de roche, ne fissent précisément le contraire de la gomme copal, de l'ambre & de la cire d'Espagne, ensorte que la feuille repoussée par les uns [le premier groupe frotté], à cause de l'électricité qu'elle avoit contractée, étoit attirée par les autres [le second groupe frotté]; *cela me fit penser qu'il y avoit peut-être deux genres d'électricité différents*, & je fus bien confirmé dans cette idée par les expériences suivantes.

³Véase el anexo A.

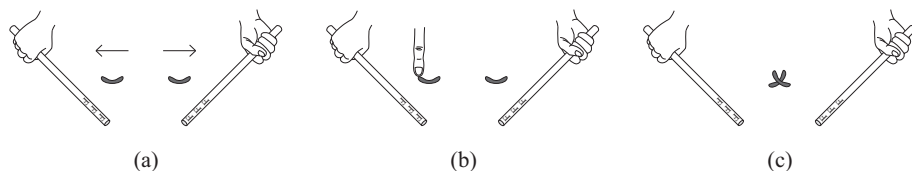


Figura 5.15: (a) Dos hojas de oro electrizadas se repelen entre sí y también repelen los tubos de vidrio electrizados. (b) La mano toca una de las hojas flotantes. (c) Tras el contacto con la mano, las hojas se acercan entre sí.

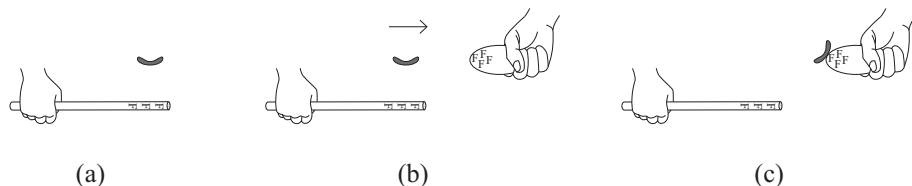


Figura 5.16: (a) Una hoja de oro electrizada flota encima de un vaso frotado. (b) Un trozo de copal frotado se mueve cerca de la hoja flotante. La hoja es atraída por el copal frotado, y la flecha indica esta nueva fuerza que se ejerce sobre ella. (c) ¡La hoja se mueve hacia el copal frotado!

Como la mayoría de las sustancias del primer grupo que encontró eran sólidas y transparentes como el vidrio, denominó al primer tipo de electricidad «vítrea». Y como la mayoría de las sustancias del segundo grupo que encontró eran bituminosas o resinosas, denominó a este segundo tipo de electricidad «resinosa».^{4,5}

Así pues, existen constantemente dos tipos de electricidad de naturaleza totalmente diferente, a saber, la de los cuerpos transparentes y sólidos, como el vidrio, el cristal, etc., y la de los cuerpos bituminosos o resinosos, como el ámbar, la goma copal, la cera de España, etc. Ambas repelen los cuerpos que contrajeron una electricidad de la misma naturaleza que la suya y, por el contrario, atraen a aquellos cuya electricidad es de naturaleza diferente a la suya. [...]

Así pues, tenemos dos tipos de electricidad bien demostrados, y no puedo evitar darles nombres diferentes para evitar la confusión de términos o la dificultad de definir en cada momento a cuál me refiero; llamaré a una «electricidad vítrea» y

⁴[DF33b, pp. 467, 469].

⁵Voilà donc constamment deux électricités d'une nature toute différente, sçavoir, celle des corps transparents & solides, comme le verre, le cristal, &c. & celle des corps bitumineux ou résineux, comme l'ambre, la gomme copal, la cire d'Espagne, etc. Les uns & les autres repoussent les corps qui ont contracté une électricité de même nature que la leur, & ils attirent, au contraire, ceux dont l'électricité est d'une nature différente de la leur. [...]

Voilà donc deux électricités bien démontrées, & je ne puis me dispenser de leur donner des noms différents pour éviter la confusion des termes, ou l'embarras de définir à chaque instant celle dont je voudrai parler; j'appellerai donc l'une l'électricité vitrée, & l'autre l'électricité résineuse, non que je pense qu'il n'y a que les corps de la nature du verre qui soient doués de l'une, & les matières résineuses de l'autre, car j'ai déjà de fortes preuves du [point de vue] contraire, mais c'est parce que le verre & la copal sont les deux matières qui m'ont donné lien de découvrir ces deux différentes électricités.

a la otra «electricidad resinosa», no porque piense que solo los cuerpos de naturaleza vítrea están dotados de la primera y los materiales resinosos de la segunda, ya que tengo pruebas sólidas de lo contrario, sino porque el vidrio y el copal son las dos materias que me permitieron descubrir estas dos electricidades diferentes.

Du Fay no especificó qué material utilizó para frotar el tubo de vidrio y las demás sustancias. Probablemente frotó estas sustancias con un paño de lana, seda o algodón.

En una obra algo posterior, describió este descubrimiento fortuito en los siguientes términos:^{6,7}

El azar puso en mi camino otro principio, más universal y notable que el anterior [el mecanismo ACR, véase la sección 4.8], y que arroja una nueva luz sobre el tema de la electricidad. Este principio consiste en que hay dos tipos de electricidad distintos, muy diferentes entre sí; a uno lo denomino «electricidad vítrea» y al otro, «electricidad resinosa». La primera [electricidad] es la del vidrio [frotado], el cristal de roca, las piedras preciosas, el pelo de los animales, la lana y muchos otros cuerpos. La segunda es la del ámbar [frotado], el copal, la goma laca, la seda, el hilo, el papel y un gran número de otras sustancias. La característica de estas dos electricidades es que un cuerpo de «electricidad vítrea», por ejemplo, repele a todos los que tienen la misma electricidad y, por el contrario, atrae a todos los de «electricidad resinosa»; de modo que el tubo [de vidrio], electrizado [por fricción], repelerá al vidrio, al cristal, al pelo de los animales, etc. cuando se electriza [por fricción o por el mecanismo ACR al entrar en contacto con el tubo de vidrio frotado] y atraerá la seda, el hilo, el papel, etc., aunque también se electrice [por fricción o por el mecanismo ACR al entrar en contacto con un copal frotado]. Por el contrario, el ámbar [frotado] atraerá el vidrio eléctrico y otras sustancias [electrizadas] de la misma clase, y repelerá la goma laca [frotada], el copal, la seda, el hilo, etc. Dos cintas de seda que se electrizaron [por fricción] se repelen entre sí; dos hilos de lana [electrizados] hacen lo mismo; pero un hilo de lana [frotado] y un hilo de seda [frotado] se atraen mutuamente. Este principio explica de forma muy natural por qué los extremos de los hilos de seda

⁶[DF34a, pp. 263–264].

⁷Chance has thrown in my way another Principle, more universal and remarkable than the preceding one [the ACR mechanism], and which casts a new Light on the Subject of Electricity. This Principle is, that there are two distinct Electricities, very different from one another; one of which I call *vitreous Electricity*, and the other *resinous Electricity*. The first [electricity] is that of [rubbed] Glass, Rock-Crystal, Precious Stones, Hair of Animals, Wool, and many other Bodies. The second is that of [rubbed] Amber, Copal, Gum-Lack, Silk, Thread, Paper, and a vast Number of other Substances. The Characteristick of these two Electricities is, that a Body of the *vitreous Electricity*, for Example, repels all such as are of the same Electricity; and on the contrary, attracts all those of the *resinous Electricity*; so that the [glass] Tube, made electrical [by rubbing], will repel Glass, Crystal, Hair of Animals, &c. when render'd electrick [by rubbing or by the ACR mechanism by getting in touch with the rubbed glass tube] and will attract Silk, Thread, Paper, &c. though render'd electrical likewise [by rubbing or by the ACR mechanism by getting in touch with a rubbed copal]. [Rubbed] Amber on the contrary will attract electrick Glass, and other [electrified] Substances of the same Class, and will repel [rubbed] Gum-Lac, Copal, Silk, Thread, &c. Two Silk Ribbons rendered electrical [by rubbing], will repel each other; two [electrified] Woollen Threads will do the like; but a [rubbed] Woollen Thread and a [rubbed] Silk Thread will mutually attract one another. This Principle very naturally explains, why the Ends of Threads, of Silk, or Wool, recede from one another in Form of a Pencil or Broom, when they have acquired an electrick Quality. From this Principle one may with the same Ease deduce the Explanation of a great Number of other *Phenomena*. And 'tis probable, that this Truth will lead us to the further Discovery of many other things.

o lana se alejan entre sí en forma de lápiz o escoba cuando adquirieron una cualidad eléctrica. A partir de este principio se puede deducir con la misma facilidad la explicación de un gran número de otros fenómenos. Y es probable que esta verdad nos lleve al descubrimiento de muchas otras cosas.

Como veremos más adelante, ya no utilizamos la terminología de Du Fay. En lugar de los términos «electricidad vítrea» y «electricidad resinosa», utilizamos respectivamente «electricidad positiva» y «electricidad negativa». Otras expresiones similares que se utilizan hoy en día son «cargas eléctricas positivas y negativas» o «cuerpos cargados positiva y negativamente». A pesar de esta terminología diferente, la hipótesis fundamental de Du Fay sobre la existencia de dos tipos de electricidad sigue siendo aceptada. En la práctica moderna, también se sigue admitiendo que las cargas de la misma naturaleza se repelen, mientras que las cargas de diferente naturaleza se atraen.

Blondel y Wolff realizaron un vídeo muy interesante que muestra una reproducción moderna del crucial experimento de Du Fay:⁸ «El baile de las hojas de oro».

5.3 ¿Qué tipo de carga adquiere un cuerpo por fricción?

En los experimentos del capítulo 2, analizamos qué sustancias eran atraídas o no por un objeto frotado. También descubrimos que algunas sustancias frotadas tenían el poder de atraer cuerpos ligeros. Aquí, variaremos de manera más sistemática la sustancia con la que se frota los objetos.

Utilizaremos un instrumento muy práctico compuesto por una fina tira de plástico flexible fijada a un soporte horizontal (como un lápiz, un bolígrafo, un palito o una pajita). La tira puede medir, por ejemplo, 5 cm de ancho y 15 cm de largo. Uno de sus extremos se fija a un lápiz con cinta adhesiva. El lápiz se mantiene en posición horizontal y la tira en posición vertical. La figura 5.17 muestra un instrumento de este tipo, de perfil y de frente. Por analogía con el hilo pendular de Gray de la sección 4.9, podemos llamar a este instrumento «hilo pendular de plástico» o «tira pendular de plástico».

Muchos de estos instrumentos pueden fabricarse con el mismo material plástico (por ejemplo, todas las tiras pueden recortarse de la misma bolsa de plástico). Hay que evitar manipular las tiras para que no se carguen por fricción. Antes de comenzar los experimentos con estos instrumentos, hay que comprobar que sean neutros. Primero descargamos un versorio metálico tocándolo con el dedo. A continuación, acercamos lentamente cada tira de plástico colgante al versorio, sin que se toquen entre sí. Si el versorio no se orienta hacia la tira, podemos considerar que el plástico es neutro. Cuando el versorio se orienta hacia la tira, hay que desechar ese plástico y fabricar otro instrumento para sustituirlo.

⁸[BW20] y [BW12].

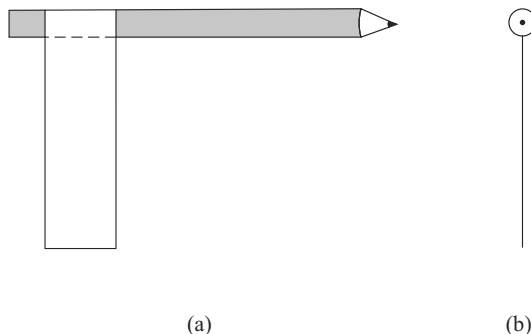


Figura 5.17: Una fina tira de plástico flexible unida a un lápiz. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

Experimento 5.11

Ahora tomamos dos de esas tiras de plástico neutras colgantes. Las frotamos presionando cada tira entre dos tubos neutros de PVC, como tuberías de agua. Para ello, primero comprobamos si estos tubos son realmente neutros. Esto se puede hacer acercando cada tubo a un versorio metálico y observando que el versorio no se orienta hacia el tubo de PVC. La parte superior de la tira de plástico queda bien comprimida entre dos de estos tubos de PVC neutros. A continuación, tiramos rápidamente del lápiz con su tira hacia arriba. Podemos comprobar que la tira se cargó después de este procedimiento acercándola a un versorio, que entonces gira hacia el plástico frotado. Este procedimiento de frotamiento debe repetirse con la segunda tira de plástico pendular neutra. Ahora acercamos estas dos tiras que fueron frotadas con tubos de PVC. Una vez más, se repelen.

También hay repulsión entre dos tiras de plástico, inicialmente neutras, que fueron frotadas con cabello. Lo mismo ocurre con dos tiras neutras después de haber sido frotadas entre dos tubos de caucho duro.⁹

Estos cuatro casos de repulsión se representan en la figura 5.18.

Experimento 5.12

Ahora tomamos una de las tiras de plástico que frotamos entre los dedos. La acercamos a otra tira de plástico que frotamos con tubos de PVC. Observamos que se atraen mutuamente.

También se produce atracción cuando acercamos una tira de plástico frotada entre los dedos a otra tira de plástico que fue frotada entre tubos de goma.¹⁰ Lo mismo ocurre entre un plástico frotado con cabello y un plástico que fue frotado entre tubos de PVC;

⁹ Como se indica en el volumen 2 de esta obra, lo que denominé «caucho duro» o «tubo de goma» en el volumen 1 de esta obra (un tubo flexible blanco que se utiliza habitualmente en Brasil para conectar las duchas eléctricas) está fabricado en PVC o PTFE, es decir, un tubo o manguera de cloruro de polivinilo o politetrafluoroetileno, [Ass18a], [Ass18b] y [Ass19].

¹⁰Véase la nota al pie de página 9.

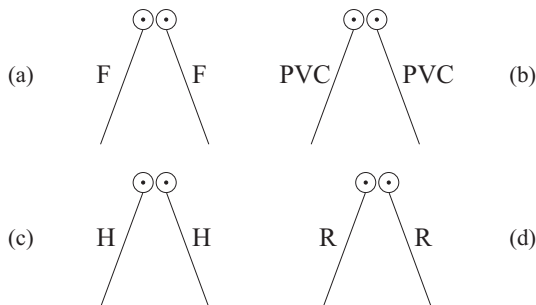


Figura 5.18: Repelencia entre dos tiras de plástico frotadas entre dos dedos (F), entre dos tubos de PVC , con cabello (H) o entre dos tubos de goma (R).

o entre un plástico que fue frotado con cabello y un plástico frotado entre tubos de goma.

Estos cuatro casos de atracción se representan en la figura 5.19.

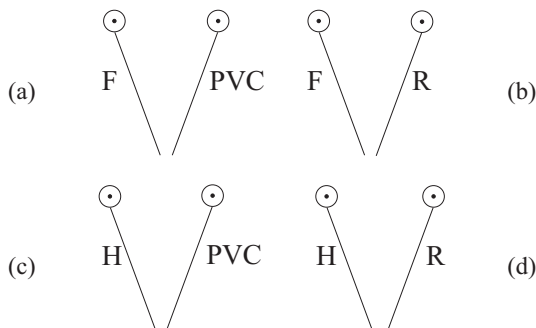


Figura 5.19: Cuatro casos de atracción entre dos tiras de plástico frotadas con diferentes sustancias. (a) Dedo y PVC . (b) Dedo y goma. (c) Cabello y PVC . (d) Cabello y goma.

Experimento 5.13

Por otro lado, existe repulsión entre un plástico que fue frotado entre nuestros dedos y otro plástico frotado con cabello. Lo mismo ocurre entre un plástico frotado entre tubos de PVC y otro frotado entre tubos de goma, figura 5.20.

Estos experimentos demuestran que una misma sustancia, en nuestro caso una tira de plástico, puede cargarse negativa o positivamente, dependiendo del material con el que se frote. Esto parece confirmar la teoría de Du Fay de que existen dos tipos de electricidad. Sin embargo, su hipótesis de que cada tipo de electricidad está asociado a un grupo específico de sustancias no es válida. En lugar de hablar de «electricidad vítrea y resinosa», como sugiere Du Fay, adoptamos la terminología de «cargas positivas y negativas». En el experimento 5.1, separamos los cuerpos cargados en dos grupos

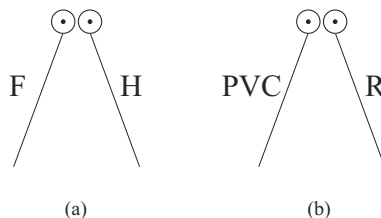


Figura 5.20: Repulsión entre dos tiras de plástico frotadas con diferentes sustancias. (a) Dedos y cabello. (b) PVC y caucho.

distintos. En nuestro ejemplo, el primer grupo estaba compuesto por una pajita de plástico frotada con un paño acrílico, una regla acrílica frotada con un paño acrílico, un péndulo cargado por contacto con esta pajita de plástico y un péndulo cargado por contacto con esta regla acrílica frotada. En nuestro ejemplo, el segundo grupo estaba compuesto por un vaso de vidrio frotado con un paño acrílico, una media de seda frotada con un paño acrílico, un péndulo cargado por contacto con este vaso frotado y un péndulo cargado por contacto con esta seda frotada. Se observó que los objetos del primer grupo se repelían entre sí, que los objetos del segundo grupo se repelían entre sí y que un objeto del primer grupo atraía a un objeto del segundo grupo.

Convención: La convención actual es que los objetos del primer grupo «se cargaron negativamente» o adquirieron una «carga negativa». También se dice que los objetos del segundo grupo «se cargaron positivamente» o adquirieron una «carga positiva».

El propio Du Fay intentó determinar si el tipo de electricidad adquirida por un objeto podía depender del material con el que se frotaba.¹¹ Para comprobar esta influencia, frotó un paño de seda calentado primero con las manos y luego con otro paño de seda calentado. Comprobó que la seda frotada adquiría la misma electricidad resinosa en ambos casos. También frotó lana y plumones con las manos y con seda. En ambos casos, observó que la lana y los plumones adquirían la misma electricidad vítrea. Tras estas pruebas, concluyó que el material con el que frotamos un cuerpo puede modificar la cantidad de electricidad que adquiere el cuerpo, pero no el tipo de electricidad adquirida. Más tarde, esta conclusión tuvo que modificarse cuando se descubrió que el mismo cuerpo podía adquirir los dos tipos de carga eléctrica, dependiendo del material con el que se frotara. Por lo tanto, ya no tiene sentido hablar de «electricidad vítrea» o «electricidad resinosa», ya que el vidrio, por ejemplo, puede adquirir los dos tipos de electricidad, dependiendo de la sustancia con la que se frote.

Definiciones: Hoy en día se habla de «electricidad positiva y negativa» o de «cargas positivas y negativas». Además, se suele llamar «negativa» a la carga adquirida por una pajita de plástico frotada con cabello, piel, algodón o seda. Del mismo modo, la carga adquirida por una pajita de plástico frotada con caucho duro, un tubo acrílico o PVC se denomina «positiva».

¹¹[DF33b, pp. 472–473].

Experimento 5.14

Para determinar qué cargas adquirieron los plásticos frotados en el experimento 5.11, realizamos un experimento que comienza de forma muy similar al experimento 5.1. Un péndulo eléctrico *I* se carga negativamente por contacto con una pajita de plástico cargada por fricción con un paño acrílico. Un péndulo eléctrico *II* se carga positivamente por contacto con una media de seda cargada por fricción con un paño acrílico. Colocamos estos dos péndulos a una buena distancia uno del otro. La pajita frotada y la media frotada se retiran de la mesa. Los hilos de los dos péndulos cargados cuelgan verticalmente. Frotamos una tira de plástico colgante con los dedos. Acercamos lentamente este plástico frotado al péndulo *I*, sin dejar que entren en contacto. Observamos que el péndulo es repelido por el plástico, figura 5.21 (a). Tras este procedimiento, acercamos lentamente el plástico frotado al péndulo *II*, sin que entren en contacto. Observamos una atracción entre ellos, figura 5.21 (b). Por lo tanto, concluimos que el plástico que frotamos con los dedos se cargó negativamente.

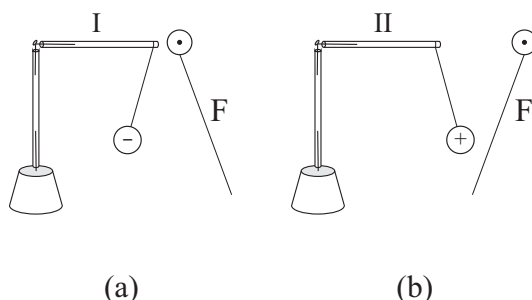


Figura 5.21: Procedimiento de Du Fay para determinar el signo de la carga de un cuerpo electrizado. En este ejemplo, el plástico frotado es repelido por un péndulo con carga negativa, (a), y atraído por un péndulo con carga positiva, (b). Por lo tanto, concluimos que el plástico tiene carga negativa.

Al repetir este experimento con otras tiras de plástico frotadas con diferentes sustancias, observamos que se cargan de la siguiente manera: entre los dedos (negativamente), entre los tubos de PVC (positivamente), con el cabello (negativamente), entre los tubos de goma dura (positivamente).

Se trata del procedimiento que permite determinar el tipo de carga que adquirió un cuerpo al frotarse contra una determinada sustancia. Básicamente, debemos saber de antemano que un cuerpo *I* está cargado negativamente y que un cuerpo *II* está cargado positivamente. A continuación, acercamos el cuerpo de prueba al cuerpo *I* y también al cuerpo *II*. Cuando el cuerpo de prueba es repelido por *I* y atraído por *II*, se dice que tiene una carga negativa. Cuando es atraído por *I* y repelido por *II*, se dice que tiene una carga positiva. Este procedimiento se debe a Du Fay, aunque él utilizó los conceptos de electricidad vítrea y resinosa, en lugar de nuestras electricidades positiva y negativa:^{12,13}

¹²[DF33b, pp. 469–470].

¹³Pour juger donc quelle est l'espece d'électricité d'un corps quelconque, il n'y a qu'à le rendre électrique,

Por lo tanto, para determinar el tipo de electricidad de cualquier cuerpo, basta con electrizarlo y presentarle sucesivamente un trozo de vidrio y un trozo de ámbar: sin duda se verá atraído por uno y repelido por el otro; [...]

Este procedimiento se llevará a cabo de forma más sistemática en la sección 5.4.

Experimento 5.15

Ahora sabemos que cualquier sustancia puede cargarse positiva o negativamente, dependiendo de la sustancia utilizada para frotarla. Así, podemos repetir el experimento 5.1 de una manera más práctica, obteniendo resultados más visibles.

Una pajita de plástico adquiere una buena cantidad de carga negativa cuando se frota con cabello, piel o algodón. Por ensayo y error, se observa que adquiere una buena cantidad de carga positiva cuando se frota entre dos tubos de goma dura. Para cargar la pajita, cortamos dos trozos de este tubo. Colocamos un extremo de la pajita entre estos trozos bien comprimidos y la retiramos rápidamente de los tubos de goma. Una pajita de plástico también adquiere una buena cantidad de carga positiva cuando se frota de esta manera entre dos tubos de PVC.

Cargamos el disco de papel del péndulo *I* utilizando el mecanismo ACR por contacto con una pajita de plástico frotada con cabello. Tras el contacto, este péndulo es repelido por la pajita. Cargamos el disco de papel del péndulo *II* por contacto con una pajita de plástico frotada contra dos tubos de goma dura. Tras el contacto, este péndulo es repelido por la pajita.

Sin embargo, cuando acercamos lentamente esta última pajita frotada al péndulo *I*, sin dejar que entren en contacto, se produce una atracción entre ellos. Del mismo modo, cuando acercamos lentamente la primera pajita frotada al péndulo *II*, sin dejar que entren en contacto, se produce una atracción entre ellos.

La ventaja de este procedimiento con respecto al adoptado en el experimento 5.1 es que es más fácil y práctico adquirir una buena cantidad de carga positiva con una pajita de plástico frotada entre dos tubos de goma dura que con un vaso de vidrio (o un paño de seda) frotado contra un paño acrílico. En particular, es difícil electrizar los vasos modernos por fricción mientras se sostiene el vaso en la mano.

Experimento 5.16

El experimento 5.9 se puede reproducir más fácilmente utilizando dos pajitas de plástico frotadas con materiales diferentes (ya que un mismo objeto frotado con materiales diferentes adquiere cargas diferentes), en lugar de una pajita y un vaso frotados con el mismo material. También utilizamos una semilla de diente de león o unas hebras de algodón que tardan unos 10 segundos en caer desde una altura de 2 metros. Frotamos una pajita con el cabello para cargarla negativamente. Frotamos otra pajita contra dos tubos de goma dura para cargarla positivamente, como en el experimento 5.15. Estas dos pajitas se sostienen horizontalmente, pero separadas entre sí.

La semilla de diente de león se suelta sobre la pajita negativa. Es atraída por la pajita, la toca y luego es repelida (si no se aleja inmediatamente de la pajita, podemos

& lui présenter l'un après l'autre un morceau de verre & un morceau d'ambre, il sera certainement attiré par l'un, & repoussé par l'autre; [...]

soplar suavemente encima de ella). La semilla de diente de león adquiere una carga negativa por el mecanismo ACR. Entonces puede permanecer en suspensión encima de la pajita, como en el experimento 4.4, figura 5.22 (a).

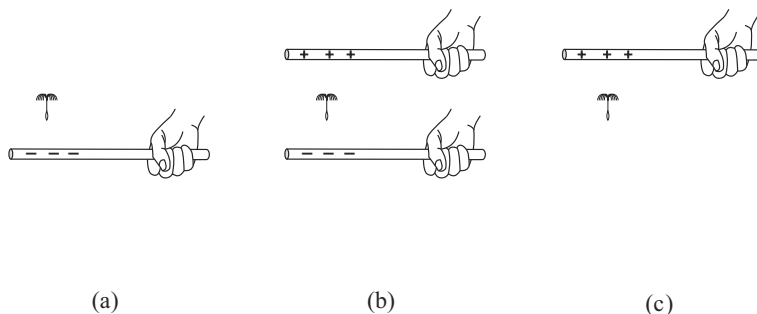


Figura 5.22: (a) Una semilla de diente de león negativa flotando encima de una pajita negativa. (b) La semilla negativa flotando entre una pajita negativa y una pajita positiva. (c) La semilla negativa flotando debajo de una pajita positiva.

Ahora acercamos lentamente la pajita positiva encima de la semilla de león. La segunda pajita debe permanecer siempre encima de la semilla, sin tocarla. En este caso, se producirá una atracción entre la semilla negativa y la segunda pajita positiva. La semilla negativa puede permanecer suspendida entre la pajita negativa inferior y la pajita positiva superior, como se muestra en la figura 5.22 (b). Este resultado solo se puede obtener evitando cualquier contacto entre la semilla negativa y la pajita positiva situada encima.

Es posible retirar la pajita negativa inferior y mantener la semilla de diente de león negativa en suspensión en el aire debajo de la pajita positiva, siempre que no se toquen, figura 5.22 (c). Con la práctica, se adquiere un buen dominio de este experimento. Cada vez que la semilla negativa se desplaza hacia la pajita positiva superior, debemos retirar rápidamente la pajita, pero manteniéndola siempre por encima de la semilla. De esta manera, la semilla puede permanecer suspendida debajo de la pajita, mientras oscila de arriba abajo, por debajo de ella.

Experimento 5.17

El experimento 5.15 también se puede realizar utilizando el versorio de Du Fay, sección 4.7. Construimos dos de estos versorios, *I* y *II*, comprobando siempre que estén bien descargados después de su construcción. Recuerde utilizar papel de aluminio en el extremo de una de las patas de cada versorio de Du Fay.

Para empezar, frotamos una pajita de plástico con el cabello para cargarla negativamente. A continuación, cargamos el versorio *I* mediante el mecanismo ACR, tal y como se describe en el experimento 4.12. Una vez que el papel de aluminio se libera de la pajita negativa, esta la repele. Frotamos otra pajita entre dos tubos de goma dura para cargarla positivamente. Cargamos el versorio *II* positivamente por contacto con esta pajita. Una vez que el papel de aluminio se separa de esta pajita, es repelido por ella.

Ahora acercamos lentamente la pajita negativa al versorio *II*, sin que entren en contacto. Observamos que el papel de aluminio es atraído por la pajita. Acercamos lentamente la pajita positiva al versorio *I*, sin que entren en contacto. Observamos que el papel de aluminio también es atraído por esta pajita.

Experimento 5.18

El experimento 5.14 también puede realizarse con dos versorios de Du Fay. El papel de aluminio del versorio *I* se carga negativamente mediante el mecanismo ACR, como en el experimento 5.17. Siguiendo el mismo procedimiento, el papel de aluminio del versorio *II* se carga positivamente. Se frota otra pajita de plástico contra una determinada sustancia. Tras este procedimiento, acercamos la parte frotada de esta pajita al versorio negativo *I*, sin permitir que ambos entren en contacto. Supongamos que se repelen, como en la figura 5.23.

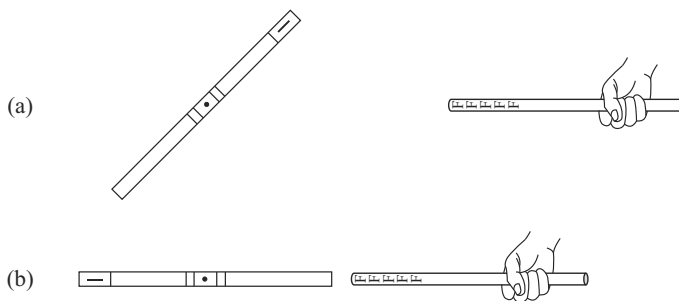


Figura 5.23: Papel de aluminio con carga negativa de un versorio de Du Fay repelido por un cuerpo electrizado que se aproxima a él.

Ahora movemos la parte frotada de esta pajita cerca del versorio positivo *II*, sin dejar que entren en contacto. Supongamos que se atraen, como en la figura 5.24. Dado que las cargas idénticas se repelen y las cargas opuestas se atraen, concluimos en este caso que la pajita se cargó negativamente por fricción. Se puede utilizar el mismo procedimiento para determinar el signo de la carga en otros materiales electrizados por fricción contra diferentes sustancias.

Du Fay creó este tipo de versorio como un instrumento práctico y sensible que permitía determinar el tipo de electricidad adquirida por objetos que absorben muy poca. Al principio, construyó un versorio de metal, pero luego se dio cuenta de que, para sus necesidades, sería mejor utilizar versorios de vidrio o cera. A continuación, describió un experimento similar al experimento 5.18:^{14,15}

¹⁴[DF33b, pp. 473–474].

¹⁵Il y a encore un moyen bien simple pour connoître le genre d'électricité d'un corps dans lequel cette vertu est très-foible, [...] J'épargnerai cependant au lecteur un détail ennuyeux & rebutant d'expériences manquées ou imparfaites, & je dirai seulement que pour réussir, il faut se servir d'une aiguille de verre posée sur un pivot de verre très-long, que cette aiguille porte à l'un de ses bouts une boule de métal creuse, & à l'autre un contre-poids de verre, qu'il faut bien sécher toutes ces pièces, & qu'alors il faut communiquer

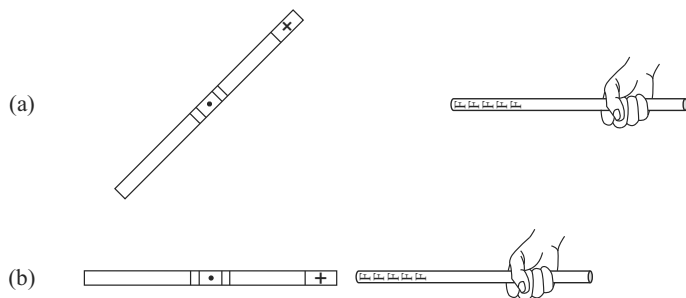


Figura 5.24: Papel de aluminio con carga positiva de un versorio de Du Fay atraído por un cuerpo electrizado que se acerca a él.

Hay otra forma muy sencilla de conocer el tipo de electricidad de un cuerpo en el que esta virtud es muy débil, [...] Sin embargo, le ahorraré al lector un detalle aburrido y desagradable sobre experimentos fallidos o imperfectos, y solo diré que, para tener éxito, hay que utilizar una aguja de vidrio colocada sobre un pivote de vidrio muy largo, que esta aguja lleva en uno de sus extremos una bola de metal hueca, y en el otro extremo un contrapeso de vidrio, que hay que secar bien todas estas piezas, y que entonces hay que comunicar la electricidad a la bola de metal con el tubo, o algún otro material similar, la bola será entonces atraída por los cuerpos cuya electricidad es resinosa, y repelida por aquellos que tienen electricidad vítrea.

5.4 La serie triboeléctrica

En este experimento, ilustramos cómo el procedimiento práctico del experimento 5.14 puede utilizarse con una gran variedad de sustancias frotadas contra diferentes materiales. Se utilizará un versorio metálico para comprobar si el cuerpo es neutro o está cargado. Al principio, tocamos el versorio con el dedo para descargarlo. A continuación, acercamos lentamente el cuerpo al versorio, sin tocarlo. Cuando el versorio permanece inmóvil, sin orientarse hacia el cuerpo, decimos que el cuerpo es neutro. Cuando el versorio se orienta hacia el cuerpo, decimos que el cuerpo está cargado.

Para comprobar la carga adquirida por los cuerpos frotados, utilizamos dos péndulos eléctricos cargados con electricidad opuesta. Estos dos péndulos se colocan a una distancia adecuada entre sí sobre la mesa. Antes de cargar los péndulos, tocamos el disco de papel de cada uno de ellos con el dedo. A continuación, los cargamos por contacto. Un procedimiento sencillo y eficaz consiste en frotar una pajita de plástico y acercarla a uno de los péndulos. El disco de papel es atraído por la pajita frotada, la toca y luego es repelido por ella, ya que adquiere una carga del mismo signo.

Según nuestra experiencia con este tipo de experimentos, sabemos que es fácil cargar un péndulo negativamente. Después de todo, una pajita de plástico adquiere una gran cantidad de carga negativa al frotarse contra varias sustancias: cabe-

l'électricité à la boule de métal avec le tube, ou quelque'autre matière analogue, la boule sera alors attirée par les corps dont l'électricité est résineuse, & repoussée par ceux qui ont l'électricité vitrée.

llo, algodón, papel, etc. Hay otros cuerpos que también adquieren una buena cantidad de electricidad negativa (la sustancia con la que se frotan entre paréntesis): tubo acrílico (hoja de papel, algodón, paño acrílico, cabello, poliamida sintética), tubo de goma dura (bolsa de plástico, tela acrílica, poliamida sintética, cabello, vidrio), tubo de PVC (piel humana, tela acrílica, poliamida sintética, vidrio), poliestireno (cabello), bolsa de plástico (cabello) y seda (cabello).

Es más difícil encontrar sustancias adecuadas que adquieran una gran cantidad de electricidad positiva por fricción. Para cargar una pajita de plástico con una gran cantidad de carga positiva, tuvimos que frotarla contra dos tubos de goma dura (o contra dos tubos de PVC), tirando rápidamente de ella entre los tubos comprimidos. Otros objetos también adquieren una buena cantidad de carga positiva (la sustancia con la que se frotan se indica entre paréntesis): el vidrio (pañó acrílico), la poliamida sintética (pañó acrílico) y la seda (pañó acrílico, tubos de goma dura, tubos acrílicos y tubos de PVC).

Para cargar ciertas sustancias con forma de hilo o alambre (cabello, hilo de algodón, hilo de poliamida sintética e hilo de poliéster), utilizamos el siguiente procedimiento. Primero se ataron a una pajita de plástico para evitar que se descargaran a través de nuestra mano después del roce, figura 5.25 (a). Para probar la carga adquirida por estos hilos frotados, no utilizamos los péndulos cargados descritos anteriormente. En su lugar, colocamos en soportes adecuados una pajita con carga negativa (frotada con cabello en toda su longitud) y una pajita con carga positiva (frotada entre dos tubos de goma dura en toda su longitud). El soporte puede ser idéntico al soporte del péndulo, figura 5.25 (b).

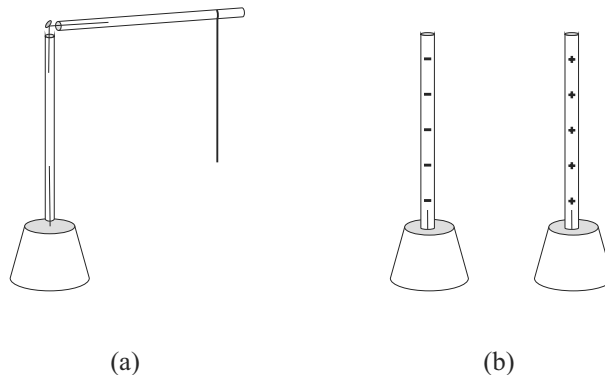


Figura 5.25: (a) Hilo atado a una pajita de plástico. (b) Pajitas de plástico polarizadas de forma opuesta.

El hilo frotado, atado a una pajita horizontal, se desplazó lentamente cerca de la pajita vertical cargada negativamente, sin tocarla. A continuación, se desplazó lentamente cerca de la pajita vertical cargada positivamente, sin tocarla. Observando la atracción y repulsión de este hilo con respecto a estas pajitas cargadas, podemos determinar la carga adquirida por fricción en este hilo.

Los objetos probados fueron los siguientes: piel humana seca, bolsa de plástico,

papel de seda, poliestireno, papel de aluminio, algodón, paño acrílico (véase el experimento 5.1), poliamida sintética, cabello, cuero, lana de acero, corcho, vidrio liso, tubo de goma dura, pajita de plástico, porcelana, tubo acrílico, tubo de PVC, cartón fino, madera y seda. Frotamos algunas sustancias con algodón hidrófilo o frotamos un hilo de algodón contra otros cuerpos. La poliamida sintética se utilizó en forma de media velada para frotar algunas sustancias. Algunas medias denominadas «de seda» están fabricadas en realidad con poliamida sintética. La poliamida sintética también es fácil de encontrar en los trajes de baño. Frotamos diferentes objetos con el cabello, pero también utilizamos un solo cabello humano atado a una pajita de plástico y lo frotamos contra otras sustancias. La madera utilizada en nuestros experimentos procedía de palitos para barbacoa vendidos en el comercio. No sabemos exactamente de qué tipo de árbol procede esta madera. Utilizamos un paño de seda para frotar algunas sustancias. También utilizamos un hilo de seda, que frotamos contra otros objetos. El vidrio utilizado aquí era muy liso.

El procedimiento adoptado en la mayoría de los casos fue el siguiente. Se cargó negativamente un péndulo tocando una pajita frotada con cabello. Otro péndulo se cargaba positivamente al entrar en contacto con una pajita frotada contra dos tubos de goma dura. Estos péndulos cargados se separaban espacialmente de manera que sus hilos colgaran verticalmente. Las pajitas frotadas también se separaban espacialmente y se mantenían verticalmente mediante soportes adecuados, con el fin de comprobar la carga adquirida por algunos hilos frotados.

Primero verificamos si ciertos objetos *I* y *II* estaban inicialmente descargados acercándolos a un versorio. Si era así, el objeto *I* se frotaba contra el objeto *II*. La idea era poder variar los dos objetos *I* y *II* para determinar la carga producida.

A continuación, comprobamos si el objeto *I* había recibido suficiente carga. Para ello, lo acercamos lentamente al versorio, para ver si este se orientaba en función de él. Si era así, el objeto cargado *I* se desplazaba lentamente cerca del péndulo cargado negativamente, sin contacto, y observábamos si el péndulo era atraído o repelido por este objeto. A continuación, el objeto *I* se acercó lentamente al péndulo cargado positivamente, sin contacto. Observamos si este segundo péndulo era atraído o repelido por el objeto *I*. Si se producía una atracción (repulsión) del péndulo con carga negativa y también una repulsión (atracción) del péndulo con carga positiva, concluíamos que el objeto *I* se había cargado positivamente (negativamente) al rozar con el objeto *II*.

Nos parece pertinente verificar si uno de los péndulos fue atraído o repelido por el objeto cargado, y si el otro péndulo fue repelido o atraído por ese objeto cargado. Esta precaución es necesaria para evitar cualquier duda sobre la carga adquirida por el objeto frotado. La razón de esta precaución es que la carga adquirida por fricción a menudo puede ser muy débil. Esto crea atracciones y repulsiones de baja intensidad entre este objeto frotado y los péndulos cargados, lo que dificulta la realización de observaciones precisas.

De vez en cuando, debemos tocar el versorio con el dedo para descargar cualquier electricidad residual que pueda haber acumulado. Además, también debemos recargar cada péndulo de vez en cuando, ya que su electricidad disminuye con el tiempo. En cuanto a los objetos de plástico o resina, no debemos frotar el mismo objeto contra más de una sustancia. La razón de esta precaución es que, a veces, la carga adquirida durante el primer frotamiento permanece en el cuerpo de plástico o resina. En-

tonces, es difícil saber con claridad qué tipo de electricidad se adquirió al frotar con la segunda sustancia. Para comprobar la carga adquirida por una pajita de plástico, por ejemplo, debemos utilizar una pajita nueva para cada sustancia contra la que la vamos a frotar. Además, antes de frotar la pajita, siempre es conveniente comprobar si realmente es neutra.

Para frotar la pajita de plástico contra sustancias duras, fijamos uno de sus extremos entre ellas (entre dos trozos de poliestireno, entre dos tapones de corcho, etc.). Tras este procedimiento, retiramos rápidamente la pajita de estos dos objetos, desplazándola en toda su longitud entre ellos.

En el caso del vidrio, el cuero, la porcelana, la madera y el papel, debemos tener especial cuidado antes de manipularlos con las manos. Solo pueden adquirir y mantener una buena cantidad de carga si, antes de someterse a la fricción, se han secado y, preferiblemente, se han calentado. Los calentamos en el microondas, pero también es posible calentarlos con un fósforo.

En general, frotamos el cuerpo *I* contra el cuerpo *II*. En la medida de lo posible, probamos las dos cargas, la del cuerpo *I* y la del cuerpo *II*. Pero no siempre fue posible. En algunos casos, uno de estos cuerpos no conservaba ninguna carga generada por el frotamiento. Normalmente, este cuerpo se descarga al entrar en contacto con nuestra mano, como ocurre con la lana de acero, el algodón o una hoja de papel. Si era así, probábamos únicamente la carga conservada por el otro cuerpo.

Tras seguir estos procedimientos y realizar los experimentos, obtuvimos el resultado que se presenta en la tabla 5.1.

Definición: Una lista como la tabla 5.1 se denomina «serie triboeléctrica». El prefijo «tribo» proviene del griego y significa fricción o acción de frotar. Una serie triboeléctrica indica los tipos de electrización obtenidos por fricción.

Esta tabla debe interpretarse de la siguiente manera: cuando frotamos el cuerpo *I* contra el cuerpo *II*, el que se carga positivamente será el que se encuentra encima del otro. En otras palabras, el cuerpo más cercano al símbolo + se cargará positivamente, mientras que el otro se cargará negativamente. Por ejemplo, cuando se frota la pajita de plástico contra la seda, la seda se cargará positivamente y el plástico negativamente.

No incluimos la lana de acero en esta tabla, ya que era difícil que un cuerpo adquiriera una fuerte carga eléctrica al frotarse contra ella. Los cuerpos que se cargaron negativamente fueron la pajita de plástico, el tubo de acrílico, el caucho duro, el tubo de PVC, el poliestireno y la bolsa de plástico. Por el contrario, un solo cabello humano se cargó positivamente al frotarse contra la lana de acero. El vidrio, la madera, la porcelana, el paño acrílico, la poliamida sintética y la seda no adquirieron una carga perceptible.

Esta serie triboeléctrica no coincide con otras series triboeléctricas que se encuentran en la literatura. También es habitual encontrar en la literatura dos o más series triboeléctricas diferentes entre sí, incluso incluyendo los mismos cuerpos en un orden diferente. Hay buenas razones para esta divergencia de resultados. Existen muchos tipos de vidrio, fabricados con diferentes materiales y mediante diversos procesos de fabricación. Estos aspectos sin duda influyen en su capacidad para adquirir cargas positivas o negativas por fricción. Por ejemplo, algunos tipos de vidrio se cargaron

Tabla 5.1: Serie triboeléctrica.

+
cabello
vidrio liso
piel humana
poliamida sintética
algodón
seda
papel o cartón fino
cuero
porcelana
papel de aluminio
madera
corcho
pañó acrílico
poliestireno
bolsa de plástico
pajita de plástico
acrílico rígido
tubo de PVC
caucho duro
—

positivamente después de frotarlos con la mano, mientras que otros se cargaron negativamente. La misma diversidad de materiales y procesos de fabricación existe para otras sustancias (plástico, papel, caucho, etc.). Los colorantes utilizados en la seda y en otros tejidos o hilos también pueden influir en sus propiedades. La madera procedente de diferentes árboles puede tener propiedades diferentes. El cabello y la piel humanos pueden ser más o menos grasos, y también pueden estar impregnados de champús, cremas y otras sustancias.

Cualquier persona que realice estos experimentos debería intentar construir su propia serie triboeléctrica, utilizando los materiales disponibles.

En la sección 5.3, vimos cómo, en 1733, Du Fay frotó seda, plumones y lana contra seda y contra su mano. Descubrió que cada uno de estos cuerpos siempre se cargaba con electricidad del mismo tipo, independientemente del material contra el que se frotara. Desde entonces, se detectaron algunas anomalías. John Canton (1712–1772), en particular, descubrió que el vidrio rugoso (sin pulir) podía cargarse positivamente frotándolo con franela, o negativamente frotándolo con seda aceitada.¹⁶ Estas investigaciones fueron continuadas por Johan Carl Wilcke (1732–1796), quien publicó en 1757

¹⁶[Can53b].

la primera serie triboeléctrica, a saber:¹⁷ vidrio liso, lana, plumas, madera, papel, cera para sellos, cera blanca, vidrio rugoso, plomo, azufre y metales distintos del plomo. En 1759, Benjamin Wilson (1721–1788) publicó otra serie, probablemente obtenida independientemente de Wilcke, a saber:¹⁸ diamante, turmalina, vidrio, ámbar. Estas son las primeras series triboeléctricas jamás publicadas.

5.5 ¿Son igual de frecuentes las atracciones y las repulsiones?

Experimento 5.19

En la sección 5.4, vimos cómo cargar positiva y negativamente una pajita de plástico. Cargamos una de estas pajitas negativamente por fricción y repetimos el experimento 4.10. Es decir, primero tocamos el disco de papel del péndulo con el dedo. A continuación, acercamos la pajita negativa al péndulo. El disco de papel es atraído por la pajita, la toca y luego es repelido por ella. Cuando tocamos el disco de papel con el dedo, se descarga. Entonces podemos repetir todo el procedimiento.

El mismo experimento debe realizarse con una pajita cargada positivamente. Al principio, descargamos el péndulo cuando tocamos el disco de papel con el dedo. Cuando acercamos la pajita positiva al disco, este es atraído por la pajita, la toca y luego es repelido. Cuando tocamos el disco de papel, se descarga. A continuación, se puede repetir todo el procedimiento.

Experimento 5.20

Ahora realizamos experimentos similares a los experimentos 5.1 y 5.15. Cargamos el péndulo *I* negativamente mediante el método ACR, como en los experimentos 4.7 y 5.19. Cargamos el péndulo *II* positivamente mediante el método ACR, como en el experimento 5.20. Acercamos lentamente la pajita negativa al péndulo *I* cargado negativamente, observando la repulsión del péndulo. Ahora acercamos la pajita negativa al péndulo *II* cargado positivamente, sin que entren en contacto. Observamos una atracción del péndulo. Acercamos lentamente la pajita positiva al péndulo *II* cargado positivamente, observando que el péndulo es repelido. Ahora acercamos la pajita positiva al péndulo *I* cargado negativamente, sin que entren en contacto. El péndulo es atraído por la pajita.

Experimento 5.21

Ahora realizamos experimentos similares al experimento 4.8. Se carga negativamente un péndulo mediante el método ACR. Para cargarlo negativamente, se acerca al péndulo una pajita frotada con cabello, como en los experimentos 5.1 y 5.15. Una vez que el disco de papel es repelido por la pajita frotada, retiramos la pajita. A continuación, acercamos lentamente nuestro dedo al disco de papel, sin tocarlo. El péndulo es atraído por el dedo.

¹⁷[Hei99, pp. 387–388].

¹⁸[Wil59] y [Hei99, pp. 387–388].

Se repite el mismo procedimiento con un péndulo cargado positivamente. Se puede obtener una carga positiva cuando acercamos una pajita frotada entre dos tubos de goma dura a un péndulo neutro. Una vez que el disco de papel es repelido por esta pajita frotada, retiramos la pajita. A continuación, acercamos lentamente nuestro dedo al péndulo, sin tocarlo. Una vez más, el péndulo es atraído por el dedo.

El experimento 5.20 muestra una vez más que un cuerpo con carga negativa *I* repele a otro cuerpo con carga negativa *II*. Lo mismo ocurre con dos cuerpos con carga positiva. Por el contrario, si el cuerpo *I* está cargado negativamente y el cuerpo *II* está cargado positivamente, se atraen mutuamente. Lo mismo ocurre si *I* es positivo y *II* es negativo.

Por lo tanto, observamos dos atracciones y dos repulsiones. Esto podría indicar que ambos fenómenos son igualmente frecuentes. Sin embargo, como muestran los experimentos 5.19 y 5.21, un cuerpo cargado normalmente atrae a un cuerpo neutro, independientemente de si el cuerpo cargado es positivo o negativo. Y un cuerpo neutro como nuestro dedo atrae no solo a un cuerpo positivo, sino también a un cuerpo negativo. Esto demuestra que las atracciones son mucho más frecuentes o comunes que las repulsiones, ya que la mayoría de los cuerpos son macroscópicamente neutros. Cuando cargamos un determinado cuerpo, este tenderá a atraer a casi todos los cuerpos que lo rodean, aunque esta atracción puede ser de muy baja intensidad, difícil de detectar u observar. Este cuerpo cargado solo tratará de repeler a otros cuerpos que tengan una carga neta del mismo signo. Si el segundo cuerpo tiene una carga de signo opuesto al primero, o si el segundo cuerpo es neutro, habrá una atracción entre ellos.

En conclusión, podemos decir que estos experimentos ilustran el hecho de que las atracciones eléctricas son mucho más comunes que las repulsiones eléctricas, ya que ocurren con mucha más frecuencia.

En la sección 7.10, discutiremos la fuerza de interacción entre dos cuerpos electrizados con cargas del mismo signo.

5.6 Variación de la fuerza eléctrica en función de la distancia

Desde el experimento más antiguo en electrostática, el experimento 2.1, se sabe que la atracción ejercida por un cuerpo cargado sobre un cuerpo pequeño y ligero depende de la distancia que los separa. Después de todo, los cuerpos ligeros solo son visiblemente atraídos por un cuerpo frotado cuando la distancia entre ellos es pequeña. Cuando la distancia entre estos dos cuerpos es muy grande, esta atracción no es fácilmente detectable. Lo mismo ocurre con los experimentos con el versorio, como el experimento 3.1. De hecho, solo cuando el plástico frotado se acerca al versorio, este se orienta hacia el plástico. Lo mismo ocurre con todos los demás experimentos descritos hasta ahora, ya que los efectos solo se producen cuando la distancia entre los cuerpos que interactúan es pequeña.

Estos efectos también se pueden observar en las atracciones y repulsiones entre cuerpos cargados. Ilustremos este hecho con un péndulo eléctrico.

Experimento 5.22

Un péndulo eléctrico I se carga negativamente mediante el método *ACR*, como en los experimentos 5.1 y 5.15. Tras este procedimiento, retiramos la pajita negativa que lo cargó por contacto. En esta situación, el hilo del péndulo vuelve a la vertical. Cargamos otra pajita positivamente frotándola entre dos tubos de goma dura. Acercamos lentamente la pajita positiva al péndulo negativo, sin que entren en contacto, hasta que podemos detectar su atracción, como lo demuestra la inclinación del hilo con respecto a la vertical. La pajita horizontal debe estar a la misma altura que el disco de papel y el extremo de la pajita frotada. Observamos que la disminución de esta distancia aumenta el ángulo de inclinación del hilo con respecto a la vertical, figura 5.26. Esto demuestra que la fuerza de atracción entre cuerpos electrizados con cargas opuestas aumenta cuando disminuye la distancia entre los cuerpos en interacción. En este experimento, la fuerza se indica mediante el ángulo de inclinación del péndulo con respecto a la vertical.

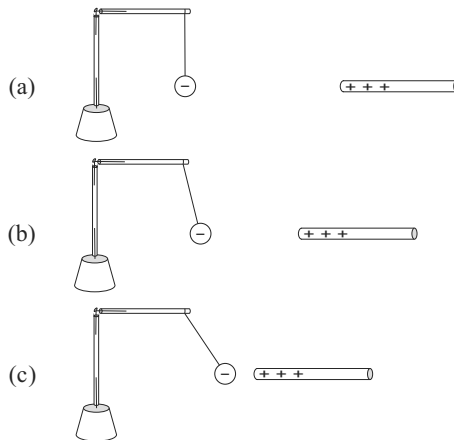


Figura 5.26: Al reducir la distancia entre el disco de papel negativo y el extremo positivo de la pajita frotada, aumentamos la fuerza de atracción entre ambos.

Experimento 5.23

Un péndulo eléctrico I se carga negativamente mediante el método *ACR*, como en los experimentos 5.1 y 5.15. Tras este procedimiento, retiramos la pajita negativa que lo cargó por contacto. En esta situación, el hilo del péndulo vuelve a la vertical. Ahora acercamos lentamente la pajita frotada negativamente al péndulo cargado hasta la distancia en la que la repulsión comienza a ser visible, como lo indica la desviación del péndulo con respecto a la vertical. La pajita debe mantenerse en posición horizontal y a la misma altura que el disco de papel, y acercarse a este por el lado. A continuación, reducimos lentamente la distancia entre el disco de papel y el extremo frotado de la pajita. Observamos que, a medida que esta distancia disminuye, el ángulo de

inclinación del hilo con respecto a la vertical aumenta, como se muestra en la figura 5.27. Esto indica una fuerza de repulsión creciente a medida que disminuye la distancia entre los cuerpos en interacción.

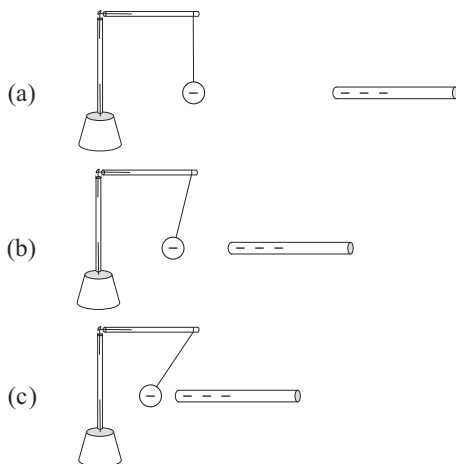


Figura 5.27: Al reducir la distancia entre el disco de papel negativo y el extremo negativo de la pajita frotada, aumentamos la fuerza repulsiva entre ellos.

En este experimento, la pajita frotada no debe acercarse demasiado al péndulo electrizado. De hecho, en algunas situaciones, pueden atraerse mutuamente cuando la distancia entre ellos es demasiado pequeña. Este fenómeno se abordará en la sección 7.10.

5.7 Variación de la fuerza eléctrica con la cantidad de carga

Hasta ahora, no nos molestamos en medir la cantidad de electricidad (o la amplitud de la carga eléctrica). Normalmente, esto se hace utilizando el concepto de fuerza eléctrica.

Sean A , B y C tres cuerpos cuyos tamaños son pequeños en comparación con la distancia que los separa. Consideraremos que los cuerpos A y B están electrizados (por fricción o por el mecanismo ACR). Denominamos F_{AC} a la fuerza entre A y C cuando están separados por la distancia d , estando el cuerpo B alejado de estos dos cuerpos. Denominamos F_{BC} a la fuerza entre B y C cuando estos dos cuerpos están separados por la distancia d , estando A alejado de estos dos cuerpos.

Definiciones: Se dice que la magnitud de la carga A es igual a la magnitud de la carga B cuando $F_{AC} = F_{BC}$. Si F_{AC} es mayor que F_{BC} , entonces decimos que la magnitud de la carga A es mayor que la magnitud de la carga B . Si F_{AC} es menor que F_{BC} , entonces decimos que la magnitud de la carga A es menor que la magnitud de la carga B .

La intensidad de la fuerza se puede medir de diferentes maneras. Aquí consideramos situaciones en las que las distancias son siempre las mismas. En el experimento 2.1, por ejemplo, cuanto más papel recoge la pajita, mayor es la fuerza que ejerce sobre él. En el experimento 2.8, la intensidad de la fuerza se indica mediante la curvatura del chorro de líquido que cae. En el experimento 4.1, la intensidad de la fuerza se indica mediante el ángulo de apertura entre las tiras de plástico electrizadas. En los experimentos con el péndulo eléctrico, como en el experimento 4.5, la intensidad de la fuerza se indica mediante el ángulo entre el péndulo y la vertical. En los experimentos con el hilo plástico pendular, la intensidad de la fuerza se indica mediante el ángulo de apertura entre las tiras de plástico, como en el experimento 5.11.

Por ejemplo, dadas dos pajitas de plástico electrizadas A y B , definimos que la pajita más electrizada es aquella que, a igual distancia de la mesa o del chorro de líquido, atrae más trozos de papel o provoca la mayor curvatura del líquido que cae, figura 5.28. El cuerpo C en este caso es un trozo de papel o el chorro de agua. La pajita más electrizada será también aquella que, a igual distancia de un péndulo eléctrico, provoque una mayor inclinación del péndulo con respecto a la vertical. La misma definición puede aplicarse a los demás experimentos descritos en este libro.

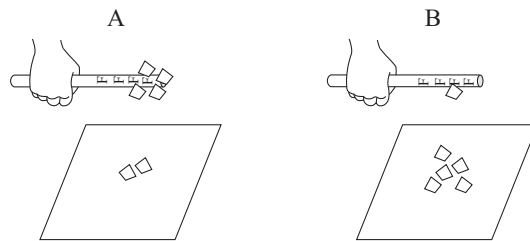


Figura 5.28: Las pajitas A y B están a la misma distancia de una mesa. La pajita A está más electrizada que B porque atrae más trozos de papel.

En la sección 5.6, vimos que la intensidad de la fuerza aumenta cuando disminuye la distancia entre los cuerpos que interactúan. Esto sugiere otro procedimiento para medir la electrización de un cuerpo. Definimos que la cantidad de carga de un cuerpo viene indicada por la distancia a la que su fuerza eléctrica crea efectos visibles. Por ejemplo, supongamos que tenemos dos pajitas de plástico electrizadas A y B del mismo tamaño. Supongamos que A comienza a atraer trozos de papel a una distancia de 15 cm de una mesa, mientras que para B , esta atracción solo comienza a una distancia de 5 cm de la mesa. En este caso, definimos que A está más electrizada que B , es decir, que A tiene una mayor cantidad de carga eléctrica que B , figura 5.29.

Los demás efectos también comenzarán a observarse o detectarse a una mayor distancia para A que para B . Por ejemplo, consideremos que el cuerpo A provoca la curvatura del chorro de agua (o del péndulo eléctrico) cuando se encuentra a una distancia d_1 del agua que cae (o del péndulo). Para el cuerpo B , la distancia equivalente será d_2 . Cuando A está más electrizado que B , entonces $d_1 > d_2$.

En conclusión, por definición, la fuerza eléctrica aumenta con la cantidad de carga. A continuación, presentamos algunos experimentos sencillos pero no triviales.

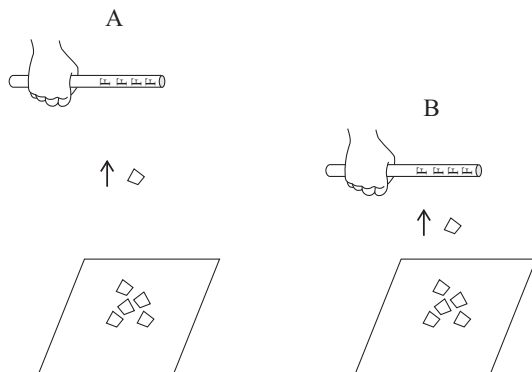


Figura 5.29: La pajita A está más electrizada que la pajita B , ya que comienza a atraer los trozos de papel a una mayor distancia de la mesa.

Experimento 5.24

Elegimos dos pajitas de plástico electrizadas por fricción. Colocamos una de ellas horizontalmente, paralela a una mesa sobre la que hay muchos trozos de papel. Supongamos que atrae N trozos de papel cuando se encuentra a una distancia d de la mesa. Supongamos que la segunda pajita electrizada también atrae aproximadamente N trozos de papel cuando se encuentra a la misma distancia d de la mesa. Según la definición anterior de la sección 5.7, concluimos que tienen la misma cantidad de carga.

A continuación, alejamos las pajitas de la mesa. Las unimos una al lado de la otra, horizontalmente. Las acercamos juntas a la mesa hasta que se encuentran a la misma distancia d de la mesa que antes. Observamos que juntas atraen un mayor número de trozos de papel que cada una de ellas por separado.

Cuando unimos tres o cuatro pajitas igualmente electrizadas, el número de trozos de papel atraídos aumenta aún más a la misma distancia de la mesa.

Experimento 5.25

Imaginemos que tenemos dos pajitas de plástico que fueron electrizadas uniformemente por fricción en toda su longitud. Supongamos que tienen aproximadamente las mismas cargas eléctricas, como se indica en la definición anterior. Cargamos un péndulo eléctrico según el método *ACR* dejándolo tocar una de las pajitas electrizadas. Tras este procedimiento, el péndulo comienza a ser repelido por la pajita. Retiramos la pajita y el péndulo electrizado vuelve a la posición vertical. Colocamos la pajita horizontalmente a la misma altura que el disco del péndulo. Supongamos que el péndulo está inclinado en un ángulo θ con respecto a la vertical cuando el extremo más cercano a la pajita se encuentra a una distancia d de la proyección vertical que pasa por el soporte del péndulo, como se muestra en la figura 5.30 (a).

Unimos las dos pajitas frotadas y las colocamos a la misma distancia d del péndulo eléctrico cargado. Observamos que el péndulo se desvía en un ángulo superior a θ con

respecto a la vertical, como se muestra en la figura 5.30 (b). Este hecho experimental, junto con la definición anterior, muestra que dos cuerpos de igual carga, cuando se colocan juntos, tienen una carga mayor que cada uno de estos cuerpos por separado.

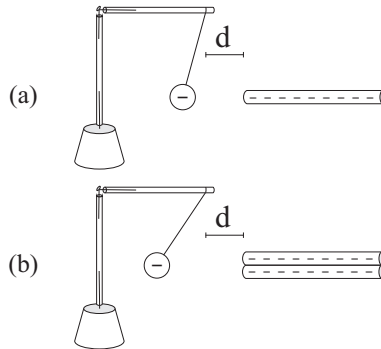


Figura 5.30: (a) La fuerza ejercida sobre un péndulo cargado por una pajita cargada es inferior a (b) la fuerza ejercida sobre el mismo péndulo por dos pajitas de igual carga, situadas a la misma distancia de la vertical que pasa por el punto de apoyo del hilo.

Cuando unimos tres pajitas cargadas por igual, observamos que el ángulo de inclinación del péndulo aumenta aún más. Esto indica un nuevo aumento de la fuerza.

Definición: Estas observaciones permiten una nueva definición. Supongamos que tenemos N cuerpos igualmente electrizados con cargas del mismo signo. Supongamos que reunimos estos N cuerpos cargados en un solo conjunto. Definimos la cantidad de carga de este conjunto como igual a N veces la cantidad de carga de un solo cuerpo.

Aunque esta definición es muy simple, no es trivial. Lo ilustramos con un ejemplo. El nivel de un termómetro de mercurio puede definirse como un indicador de la temperatura de un cuerpo. Por ejemplo, podemos definir que dos cuerpos A y B tienen la misma temperatura si el nivel de este termómetro conectado a A es igual al nivel de este termómetro conectado a B . Cuando el nivel del termómetro es más alto (más bajo) para A que para B , definimos que A tiene una temperatura más alta (más baja) que B . Sin embargo, un sencillo experimento demuestra que cuando unimos los dos cuerpos A y B , de manera que se toquen, el nivel del termómetro no cambia. Debido a experimentos como este, no definimos la temperatura de un conjunto AB (es decir, con A y B juntos en contacto entre sí) como el doble de la temperatura de A .

En lo que respecta a los pesos y las cargas eléctricas, numerosos experimentos demuestran que cuando reunimos N cuerpos con la misma propiedad, los efectos gravitacionales y eléctricos producidos por estos N cuerpos serán superiores al efecto producido por uno solo de estos cuerpos. Experimentos como estos conducen a la definición anterior. En otras palabras, experimentos como estos hacen que la definición anterior sea razonable.

Experimento 5.26

Atamos los extremos de dos trozos de pajita de plástico de la misma longitud y peso con un pequeño hilo de seda. Podemos fabricar dos o tres conjuntos de este tipo. Frotamos cada conjunto con el cabello, pero en algunos conjuntos esta fricción es más rápida e intensa. Cuando acercamos cada uno de estos conjuntos a un péndulo con carga negativa, observamos que cada uno de ellos inclina el péndulo en un ángulo diferente, incluso cuando todos se encuentran a la misma distancia de la vertical que pasa por el punto de apoyo del hilo del péndulo. Esto nos indica que cada sistema tiene una cantidad de carga eléctrica diferente, figura 5.31.

Cada sistema puede colgarse de un soporte horizontal (como un lápiz) con ayuda del hilo de seda. Observamos que las pajitas no permanecen verticales, sino que se repelen entre sí. Además, el sistema que repelió con más fuerza el péndulo cargado es también aquel en el que las dos pajitas se inclinan más con respecto a la vertical, figura 5.32. Dado que las pajitas de todos los sistemas tienen el mismo peso, esto demuestra una vez más que al aumentar la carga que contienen, aumentamos la fuerza eléctrica entre ellas.

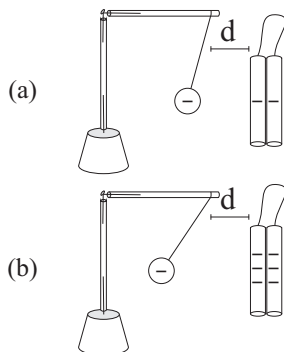


Figura 5.31: Cuerpos con cargas diferentes. Los plásticos en (b) tienen una carga eléctrica mayor que los plásticos en (a).

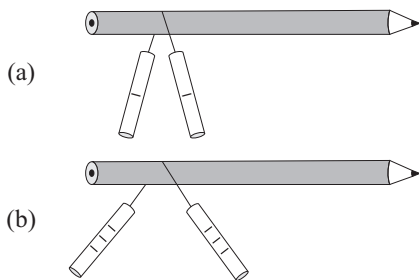


Figura 5.32: Al aumentar la cantidad de carga en cada par de pajitas, aumentamos la fuerza entre las pajitas cargadas de cada par.

Capítulo 6

Conductores y aislantes

6.1 El electroscopio

Ya construimos un versorio y un péndulo eléctrico. Ahora vamos a construir otro instrumento, el «electroscopio». Existen varios tipos, de los cuales solo presentaremos algunos aquí. El versorio y el péndulo eléctrico también se denominan a veces electroscopios, ya que indican la presencia de cuerpos cargados en las proximidades. Pero en esta obra, reservaremos el nombre de electroscopio para el instrumento descrito en esta sección, y también abordaremos las propiedades que lo distinguen de los instrumentos anteriores.

El modelo más sencillo es quizás el de cartón fino. Recortamos un rectángulo de 7 cm por 10 cm, con el lado más largo en vertical, figuras 6.1 y 6.2. Fijamos el rectángulo a una pajita de plástico con dos trozos de cinta adhesiva. La cinta debe aplicarse en la parte posterior del rectángulo, sin sobresalir de los bordes. El extremo superior de la pajita debe quedar cerca del borde superior del rectángulo, sin sobrepasarlo.

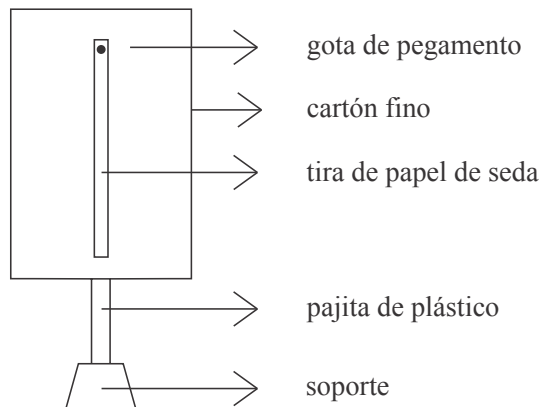


Figura 6.1: Electroscopio visto de frente.

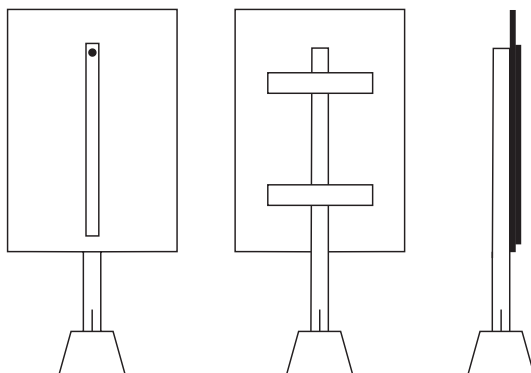


Figura 6.2: (a) Electroscopio visto de frente. (b) Vista trasera. (c) Vista de perfil.

Cortamos una tira muy pequeña de papel de seda, de aproximadamente 1 a 3 mm de ancho y 6 a 9 cm de largo. Los efectos descritos en este capítulo son más visibles cuando se utiliza una tira muy fina y ligera. Este papel de seda puede ser el que se utiliza para fabricar cometas o para envolver regalos frágiles. Pegamos el extremo superior de esta tira en el centro de la parte superior del rectángulo. La tira no debe estar doblada y no debe sobresalir del borde inferior del rectángulo. En lugar de pegamento, también podemos fijarla con un pequeño trozo de cinta adhesiva, siempre que esta no sobresalga del borde del rectángulo.

Preparamos un soporte para el electroscopio, como el que se muestra en la sección 4.4. *El aspecto crucial del electroscopio es que debe estar provisto de una pajita de plástico como soporte para el cartón.* En otras palabras, el cartón no debe fijarse, por ejemplo, a un palito de madera o metal. A continuación, se coloca la pajita de plástico en el tensor de papel del soporte. Si el rectángulo no se mantiene en posición vertical, podemos unir dos pajitas, una dentro de la otra, para hacerlo más rígido. En la sección 6.5, presentaremos los componentes fundamentales de un electroscopio como este, después de utilizarlo para realizar varios experimentos.

También existen otros modelos de electroscopios. Podemos cubrir el cartón rectangular fino con papel de aluminio y, en lugar de papel de seda, también podemos utilizar papel de aluminio. Además, en lugar de pegar el papel de seda o fijarlo con cinta adhesiva, también podemos utilizar un pequeño gancho metálico fijado al rectángulo. A continuación, hacemos un pequeño agujero con un alfiler en la parte superior de la tira y la fijamos al gancho. Los rectángulos también pueden tener otras dimensiones, por ejemplo, 2 cm por 8 cm. Las dimensiones de 7 cm por 10 cm utilizadas aquí son prácticas para algunos de los experimentos descritos en este trabajo, ya que 7 cm es un poco más grande que el diámetro del vaso de plástico utilizado como soporte.

Algunos electroscopios tienen una tapa superior, aunque no es imprescindible para el éxito de la mayoría de los experimentos aquí descritos. Normalmente, esta tapa es un disco de cartón fino cuyo diámetro es igual al lado del rectángulo (en nuestro ejemplo, esto significaría un disco de 7 cm de diámetro). También podemos cubrir este disco superior con papel de aluminio, pero, de nuevo, esto no es imprescindible. Para fijar el

disco superior al rectángulo, tenemos varias posibilidades. (a) La opción más sencilla consiste en doblar la banda superior horizontalmente sobre el rectángulo (0.5 o 1 cm de ancho y 7 cm de largo). A continuación, se pega el disco sobre esta banda. (b) Otra forma de fijar el disco superior consiste en perforar un agujero en su centro. Una pata de un tensor de papel pasa verticalmente a través de este agujero y se fija al interior de la pajita de plástico vertical que sujeta el rectángulo. La segunda pata del tensor de papel debe colocarse horizontalmente alrededor del disco y fijarse al interior de un segundo agujero perforado en un lugar adecuado del disco.

El electroscopio descrito en la figura 6.2 está compuesto por una sola tira móvil, con el rectángulo fijado al soporte. Otro modelo común de electroscopio tiene dos tiras móviles, o dos hojas móviles. Este es el modelo que aparece en la mayoría de los manuales de electricidad. La forma más sencilla de fabricar un electroscopio de este tipo es pegar los extremos superiores de dos tiras de papel de seda al borde inferior de un rectángulo. La figura 6.3 muestra un electroscopio de este tipo. Una vez más, el rectángulo de cartón fino se fija a una pajita de plástico con dos trozos de cinta adhesiva en la parte posterior. En la parte inferior izquierda del electroscopio, pegamos los extremos superiores de dos tiras de papel de seda (o dos tiras finas de papel de aluminio). Deben tener la misma longitud y sus extremos inferiores deben poder separarse libremente entre sí. Podemos llamar a este modelo «electroscopio clásico». Si lo deseamos, también podemos pegar algunos pares de tiras adicionales a lo largo del borde inferior del rectángulo.

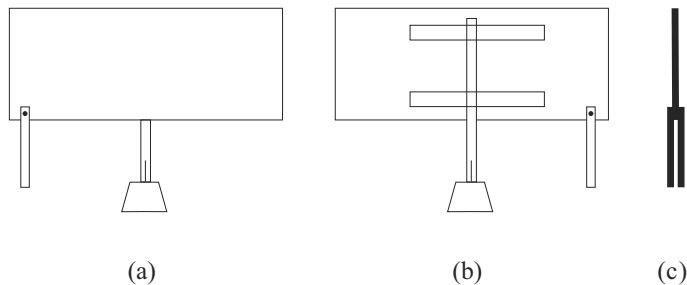


Figura 6.3: (a) Electroscopio clásico visto desde delante. (b) Vista trasera. (c) Vista de perfil, mostrando solo el cartón fino y las dos tiras.

También podemos fabricar un electroscopio clásico doblando una tira de papel de seda por la mitad. A continuación, sostenemos la tira por el centro con un soporte horizontal rígido, como un alambre metálico. Las dos mitades de la tira quedan entonces suspendidas una al lado de la otra, con los extremos inferiores separados entre sí. El alambre metálico debe sostenerse por la parte inferior con pajitas de plástico o por la parte superior con hilos de seda.

El modelo más refinado del electroscopio clásico está fabricado con dos hojas de oro. Suele estar rodeado por una cubierta de vidrio para evitar las perturbaciones causadas por el flujo de aire.

6.2 Experimentos con el electroscope

Experimento 6.1

Frotamos una pajita de plástico con el cabello y la acercamos lentamente a la parte superior del electroscope, sin tocarlo. La tira se aleja del electroscope. Cuando retiramos la pajita, la tira recupera su orientación vertical inicial a lo largo del cartón fino, figura 6.4.

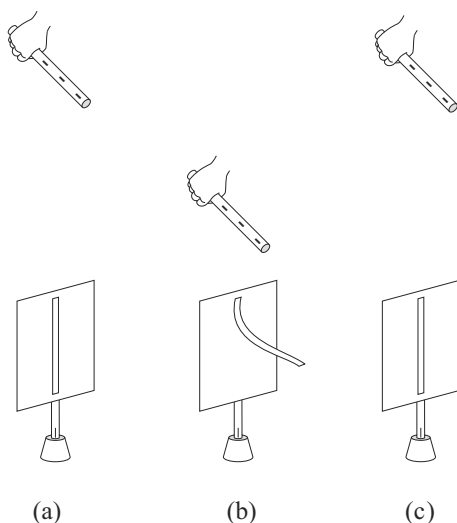


Figura 6.4: (a) y (b): Cuando acercamos un plástico cargado al electroscope, sin tocarlo, la tira se eleva. (c) Cuando alejamos el plástico cargado, la tira desciende.

Experimento 6.2

Repetimos el experimento 6.1, pero esta vez raspamos la pajita por el borde superior del electroscope. Lo ideal es tocar el cartón fino con la parte de la pajita frotada que está cerca de los dedos que la sujetan. A continuación, raspamos la pajita alejándola del rectángulo. La pajita debe rasparse hacia la parte posterior del rectángulo, y no hacia la tira. Este procedimiento puede repetirse una o varias veces, girando la pajita mientras se raspa, si es posible. Para facilitar el raspado, podemos fijar el electroscope sujetando su pajita de plástico en posición vertical. Sin embargo, nunca debemos tocar el rectángulo, que es de cartón fino, ni la tira de papel. Observamos que la tira se aleja del electroscope cuando se frota.

Ahora alejamos la pajita frotada del electroscope. En este caso, observamos que la tira permanece levantada, alejada del rectángulo, figura 6.5.

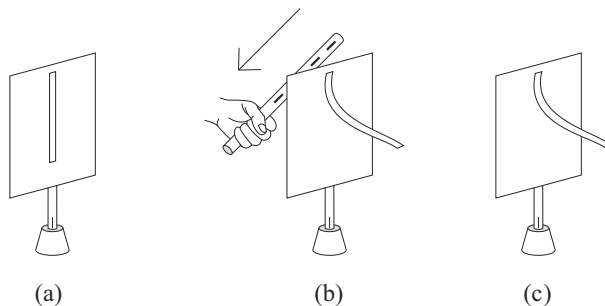


Figura 6.5: (a) Electroscopio con la tira orientada hacia abajo. (b) Raspamos el borde superior del rectángulo con una pajita frotada. (c) Cuando se retira la pajita, ¡la tira permanece alejada del electroscopio!

Experimento 6.3

Después de realizar el experimento 6.2 y retirar la pajita frotada, la tira permanece alejada del electroscopio. Cuando acercamos lentamente nuestro dedo lateralmente al extremo inferior de esta tira, sin que entren en contacto, observamos que la tira es atraída por el dedo y se desplaza.

Según lo que vimos en la sección 3.5, esto significa que el electroscopio se cargó eléctricamente gracias al procedimiento del experimento 6.2. Se cargó raspando un plástico frotado sobre su borde. Este experimento es análogo al experimento 4.7.

Pero ahora tenemos algo nuevo. Cuando cargamos un péndulo eléctrico mediante el método ACR, el péndulo fue repelido por el plástico frotado cuando acercamos el plástico al péndulo. Sin embargo, cuando retiramos el plástico frotado, el hilo del péndulo volvió a la vertical, aunque el péndulo siguió cargado. Si no hubiéramos visto este experimento, observando el péndulo vertical, no sabríamos si el péndulo estaba cargado o no. Para comprobar esta condición, podríamos acercar nuestro dedo al disco de papel del péndulo, sin tocarlo. Si el péndulo no se moviera, eso indicaría que era neutro. Por el contrario, si el péndulo se orientara hacia el dedo, sabríamos que fue cargado por algún mecanismo. Para conocer el signo de esta carga, podríamos acercar al péndulo otro cuerpo cuya carga sea conocida, por ejemplo, positiva. Si se produjera una repulsión, sabríamos que el péndulo está cargado positivamente. Si se produjera una fuerte atracción, sabríamos que el péndulo está cargado negativamente.

El electroscopio, por el contrario, presenta un comportamiento diferente. Una vez cargado, su tira permanece alejada del rectángulo incluso cuando la pajita frotada utilizada para cargarlo se alejó del sistema. Esto significa que basta con mirar la tira de un electroscopio para saber si está cargado o no. Cuando la tira apunta verticalmente hacia abajo, con el rectángulo, el electroscopio está descargado. Cuando la tira está levantada, lejos del rectángulo, sabemos que el electroscopio se cargó. Lo que impide que la tira caiga en esta última situación, como debería hacerlo debido a su peso, es la repulsión entre las cargas a lo largo de la tira y las cargas del mismo signo distribuidas por el rectángulo de cartón fino.

Experimento 6.4

Cargamos el electroscopio como en el experimento 6.2. Retirando el plástico frotado, la tira permanece levantada, alejada del electroscopio. Ahora acercamos nuestro dedo al borde superior del electroscopio y lo tocamos. Inmediatamente, la tira cae y se pega al rectángulo. Cuando retiramos nuestro dedo, la tira permanece vertical, figura 6.6.

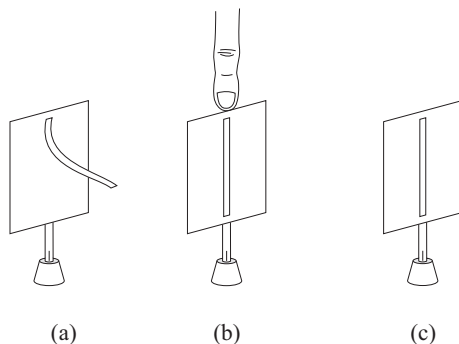


Figura 6.6: Descargar un electroscopio tocándolo. (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Cuando tocamos el borde superior del cartón, la tira desciende. (c) La tira permanece vertical después de retirar el dedo.

Cuando volvemos a acercar un dedo al extremo inferior de la tira por el lateral, observamos que la tira ya no se desplaza hacia el dedo, como ocurría anteriormente en el experimento 6.3. Concluimos que descargamos el electroscopio al tocar el cartón fino, como ocurría en el experimento 4.9. Esto se debe a la conexión a tierra eléctrica, sección 4.5.

Experimento 6.5

Cargamos el electroscopio raspándolo con una pajita frotada, como en el experimento 6.2. Volvemos a utilizar la pajita frotada que utilizamos anteriormente para cargar el electroscopio. Más concretamente, acercamos lentamente la pajita a la tira levantada del electroscopio. La pajita frotada debe estar en posición horizontal, a la misma altura que el extremo inferior de la tira levantada. El movimiento de aproximación debe ser muy lento, para evitar cualquier contacto entre ambos. Debemos observar atentamente la dirección en la que intenta desplazarse la tira, es decir, si se mueve hacia la pajita frotada o se aleja de ella. Al realizar este experimento con cuidado, observamos que la tira se desplaza hacia el rectángulo, es decir, se aleja de la pajita frotada que se aproxima.

Incluso podemos hacer que la tira se mueva hacia adelante y hacia atrás con la pajita frotada, acercándola y alejándola de la tira. La tira se desplazará a la misma velocidad, hacia el electroscopio y alejándose de él. Si queremos observar este movimiento oscilatorio de la tira, la amplitud del movimiento de la pajita frotada debe ser

pequeña. Es decir, debemos realizar movimientos pequeños y evitar acercarla demasiado a la tira, figura 6.7.

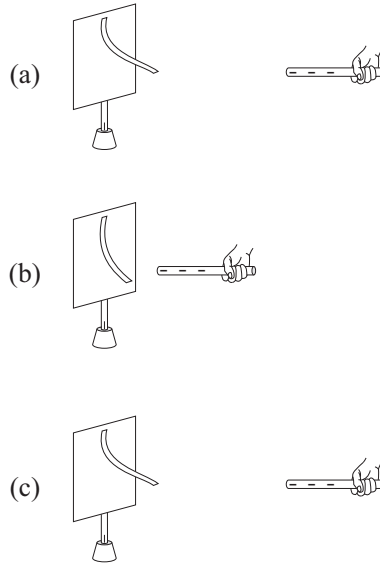


Figura 6.7: Repulsión entre el plástico cargado y el electroscopio cargado por este plástico frotado. (b) Cuando se acerca el plástico al electroscopio, la tira desciende. Cuando se aleja el plástico del electroscopio, la tira vuelve a subir, (a) y (c).

Esto demuestra que, en el experimento 6.2, el electroscopio se cargó con una carga del mismo signo que la de la pajita frotada, ya que existe una repulsión entre ellos. Por lo tanto, podemos representar las cargas del electroscopio electrizado como si tuvieran el mismo signo que las cargas del plástico frotado que se raspó sobre el cartón fino, figura 6.8.

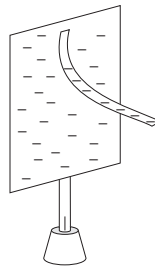


Figura 6.8: Las cargas se distribuyen por un electroscopio que fue electrizado con una pajita negativa.

Experimento 6.6

Repetimos el experimento 6.2 cargando negativamente un electroscopio raspándolo con una pajita frotada con cabello. Cuando retiramos la pajita, la tira permanece levantada. Cargamos otra pajita positivamente, como en el experimento 5.15. Acercamos lentamente esta segunda pajita al electroscopio, evitando que entren en contacto. En este caso, se produce una atracción entre ellas. Esta atracción es tan fuerte que incluso podemos hacer que ¡la tira suba por encima del borde superior del electroscopio, haciendo que siga a la pajita positiva, figura 6.9!

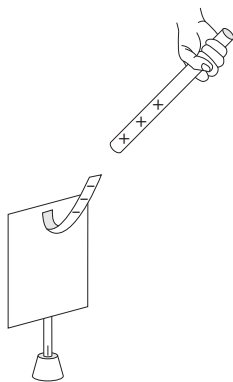


Figura 6.9: Atracción entre una pajita positiva y un electroscopio negativo.

Experimento 6.7

Cargamos dos electroscopios raspándolos con pajitas frotadas con cabello, como en el experimento 6.2. Retiramos las pajitas y las tiras permanecen levantadas. Colocamos estos dos electroscopios cargados uno frente al otro, en planos paralelos, con las dos tiras levantadas una hacia la otra. Acercamos lentamente los electroscopios entre sí, sin dejar que las tiras entren en contacto. Observamos que tienden a alejarse entre sí, volviendo cada uno al rectángulo de su propio electroscopio.

Esto demuestra una vez más la repulsión entre las cargas del mismo signo.

Experimento 6.8

Cargamos un electroscopio negativamente raspándolo con una pajita frotada con cabello, como en el experimento 6.2. Cargamos otro electroscopio positivamente raspándolo con otra pajita frotada entre dos tubos de goma dura. Retiramos las pajitas y las tiras permanecen levantadas. Colocamos estos dos electroscopios en paralelo y uno frente al otro, con las tiras apuntando una hacia la otra. Acercamos lentamente los dos electroscopios entre sí, evitando que las tiras entren en contacto. Esta vez, observamos que las tiras se atraen mutuamente, alejándose cada una de su propio cartón, figura 6.10.

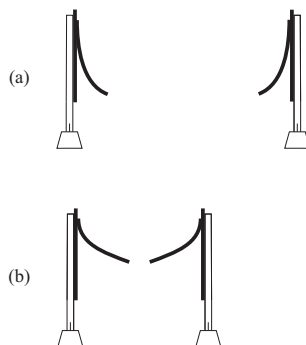


Figura 6.10: Atracción entre las tiras de dos electros copios con cargas opuestas.

Experimento 6.9

Comenzamos el experimento con un electroscopio inicialmente descargado. Fro-
tamos una pajita con el cabello. Una pequeña parte de la pajita frotada toca el borde
superior del electroscopio y lo raspa, como en el experimento 6.2. Observamos que la
tira se eleva en un ángulo θ_1 con respecto al electroscopio.

Sin tocar el cartón fino del electroscopio ni la tira de papel, volvemos a raspar con
la pajita frotada el borde superior del electroscopio. Cuando retiramos la pajita, la tira
permanece levantada, pero ahora está inclinada en un ángulo θ_2 mayor que θ_1 . En
otras palabras, $\theta_2 > \theta_1$. Esto se ilustra en la figura 6.11.

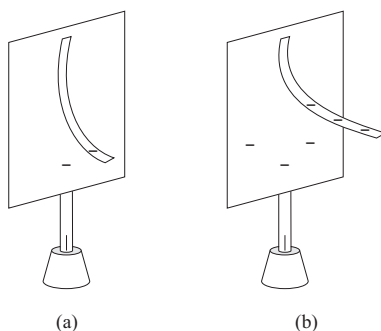


Figura 6.11: El ángulo de desplazamiento de una tira con respecto al electroscopio es
una medida de la cantidad de carga que hay en él.

Este procedimiento puede repetirse varias veces. Durante este procedimiento, la
pajita debe frotarse una o varias veces con el cabello.

Este experimento demuestra que el electroscopio puede utilizarse para medir la
cantidad de carga, de acuerdo con las definiciones de la sección 5.7. En otras palabras,
al aumentar la cantidad de carga en el electroscopio, aumentamos el ángulo entre la
tira y el rectángulo.

Otra forma de ilustrar este efecto puede observarse con el electroscopio clásico.

Al aumentar su cantidad de carga, aumentamos el ángulo de separación de sus dos tiras, figura 6.12.

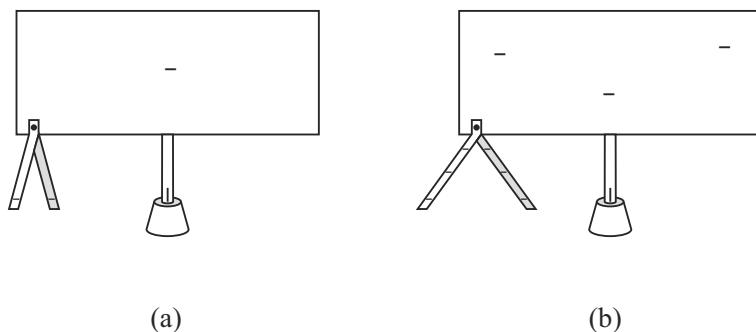


Figura 6.12: El ángulo entre las dos tiras de un electroscopio mide la cantidad de carga que hay en él.

6.3 ¿Qué cuerpos descargan un electroscopio por contacto?

Experimento 6.10

En el experimento 6.4 vimos que cuando tocamos un electroscopio cargado con el dedo, este se descarga inmediatamente. Lo volvemos a cargar como en el experimento 6.2. Sostenemos un extremo de una pajita de plástico neutra con la mano y tocamos el borde superior del electroscopio cargado con el otro extremo de la pajita. En este caso, no ocurre nada en la tira, que permanece levantada, figura 6.13. Concluimos que una pajita de plástico neutra no elimina la carga del electroscopio.

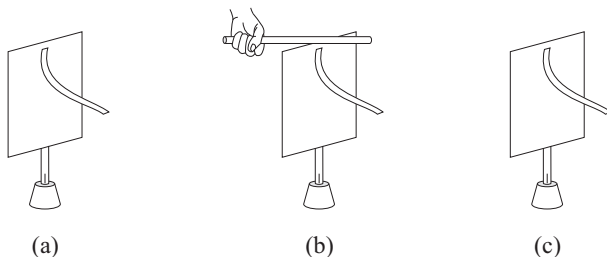


Figura 6.13: (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Sujetamos un extremo de una pajita de plástico neutra con la mano y tocamos el borde del electroscopio con el otro extremo de la pajita. No ocurre nada en la tira. (c) Cuando retiramos la pajita, la tira permanece levantada. En otras palabras, un electroscopio cargado no se descarga cuando lo tocamos con una pajita de plástico neutra que sostenemos en la mano.

Experimento 6.11

Recargamos el electroscopio, como en el experimento 6.2. Esta vez, sostenemos un extremo de un palito de madera en la mano. Tocamos el borde superior del electroscopio cargado con el otro extremo del palito de madera. Observamos que la tira cae inmediatamente, figura 6.14. Cuando retiramos el palito de madera, la tira permanece vertical. Concluimos que el palito de madera eliminó la carga del electroscopio.

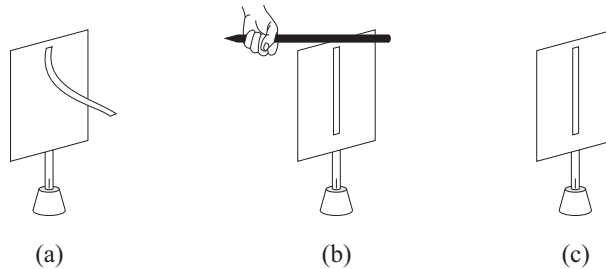


Figura 6.14: (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Sostenemos un extremo de un palito de madera con la mano y tocamos el borde superior del electroscopio con el otro extremo del palito. La tira cae inmediatamente. (c) Cuando retiramos el palito, la tira permanece abajo. En otras palabras, un electroscopio cargado se descarga cuando lo tocamos con un palito de madera que tenemos en la mano.

6.3.1 Definiciones de conductores y aislantes

Los experimentos 6.10 y 6.11, figuras 6.13 y 6.14, muestran una diferencia fundamental entre las sustancias. Debido a la importancia de estas propiedades, se crearon dos nombres para clasificar las sustancias en dos grupos.

Definiciones: Las sustancias que descargan un electroscopio electrizado con solo tocarlo se denominan «conductores». Las sustancias que no descargan el electroscopio se denominan «aislantes», «no conductores» o «dieléctricos».

El descubrimiento de estos dos tipos de sustancias se debe a Gray en 1729. También descubrió algunas de las principales propiedades de estas sustancias y publicó sus resultados en un artículo fundamental en 1731, que trataremos con más detalle en el apéndice B.¹ Las expresiones «conductor» y «aislante» parecen ser obra de Jean Théophile Desaguliers (1683–1744).² Una de las citas de Desaguliers menciona lo siguiente:^{3,4}

En el siguiente relato, que es la continuación de experimentos anteriores, denomino «conductores» a aquellos cordones en cuyo extremo se aplica el tubo de

¹[Gra31a].

²[Des41a] (en referencia a [Des41c]), [Pri66, p. 82], y [Hei99, pp. 292–293, nota 12].

³[Des41a, p. 193].

⁴In the following Account, which is the Sequel of former Experiments, I call *Conductors* those strings, to one End of which the rubb'd [glass] Tube is applied; and *Supporters* such horizontal Bodies as the *Conductor* rests upon.

vidrio frotado, y «soportes» a aquellos cuerpos horizontales sobre los que descansa el «conductor».

Antes de Desaguliers, Du Fay ya había utilizado el término «aislado» para referirse a un conductor sostenido por cuerpos que no permiten que la electricidad se escape a través de ellos. En 1733, Du Fay discutió la transmisión de electricidad a lo largo de cordones suspendidos por hilos de seda, un fenómeno que había sido descubierto por Gray. En esta obra, Du Fay declaró lo siguiente, con nuestro énfasis en cursiva:^{5,6}

Esta experiencia demuestra lo necesario que es que el cordón que se utiliza para transmitir electricidad a larga distancia esté *aislado* o sea sostenido únicamente por cuerpos lo menos propensos posible a cargarse de electricidad.

En 1737, declaró lo siguiente, con nuestro énfasis en cursiva:^{7,8}

Una vez asegurada esta igualdad para los experimentos que tenía intención de realizar, utilicé una barra de hierro de una pulgada cuadrada [2.5 cm × 2.5 cm] y cuatro pies de largo [122 cm], que, como dije, estaba suspendida sobre cordones de seda *aislada*, para que nada pudiera desviar el torbellino eléctrico que le transmitía el tubo [de vidrio frotado].

Es posible que la expresión «aislante» tenga su origen en estas citas de Du Fay. En el apéndice B, abordamos con más detalle los trabajos de Gray.

Experimento 6.12

Ahora repetimos los experimentos 6.10 y 6.11 para descubrir qué sustancias son conductoras y cuáles son aislantes. El procedimiento será siempre el mismo. Cargamos un electroscopio raspándolo con una pajita de plástico, como en el experimento 6.2. Retiramos la pajita. A continuación, sujetamos un objeto con las manos y tocamos el borde superior del rectángulo de cartón fino con una parte de dicho objeto. Si el electroscopio se descarga, diremos que la sustancia es conductora. Si el electroscopio no se descarga, diremos que la sustancia es aislante.

Este experimento se puede realizar con hilos simples de varios materiales: algodón, seda, poliéster, poliamida sintética, cabello, cobre, etc. También se puede realizar con materiales sólidos como metal, madera, vidrio, caucho, plástico, papel, papel de seda, etc.

En algunos casos, es más fácil sostener la pajita de plástico vertical que sostiene el electroscopio cargado y luego tocar la esquina del cartón fino con la sustancia que se va a probar, como una pared, una pizarra, un mueble, etc. Como siempre, debemos evitar tocar el rectángulo de cartón fino y su tira con las manos, para evitar la conexión a tierra eléctrica a través de nuestro cuerpo.

⁵[DF33d, p. 249].

⁶Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit isolée, ou ne soit soutenue que de corps les moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.

⁷[DF37b, p. 94].

⁸M'étant donc assuré de cette égalité pour les expériences que j'avois dessein de tenter, je me suis servi d'une barre de fer d'un pouce en carré & de quatre pieds de long, elle étoit, comme je l'ai dit, suspendue sur des cordons de soye & isolée, afin que rien ne pût détourner le tourbillon électrique qui lui seroit communiqué par le tube [en verre frotté].

Experimento 6.13

El procedimiento descrito en el último párrafo del experimento 6.12 también es adecuado para determinar qué líquidos son conductores o aislantes. Antes de comenzar estas pruebas, tomamos un recipiente vacío que luego se llenará con diferentes líquidos. Debemos utilizar un recipiente conductor. Para saber si el recipiente es conductor o aislante, cargamos un electroscopio y tocamos el recipiente con su fino cartón. Si el electroscopio se descarga tras este contacto, significa que el recipiente es realmente conductor. Los recipientes de metal, vidrio o madera son ejemplos de recipientes adecuados. Entonces podemos continuar con el experimento.

Al principio, llenamos completamente el recipiente con el líquido que queremos probar. Ahora ilustramos lo que ocurre con un líquido conductor como el agua, figura 6.15. En (a), tenemos un electroscopio cargado. En (b), sumergimos un borde del electroscopio en el agua. El cartón no debe tocar el recipiente, solo el agua. Observamos que la tira se baja. (c) Cuando retiramos el electroscopio del agua, la tira permanece bajada.

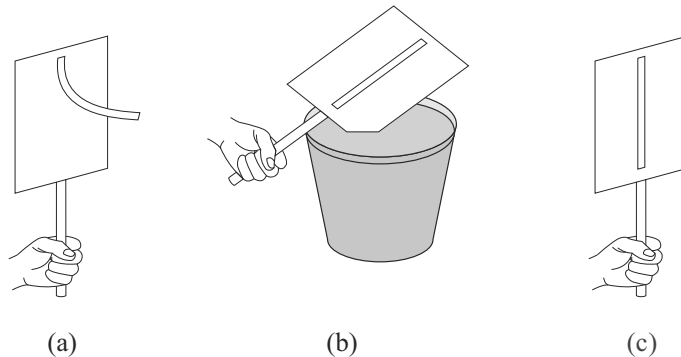


Figura 6.15: (a) Un electroscopio inicialmente cargado. (b) Sumergimos un borde del electroscopio en agua. Su tira desciende. (c) Cuando sacamos el electroscopio del agua, la tira permanece abajo.

En la figura 6.16, ilustramos lo que ocurre en el caso de un líquido aislante como el aceite vegetal de cocina. En (a), tenemos un electroscopio electrizado. Lo sujetamos únicamente por su pajita de plástico para evitar tocar el cartón fino o la tira elevada. A continuación, sumergimos un borde del cartón en el líquido. El cartón no debe tocar el recipiente, solo el aceite. Observamos que la tira permanece elevada, como en (b). Cuando retiramos el electroscopio del líquido, su tira permanece elevada, como en (c).

El mismo procedimiento también se puede aplicar para determinar si otras sustancias, como la harina o la sémola de maíz, son conductoras. Para ello, se llena un recipiente conductor con harina. Se sumerge el borde del electroscopio cargado en la harina y se observa el comportamiento de su tira. Durante este procedimiento, es importante evitar tocar el rectángulo de cartón fino o su tira con el recipiente conductor y con la mano para evitar la descarga del electroscopio.

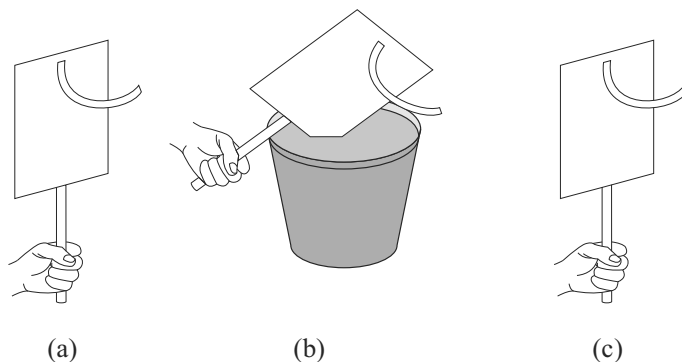


Figura 6.16: (a) Un electroscopio inicialmente cargado de electricidad. (b) Sumergimos un borde del cartón en un líquido aislante. La tira permanece levantada. (c) Cuando retiramos el electroscopio del líquido, la tira permanece levantada.

6.3.2 Cuerpos que se comportan como conductores y aislantes en los experimentos habituales de electrostática

Para establecer una distinción clara entre conductores y aislantes, lo ideal sería considerar todos los cuerpos de la misma forma y tamaño. Por ejemplo, podríamos tocar el electroscopio con varios cilindros de la misma longitud y diámetro, pero fabricados con sustancias diferentes. Sin embargo, por ahora no nos preocuparemos por la forma o el tamaño de los cuerpos que vamos a probar.

El resultado final de los experimentos [6.10](#), [6.11](#), [6.12](#) y [6.13](#) realizados con numerosas sustancias es el siguiente:

- **Conductores basados en los experimentos habituales de electrostática:**
Aire húmedo, cuerpo humano, todos los metales, papel, cartón fino, papel de seda, papel de aluminio, madera, trozo de tiza, la mayoría de los vidrios a temperatura ambiente, porcelana, agua dulce, alcohol, champú, queroseno, leche, bebidas gaseosas, detergente, pared, pizarra, corcho, cuero, harina de trigo, harina de maíz, hilo acrílico, sal, azúcar, serrín, tierra o arcilla, ladrillo, la mayoría de los tipos de caucho, etc.
- **Aislantes según los experimentos habituales de electrostática:**
Aire seco, ámbar, plástico, PVC, seda, vidrio calentado, nailon o poliamida sintética, poliéster, lana, un solo cabello humano, tubo acrílico, poliestireno, una barra de chocolate, aceite vegetal para cocinar, café molido y algunos tipos de caucho.

El número de sustancias conductoras es mucho mayor que el de sustancias aislantes. Estas dos listas nos permiten observar que la mayoría de las sustancias son conductoras y que muy pocas son aislantes. Algunas sustancias conductoras son muy eficaces y descargan el electroscopio casi instantáneamente, como es el caso del cuerpo humano, los metales, el algodón o el papel. Aunque la madera es conductora, no

conduce tan bien como el cuerpo humano. Esto se demuestra por el mayor tiempo que se necesita para descargar el electroscopio cuando lo tocamos con un trozo de madera, en comparación con el muy corto tiempo que se necesita para descargarlo cuando lo tocamos con nuestro cuerpo o con un trozo de metal.

El vidrio debe considerarse por separado. La mayoría de los vidrios comunes descargan el electroscopio, aunque más lentamente que los metales. Por el contrario, cuando se calientan al fuego o en el microondas, pueden comportarse como aislantes. En otras palabras, después de calentarse, normalmente no descargan el electroscopio, o lo descargan mucho más lentamente que a temperatura normal. Normalmente se comportan como conductores debido a la humedad o al vapor de agua acumulado en su superficie. Cuando el vidrio se calienta, esta agua se evapora y entonces se comportan como aislantes. Muchos científicos antiguos, como Gray y Du Fay, utilizaban tubos de vidrio frotados en sus experimentos, que sostenían en sus manos. Los tubos se comportaban como un aislante. A menudo mencionan la necesidad de calentar los tubos antes de frotarlos, ya que este procedimiento de calentamiento aumentaba la cantidad de carga que adquirían. También permitía que la carga adquirida permaneciera más tiempo en su superficie. La otra razón por la que sus vidrios podían comportarse como aislantes era probablemente su composición química. Por lo general, utilizaban vidrio flint, un tipo de vidrio que contiene plomo en su composición. Este tipo de vidrio es mucho más aislante que la mayoría de los vidrios que se encuentran hoy en día en el mercado. No es fácil encontrar vidrio flint hoy en día, excepto en tiendas especializadas.

En tiempo seco y frío, el electroscopio puede permanecer cargado durante varios minutos. En este caso, el aire que rodea al electroscopio actúa como un buen aislante. Por el contrario, en tiempo cálido y húmedo, y especialmente en tiempo lluvioso, es difícil mantener el electroscopio cargado. Normalmente se descarga tan pronto como se electriza al frotarlo con una pajita. El aire que lo rodea se comporta como un conductor en estas situaciones. Por eso, la mayoría de los experimentos funcionan bien en tiempo seco, cuando las cargas generadas en los aislantes pueden mantenerse durante más tiempo. Del mismo modo, las cargas situadas en conductores aislados eléctricamente del suelo pueden almacenarse durante más tiempo en tiempo seco, en comparación con el poco tiempo que pueden almacenarse en tiempo húmedo. En tiempo húmedo, muchos experimentos no funcionan como se espera, o los efectos no son tan visibles o detectables.

La mayoría de los tipos de caucho se comportan como conductores. Esto puede deberse a la humedad de su superficie, a su composición química o a sus procesos de fabricación. Algunos tipos de caucho se comportan como aislantes. Por eso, el procedimiento ideal consiste en probar todas las sustancias disponibles. Solo después de una prueba como la que se describe aquí podemos clasificarlas en función de su comportamiento.

La división de las sustancias en conductoras y aislantes es uno de los aspectos más importantes de toda la ciencia de la electricidad. Asociado a la existencia de cargas positivas y negativas, con atracciones y repulsiones, este hecho nos permite comprender todo un conjunto de fenómenos.

6.4 ¿Qué cuerpos cargan un electroscopio por contacto?

Experimento 6.14

Se colocan dos electros copios inicialmente descargados en paralelo, uno frente al otro, con las tiras hacia afuera. Debe haber una distancia de aproximadamente 15 cm entre ellos. Se coloca una pajita de plástico neutra sobre los cartones de los electros copios, sostenida por estos, como se muestra en la figura 6.17. Tras esta preparación, tomamos una segunda pajita de plástico, que electrizamos frotándola con el cabello.

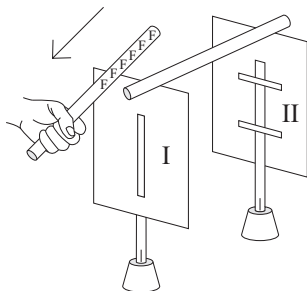


Figura 6.17: Dos electros copios inicialmente descargados con sus tiras en el exterior. Están conectados por una pajita neutra. Una segunda pajita cargada se raspa contra el cartón del electros copio I.

Esta segunda pajita frotada se raspa contra el cartón del electros copio I de la figura 6.17. Observamos que solo se levanta la tira del electros copio I, mientras que la del electros copio II permanece inmóvil. Esta secuencia de operaciones se ilustra en la figura 6.18.

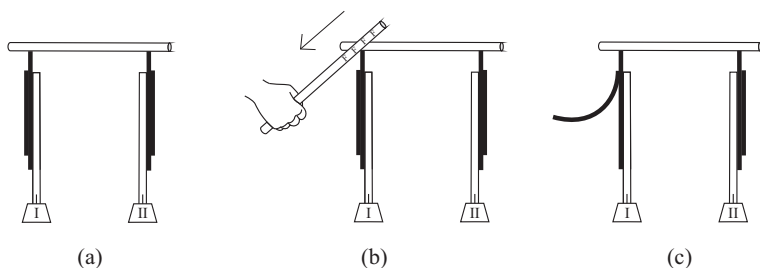


Figura 6.18: (a) Dos electros copios inicialmente descargados conectados por una pajita neutra. (b) Se raspa una segunda pajita electrizada contra el borde superior del electros copio I. (c) Se retira la pajita cargada. Observamos que solo se levanta la tira del electros copio I.

Experimento 6.15

Se repite el procedimiento del experimento 6.14. Pero esta vez, los dos electros-copios inicialmente neutros están conectados por un palito de madera para barbacoa, figura 6.19.

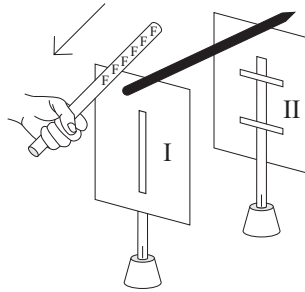


Figura 6.19: Dos electros copios inicialmente descargados están conectados por un pa-lito de madera. Una pajita electrizada se raspa únicamente contra el electros copio *I*.

Una pajita electrizada se raspa solo contra el electros copio *I* de la figura 6.19. En este caso, observamos que ambas tiras se levantan. Esta secuencia de procedimientos se ilustra en la figura 6.20.

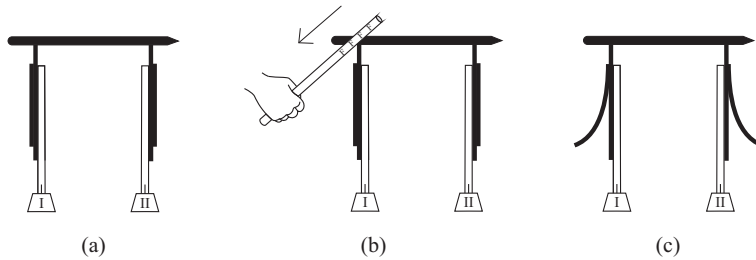


Figura 6.20: (a) Dos electros copios inicialmente descargados conectados por un pa-lito de madera. (b) Raspamos solo el electros copio *I* con una pajita electrizada. (c) Se retira la pajita electrizada. Observamos que los dos electros copios se cargaron.

Los experimentos 6.14 y 6.15 son lo contrario de los experimentos 6.4, 6.10, 6.11 y 6.12. En estos casos, observamos qué cuerpos descargaban o no descargaban un electros copio electrizado al tocarlo con esa sustancia en nuestra mano. Ahora analizamos qué sustancias cargan o no el electros copio *II* inicialmente descargado, cuando lo co-nectamos a través de esta sustancia al electros copio *I* que está cargado al rasparlo con una pajita electrizada. El resultado es el mismo. En otras palabras, una pajita de plásti-co neutra no descarga un electros copio electrizado cuando lo toca, como en el experimento 6.10. Tampoco carga el electros copio *II* cuando este cuerpo es el enlace material entre los electros copios *I* y *II*, cuando el electros copio *I* se carga raspándolo

con una pajita electrizada, como en el experimento 6.14. Por el contrario, un palito de madera carga el electroscopio II en este caso, como en el experimento 6.15.

Experimento 6.16

Los experimentos 6.14 y 6.15 pueden aplicarse fácilmente a otras sustancias. Por ejemplo, podemos conectarlas por su borde superior con un hilo o un alambre (de algodón, poliéster, cobre, etc.), un palito (de madera, metal, plástico, PVC, etc.), una tira (de papel, papel de aluminio, papel de seda, tela, etc.), etc. Tras este procedimiento, frotamos una pajita de plástico. A continuación, utilizamos este plástico frotado para cargar el primer electroscopio raspándolo con la pajita frotada, tal y como se describe en el experimento 6.2. Durante este proceso, observamos el comportamiento del segundo electroscopio. Si la tira de este segundo electroscopio no se mueve y permanece apuntando hacia abajo, significa que la sustancia que conecta los dos electroscopios no permitió la transferencia de cargas entre ellos. En otras palabras, esta sustancia es un aislante. Por el contrario, si la tira del segundo electroscopio se aleja y permanece levantada, significa que se produjo una transferencia de cargas entre los dos electroscopios. Parte de la carga acumulada en el primer electroscopio fue conducida a través de la sustancia de conexión hacia el segundo electroscopio. Al realizar este experimento, observamos que las sustancias consideradas aislantes en el experimento 6.12 no permiten que el segundo electroscopio se cargue. Por el contrario, las sustancias consideradas conductoras en el experimento 6.12 permiten que el segundo electroscopio de este experimento se cargue.

6.5 Los componentes fundamentales de un versorio, un péndulo eléctrico y un electroscopio

Ahora que conocemos la diferencia entre conductores y aislantes, así como sus principales propiedades, podemos comprender la estructura de los instrumentos contruidos hasta ahora.

En el caso de un versorio metálico, tenemos una aguja conductora horizontal (como un tensor de papel de acero), figuras 3.4 y 6.21 (a). Normalmente, está sostenida por un alfiler conductor vertical fijado a una tabla de madera o a un tapón de corcho. En otras palabras, todos los elementos de este versorio son conductores. El versorio de plástico está provisto de una tapa aislante, figuras 3.5 y 6.21 (b). El versorio de Du Fay, por su parte, está compuesto por una tapa aislante de plástico y tiene un conductor en uno de sus extremos, la tira de aluminio, figuras 4.22 y 6.21 (c).

El péndulo eléctrico está compuesto por un hilo de seda aislante con un conductor en su extremo inferior, el disco de papel, figura 6.22. El hilo de seda es esencial. Es este hilo, junto con las pajitas de plástico que componen el péndulo, lo que impide que la carga adquirida por el método ACR se descargue hacia el suelo. Sin este hilo de seda y estas pajitas de plástico, el disco de papel no podría permanecer cargado después de haber estado en contacto con un material frotado. Si el disco de papel estuviera sujeto,

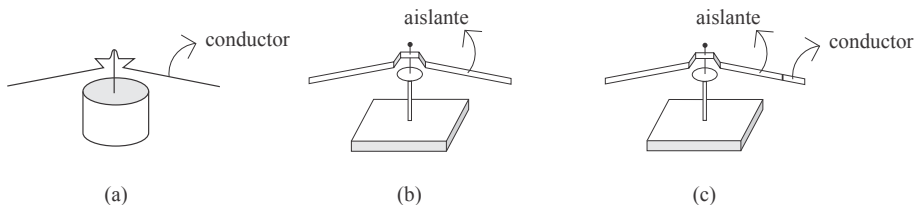


Figura 6.21: Componentes de un versorio. (a) Versorio metálico. (b) Versorio de plástico. (c) Versorio Du Fay.

por ejemplo, a un hilo de algodón sostenido por un palito de madera, no podríamos observar el mecanismo de atracción, contacto y repulsión.

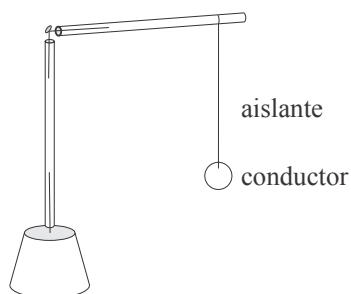


Figura 6.22: Componentes de un péndulo eléctrico.

Los hilos de nylon (poliamida sintética) y poliéster también actúan como aislantes. Por lo tanto, podemos utilizar estos hilos para fabricar un péndulo eléctrico. Sin embargo, no debemos utilizar hilo de algodón.

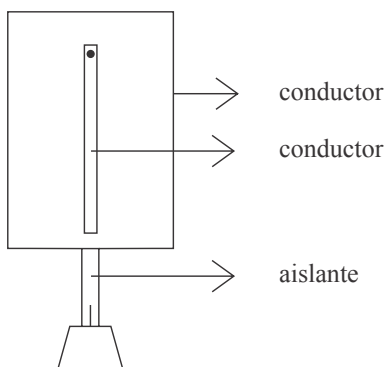


Figura 6.23: Componentes de un electroscopio.

El electroscopio, figura 6.23, por su parte, está compuesto por dos conductores, el rectángulo de cartón fino y la tira de papel de seda, sostenidos por un aislante, la

pajita de plástico. Este plástico es esencial. Es la propiedad aislante del plástico la que impide la descarga de un electroscopio electrizado hacia el suelo.

Si tuviéramos un palito de madera en lugar de uno de plástico, el electroscopio se descargaría siempre hacia el suelo después de frotarlo con una pajita. Por lo tanto, sería imposible mantenerlo cargado después de haberlo cargado.

6.6 La influencia de la diferencia de potencial eléctrico sobre el comportamiento conductor o aislante de un cuerpo

En los experimentos 6.4, 6.10 y 6.12, los materiales se clasificaron como conductores (aislantes) si descargaban (no descargaban) un electroscopio cargado. Otra forma de realizar esta clasificación consiste en observar si los materiales descargan o no una batería eléctrica.

Definiciones: Los materiales que descargan una batería a través de una conexión entre el terminal positivo y el terminal negativo de la batería se denominan «conductores». Los materiales que no descargan la batería se denominan «aislantes». Veamos cómo realizar esta clasificación.

Experimento 6.17

Los materiales utilizados en este experimento se muestran en la figura 6.24. Utilizamos tres trozos de alambre de cobre aislado, sin aislar en sus extremos, figura 6.24 (a), y una pila alcalina nueva de gran tamaño, de tipo *D*, que genera una diferencia de potencial de 1.5 voltios entre sus polos, figura 6.24 (b). También es útil utilizar un soporte para pilas para facilitar las conexiones eléctricas con los alambres. También usamos una pequeña bombilla de 1.5 voltios y un portalámparas, figura 6.24 (c). También es útil un interruptor, aunque no es imprescindible. Estos artículos se pueden encontrar en tiendas especializadas en electricidad y electrónica.

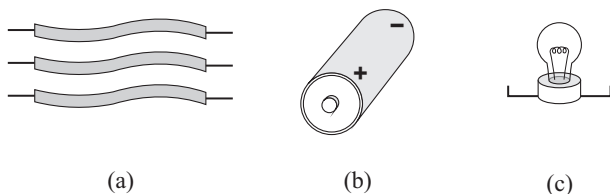


Figura 6.24: (a) Tres trozos de alambre de cobre aislado (pelar los extremos). (b) Una pila nueva de tamaño *D*. (c) Una bombilla de 1.5 voltios y un portalámparas.

Un extremo no aislado del primer alambre se conecta al terminal negativo de la batería. El otro extremo de este primer alambre se doblará en forma de gancho, como se muestra en la figura 6.25. Este extremo libre del primer alambre se denominará *A*. Un extremo no aislado del segundo alambre se conecta al terminal positivo de la batería,

mientras que el otro extremo se conecta a uno de los terminales de la toma. Un extremo del tercer alambre se conecta al otro terminal de la toma. El otro extremo de este tercer alambre formará otro gancho. Llamaremos a este extremo libre del tercer alambre *B*. La distancia entre *A* y *B* debe ser de aproximadamente 10 cm, figura 6.25.

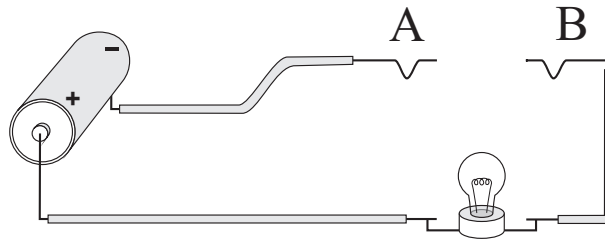


Figura 6.25: Comprobador de circuitos.

Cuando todo esté listo, tomamos un cuarto trozo de alambre de cobre, sin aislar en los extremos. Un extremo de este cuarto alambre se conecta a *A* y el otro extremo a *B*. La bombilla debería encenderse. Esto indicará que las conexiones o contactos eléctricos están correctamente establecidos. Además, indicará que hay una corriente eléctrica circulando por los hilos y la bombilla, como se muestra en la figura 6.26.

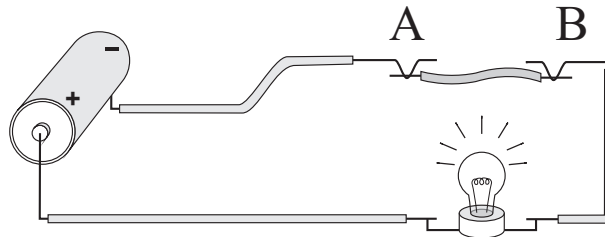


Figura 6.26: Cuando los extremos no aislados de un alambre de cobre se conectan a los extremos *A* y *B*, la bombilla se enciende.

Cuando la bombilla se enciende, se dice que el alambre de cobre es un conductor de electricidad cuando se somete a una diferencia de potencial de 1.5 voltios = 1.5 V.

Si la bombilla permanece encendida durante varios minutos, la batería se debilita. Esto se traduce en una disminución de la intensidad luminosa, que acaba llegando a cero. Cuando esto ocurre, la batería se descarga. Para evitar que se descargue, la mejor solución es abrir el contacto (es decir, retirar el cuarto hilo) tan pronto como se encienda la bombilla.

Experimento 6.18

Antes de pasar al siguiente procedimiento, es esencial asegurarse de que el experimento 6.17 funciona correctamente con cada uno de los materiales que vamos a utilizar. Esto indicará que todos los contactos eléctricos están bien establecidos y

funcionan correctamente. Supondremos que así es. También supondremos que la pila sigue nueva y cargada después de retirar el cuarto alambre.

Ahora conectamos los puntos *A* y *B* con una pajita de plástico. Al hacerlo, la bombilla no se enciende. Esto indica que no circula corriente eléctrica por el circuito, figura 6.27 (a).

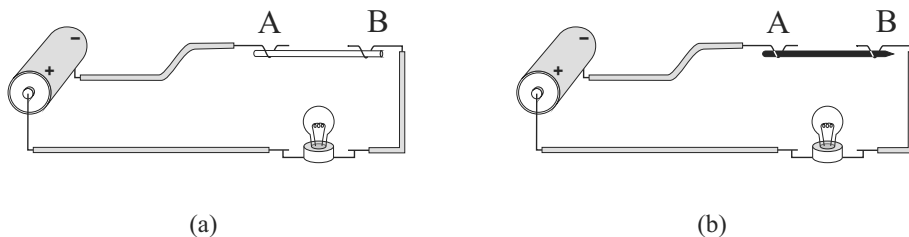


Figura 6.27: (a) La bombilla no se enciende cuando conectamos *A* y *B* con una pajita de plástico. (b) La bombilla tampoco se enciende cuando *A* y *B* se conectan con un palito de madera.

Definición: El plástico es un material aislante cuando se somete a una diferencia de potencial de 1.5 voltios. La razón de esta definición es que no permite la descarga de la batería cuando conecta sus terminales positivo y negativo. Esto se indica por el hecho de que la bombilla no se enciende cuando *A* y *B* están conectados por una pajita de plástico.

Experimento 6.19

Repetimos el experimento 6.17, pero ahora conectamos *A* y *B* con otras sustancias.

Para mayor comodidad, podríamos colocar un interruptor opcional en medio del primer o segundo alambre. Gracias a este interruptor, podemos abrir o cerrar el circuito eléctrico a voluntad. Abrimos el interruptor y colocamos la sustancia que queremos probar entre *A* y *B*. A continuación, cerramos el interruptor y observamos la bombilla.

Definiciones: Cuando la bombilla se enciende, la sustancia se denomina «un conductor». Cuando la bombilla no se enciende, la sustancia se denomina «un aislante». Podemos probar todas las sustancias enumeradas en el experimento 6.12.

Esto se ilustra en la figura 6.27 (b), donde *A* y *B* están conectados por un palito de madera. En este caso, la bombilla no se enciende. Según nuestra definición, esto indica que la madera es un aislante cuando se somete a una diferencia de potencial de 1.5 voltios, aunque el palito de madera es un conductor a tensiones mucho más altas.

Experimento 6.20

La mejor manera de probar los líquidos es utilizar un recipiente aislante (como un vaso de plástico, por ejemplo). Al principio, este debe estar vacío. Para comprobar si se trata realmente de un aislante, conectamos *A* y *B* a este recipiente vacío. Supondremos

que la bombilla no se enciende, lo que indica que este recipiente es un aislante de 1.5 voltios.

A continuación, se llena el vaso de plástico con el líquido que se va a analizar. Después, se sumergen los terminales *A* y *B* en el líquido. La figura 6.28 ilustra lo que ocurre con agua fría del grifo o agua de lluvia.

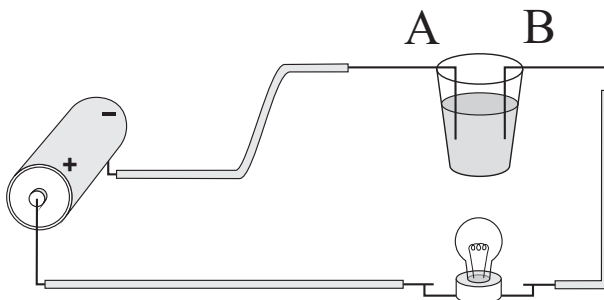


Figura 6.28: La bombilla no se enciende cuando *A* y *B* están conectados al agua dulce.

La bombilla no se enciende cuando *A* y *B* están conectados al agua dulce.

6.6.1 Sustancias que se comportan como conductores y aislantes para pequeñas diferencias de potencial

Realizamos varias pruebas similares a los experimentos 6.17 a 6.20. El resultado final es el siguiente:

- **Sustancias que se comportan como conductoras cuando se someten a una diferencia de potencial de 1.5 V:**

Todos los metales.

- **Sustancias que se comportan como aislantes cuando se someten a una diferencia de potencial de 1.5 V:**

Aire seco, aire húmedo, ámbar, plástico, seda, madera, vidrio calentado, vidrio a temperatura ambiente, nailon o poliamida sintética, PVC, poliéster, lana, cabello humano, tubo acrílico, paño acrílico, poliestireno, barra de chocolate, café molido, papel, cartón fino, papel de seda, trozo de tiza, porcelana, agua dulce, alcohol, champú, queroseno, leche, bebidas gaseosas, detergente, aceite vegetal de cocina, pared, pizarra, corcho, cuero, harina de trigo, harina de maíz, hilo acrílico, sal, azúcar, serrín, tierra o arcilla, ladrillo, caucho, etc.

Podemos comparar los resultados de este experimento con los de los experimentos 6.12 y 6.13. La conclusión es que los conceptos de «conductores» y «aislantes» son relativos. En otras palabras, sustancias como el vidrio y la madera, que se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática, ahora se comportan como aislantes cuando se someten a una diferencia de potencial de 1.5 V.

No entraremos en detalles aquí, pero en electrostática es habitual trabajar con diferencias de potencial que van desde 1 000 voltios hasta 10 000 voltios (es decir, entre 10^3 V y 10^4 V). La diferencia de potencial a la que nos referimos aquí es la que existe entre el cuerpo cargado (como un trozo de plástico frotado o un electroscope cargado) y la tierra; o entre los extremos de un cuerpo (cuando queremos comprobar si ese cuerpo se comporta como un conductor o como un aislante). En estos casos, la mayoría de las sustancias se comportan como conductores, como vimos anteriormente. Por el contrario, la diferencia de potencial generada entre los polos de las pilas químicas o las baterías comunes es mucho menor, oscilando entre 1 V y 10 V. Para estas pequeñas diferencias de potencial, varias sustancias como la madera, el papel, el caucho y el vidrio se comportan como aislantes. Esto demuestra que hay que ser muy prudente a la hora de clasificar las sustancias como conductoras o aislantes. Al fin y al cabo, el comportamiento de todas las sustancias depende no solo de sus propiedades intrínsecas, sino también de la diferencia de potencial externa a la que están sometidas. Este es un aspecto muy importante que siempre hay que tener en cuenta.

Existe una gradación entre los experimentos habituales de electrostática y los experimentos en los que existe una diferencia de potencial de unos pocos voltios. En otras palabras, existe una gradación en las propiedades conductoras y aislantes de los cuerpos cuando se pasa de una diferencia de potencial de 10 000 V a una diferencia de potencial de unos pocos voltios.

Debido a este hecho, podría ser conveniente modificar nuestra terminología. Normalmente, decimos que un determinado cuerpo *A* «es» un conductor, mientras que otro cuerpo *B* «es» un aislante. Sin embargo, según lo que acabamos de ver, sería más correcto decir que, en un determinado conjunto de condiciones, el cuerpo *A* «se comporta como» un conductor, pero que en otro conjunto de condiciones, «se comporta como» un aislante. Lo mismo ocurre con el cuerpo *B*. Pero esto haría que todas las frases fueran muy largas y complicadas. Por eso mantendremos el procedimiento habitual de decir que los cuerpos «son» conductores o aislantes. Pero debe quedar claro para todos que se trata de conceptos relativos, que dependen no solo de las propiedades intrínsecas de estos cuerpos, sino también de las condiciones externas a las que están sometidos.

6.7 Otros aspectos que influyen en las propiedades conductoras y aislantes de una sustancia

Los conductores se definieron en la subsección 6.3.1 como aquellas sustancias que descargan un electroscope cargado cuando tocamos el electroscope con dicha sustancia. Los aislantes, por el contrario, se definieron como aquellas sustancias que no descargan un electroscope cargado cuando tocamos el electroscope con ellas. En la sección 6.6, vimos que se trata de definiciones relativas. De hecho, dependiendo de la diferencia de potencial eléctrico que actúe sobre los extremos de una sustancia, esta puede comportarse como un conductor o como un aislante. En esta sección, abordaremos brevemente otros tres aspectos que también influyen en estas definiciones.

6.7.1 El tiempo necesario para descargar un electroscopio electrizado

Experimento 6.21

Cargamos un electroscopio y lo dejamos sobre una mesa en tiempo seco. Observamos que la tira permanece levantada durante varios segundos, incluso algunos minutos. Sin embargo, si esperamos lo suficiente, por ejemplo una hora, el electroscopio se descargará por completo.

Esto significa que las definiciones de conductor y aislante de la subsección 6.3.1 dependen del tiempo de observación. Durante un intervalo de unos segundos, el aire seco puede considerarse un buen aislante. Por el contrario, durante un intervalo de una hora, el aire seco puede clasificarse como conductor, ya que permite la descarga de un electroscopio.

Definiciones: En las presentes definiciones, nos referimos a los procedimientos experimentales descritos en la sección 6.3. A los efectos de la presente obra, podemos definir los «buenos conductores» como aquellas sustancias que descargan un electroscopio electrizado cuando entran en contacto con él durante un intervalo de tiempo inferior a 5 segundos. Los «malos conductores» o «malos aislantes» son aquellas sustancias que descargan el electroscopio en un intervalo de tiempo comprendido entre 5 y 30 segundos. Estos cuerpos también se denominan «conductores imperfectos» o «aislantes imperfectos». Por último, los «buenos aislantes» son aquellas sustancias que necesitan un intervalo de tiempo superior a 30 segundos para descargar un electroscopio cargado.

6.7.2 La longitud de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio electrizado

Experimento 6.22

Cortamos varias tiras de papel, de 2 cm de ancho y una longitud que varía entre 10 cm y 1 m. Cargamos un electroscopio y lo colocamos sobre una mesa en un día seco. Sujetamos un extremo de la tira de 10 cm con la mano y tocamos su extremo libre con el borde del cartón fino del electroscopio. Observamos una rápida descarga del electroscopio. Según la definición de la subsección 6.7.1, esto significa que esta tira puede considerarse un buen conductor.

Volvemos a cargar el electroscopio y esta vez utilizamos una tira de papel de 30 cm $\times$ 2 cm. Sostenemos un extremo de la tira de papel con la mano y su extremo libre toca el cartón del electroscopio. Ahora podemos observar fácilmente el intervalo de tiempo necesario de unos segundos para descargar el electroscopio. Según el tipo de papel, esta tira de papel de 30 cm de largo puede considerarse un mal conductor.

Este experimento también muestra claramente que, con el tiempo, la cantidad de carga que pierde un electroscopio electrizado aumenta, véase la subsección 6.7.1. La única diferencia es que, en la situación actual, el electroscopio se descarga principalmente a través de la tira de papel y no a través del aire ambiente.

El electroscopio se carga una vez más y se repite el experimento con una tira de papel de 1 m de largo y 2 cm de ancho. Observamos que el electroscopio permanece cargado durante varios segundos. Según la definición de la subsección 6.7.1, esto significa que esta tira de papel de 1 m de largo puede considerarse un buen aislante.

Este experimento demuestra que la longitud de una sustancia influye en su comportamiento como conductor o aislante. Al aumentar la longitud de una sustancia entre nuestra mano y el cartón del electroscopio, aumentamos el tiempo necesario para descargar el electroscopio.

6.7.3 La sección transversal de una sustancia que entra en contacto con un electroscopio electrizado

Experimento 6.23

Cargamos un electroscopio y lo colocamos sobre una mesa. Sostenemos el extremo de un cabello humano en nuestra mano y tocamos el otro extremo del cabello con el cartón fino de un electroscopio cargado. Observamos que el electroscopio permanece cargado durante varios segundos. Esto indica que podemos clasificar el cabello humano como un buen aislante.

Volvemos a cargar el electroscopio y aumentamos el número de cabellos en nuestra mano, con sus extremos libres tocando simultáneamente el cartón del electroscopio. Observamos que al aumentar el número de cabellos, la descarga se produce más rápidamente. Por ejemplo, con decenas de cabellos, el electroscopio se descarga en pocos segundos. Por lo tanto, podemos clasificar esta cantidad de cabello como un buen conductor.

Experimentos como este demuestran que la sección transversal de un cuerpo influye en sus propiedades conductoras o aislantes. Cuanto mayor sea la superficie entre nuestra mano y el cartón del electroscopio, menor será el tiempo necesario para descargar el electroscopio.

En esta obra no abordaremos con más detalle los aspectos presentados en las secciones 6.6 y 6.7.

6.8 La electrización de un conductor por fricción

Experimento 6.24

En el experimento 2.11 vimos que es imposible cargar un metal por fricción mientras lo sostenemos con las manos. Ahora que descubrimos la diferencia entre conductores y aislantes, así como el hecho de que el cuerpo humano es un conductor, podemos probar una variante de este experimento. Después de todo, es posible que el metal haya adquirido una carga cuando lo frotamos, pero que este se haya descargado inmediatamente al suelo a través de nuestro cuerpo. Este nuevo experimento nos permite concluir que efectivamente fue así.

Esta vez, sostenemos el metal en el extremo de un tubo de PVC de 30 cm de largo. El metal puede ser, por ejemplo, una tetera de aluminio. La tetera se sostiene boca

abajo por su abertura alrededor del tubo de PVC. Cargamos un péndulo eléctrico negativamente y otro positivamente, como en la sección 5.4. Estos dos péndulos cargados se mantienen separados entre sí.

Sostenemos el tubo con las manos, sin tocar el metal. Envolvemos una bolsa de plástico alrededor de la otra mano y frotamos este plástico contra una parte de la tetera. Sin dejar de sujetar el tubo de PVC con las manos y sin tocar el metal, acercamos la parte frotada de la tetera de aluminio a los dos péndulos de cargas opuestas, evitando como siempre que estas sustancias entren en contacto con los discos de papel cargados de los péndulos. A continuación, acercamos la parte frotada de la bolsa de plástico a los dos péndulos de cargas opuestas, evitando una vez más que entren en contacto. Gracias a la atracción y repulsión que ejercen estas sustancias y los péndulos, observamos que el plástico se cargó negativamente, mientras que la tetera de aluminio se cargó positivamente.

Experimento 6.25

Repetimos los procedimientos del experimento 6.24. Pero ahora consideramos una parte no frotada de la bolsa de plástico que está alejada de la parte frotada. Cuando acercamos la parte no frotada a los dos péndulos cargados, estos no indican la presencia de una carga neta en esa parte no frotada del plástico. Por el contrario, cualquier parte de la tetera aislada afectará a los péndulos cuando la tetera se acerque a ellos. Esto ocurre tanto si la parte de la tetera que se acerca a los péndulos está cerca como lejos de la parte frotada de la tetera. En otras palabras, todas las partes de la tetera se comportarán como si estuvieran cargadas positivamente.

Experimentos como este demuestran que podemos electrizar un conductor por fricción, siempre y cuando esté aislado durante el proceso.

El descubrimiento de que los metales también pueden cargarse por fricción, siempre que estén bien aislados, no se produjo hasta la década de 1770.⁹

6.9 La conservación de la carga eléctrica

Experimento 6.26

Tomamos un tubo de PVC neutro y un trozo de bolsa de plástico también neutro, como en los experimentos 2.1, 3.1 y 4.5. Cargamos un péndulo eléctrico negativamente y otro positivamente, como en la sección 5.4. A continuación, frotamos la bolsa de plástico sobre el tubo de PVC. Acercamos lentamente la parte frotada del tubo a cada uno de los péndulos cargados, evitando cualquier contacto entre el tubo y los dos péndulos. Podemos concluir entonces que se cargó negativamente, ya que repele el péndulo negativo y atrae al péndulo positivo. Al acercar lentamente la parte frotada de la bolsa de plástico a cada uno de los péndulos cargados, evitando siempre cualquier contacto entre ellos, podemos concluir que la bolsa de plástico se cargó positivamente.

⁹[Hem80] y [Hei99, p. 252, nota 10].

Analicemos ahora los experimentos de la sección 5.4, así como los experimentos 6.24 hasta 6.26. Estas muestran que cuando frotamos dos cuerpos inicialmente neutros entre sí, uno de ellos adquiere una carga positiva y el otro una carga negativa. Este fenómeno solo es fácilmente detectable cuando ambos cuerpos son aislantes. Cuando uno de estos cuerpos es un aislante y el otro un conductor, la carga adquirida por este último se descarga normalmente hacia el suelo a través de nuestro cuerpo. Esto puede dar la impresión de que la carga del aislante apareció de la nada, ya que el conductor se descargó tras el roce. Para observar la carga adquirida por un conductor al frotarse con otro cuerpo, es esencial aislar eléctricamente el cuerpo conductor. Cuando está aislado, la carga que adquirió no se descargará al suelo, lo que permitirá observar sus propiedades.

El experimento 6.25 también muestra que la carga adquirida por un aislante debido a la fricción no se distribuye por todo el aislante. En otras palabras, permanece adherida a la zona frotada. Por el contrario, la carga adquirida por un conductor debido a la fricción se distribuye rápidamente por toda la superficie conductora. No permanece adherida a la zona frotada.

En los siguientes experimentos, utilizamos dos electros copios del mismo tamaño. También suponemos que tienen tiras de la misma longitud y anchura, y la misma sensibilidad (es decir, con la misma movilidad angular con respecto a la vertical). Normalmente, también consideramos que están cargados por igual. Esto puede indicarse por el ángulo de las tiras con respecto a la vertical. Una vez que se hayan cargado, no debemos tocarlas con el cuerpo, para evitar que se descarguen. Cuando tengamos que moverlos, es preferible sujetarlos por los soportes de plástico.

Experimento 6.27

Cargamos negativamente dos electros copios con la misma cantidad de carga, como en el experimento 6.2. Los colocamos uno al lado del otro en el mismo plano, separados por una pequeña distancia. Después de levantar las dos tiras y retirar la pajita frotada que las cargó, tocamos los dos rectángulos uno contra el otro. Observamos que las dos tiras permanecen levantadas, figura 6.29. Ambas permanecen levantadas después de separar los dos electros copios. Lo mismo ocurre cuando cargamos los dos electros copios con cargas positivas iguales.

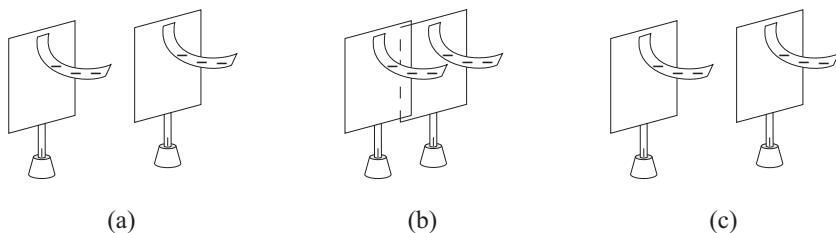


Figura 6.29: (a) Dos electros copios cargados con cargas del mismo signo. (b) Los cartones se tocan y no ocurre nada. (c) Tras separarlas, las tiras permanecen levantadas.

Experimento 6.28

Cargamos un electroscopio negativamente, como en el experimento 6.2, y el otro electroscopio positivamente, como en el experimento 6.8. Una vez levantadas las tiras, retiramos las dos pajitas frotadas que cargaron los electroscopios. Los dos electroscopios se colocan en el mismo plano, uno al lado del otro, a una pequeña distancia entre sí. A continuación, tocamos los dos electroscopios. Esta vez, las dos tiras caen inmediatamente, ¡recuperando su orientación vertical natural, figura 6.30 (b)! Podemos separar los dos electroscopios y las tiras permanecen verticales. Esto indica que los dos electroscopios, inicialmente electrizados con cargas opuestas, se descargaron por contacto mutuo. Este experimento es el contrario de los experimentos 6.24 y 6.26. En estos últimos experimentos, teníamos dos cuerpos que inicialmente eran neutros. Después de los procedimientos experimentales, se electrizaron con cargas de signo opuesto. En el presente experimento, por el contrario, tenemos dos electroscopios electrizados con cargas de signo opuesto. Después del procedimiento experimental, se neutralizaron.

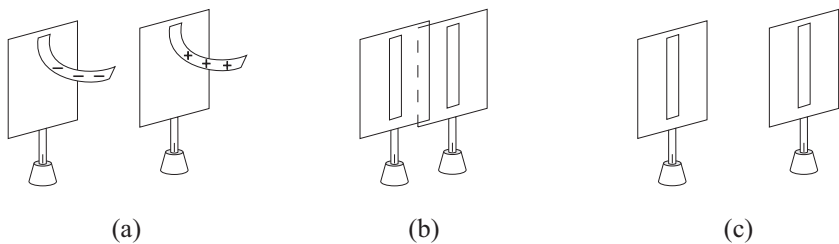


Figura 6.30: (a) Un electroscopio positivo y un electroscopio negativo. (b) Tras el contacto, las tiras caen. (c) Tras la separación, las tiras permanecen verticales, lo que indica que los electroscopios ahora están descargados.

Experimento 6.29

Un solo electroscopio está cargado negativamente, como en el experimento 6.2. Debe tener una carga suficiente. Esto se indica mediante un gran ángulo de inclinación de su tira con respecto a la vertical, figura 6.31 (a). Colocamos otro electroscopio, inicialmente descargado, en el mismo plano vertical, a una pequeña distancia lateral del primero. A continuación, ponemos los dos electroscopios en contacto entre sí. Observamos que el ángulo de la tira del primero disminuye, mientras que la tira del otro electroscopio se eleva, figura 6.31 (b). Tras separarlos, las tiras permanecen inalteradas. La cantidad de carga de un electroscopio puede indicarse mediante la altura de su tira levantada. Este experimento muestra que un electroscopio cargado pierde parte de su carga cuando entra en contacto con un segundo electroscopio inicialmente sin carga, que entonces se electriza, figura 6.31 (c).

Cuando separamos estos dos electroscopios, ambos permanecen ligeramente cargados. Al acercar lentamente una pajita negativa a las dos tiras, podemos concluir que ambos electroscopios están ahora cargados negativamente. La inclinación del primer

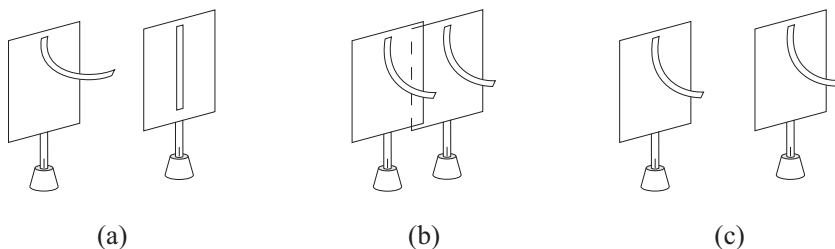


Figura 6.31: (a) Un electroscopio cargado y un electroscopio descargado. (b) Contacto entre los cartones. (c) Separación tras el contacto. Las tiras permanecen levantadas, pero con una inclinación menor que en (a).

electroscopio disminuyó durante este experimento, mientras que la del segundo aumentó. Esto sugiere, según el experimento 6.9, que parte de la carga negativa inicial del primer electroscopio se transfirió al segundo electroscopio.

El mismo efecto se produce entre un electroscopio cargado positivamente y un electroscopio inicialmente descargado.

Experimento 6.30

Podemos construir una variante de los experimentos 6.14 y 6.15. Los electroscopios *I* y *II* permanecen a una distancia de aproximadamente 15 cm entre sí. Las tiras permanecen en el exterior. Los electroscopios deben estar inicialmente descargados, sin ninguna conexión entre ellos en este experimento. Después de esta preparación, cargamos el electroscopio *I* según el procedimiento del experimento 6.2. La tira del electroscopio *I* se levantará, mientras que la del electroscopio *II* no se moverá, figura 6.32 (a). Tras este procedimiento, se retira la pajita cargada. Ahora tomamos una segunda pajita neutra. Debe colocarse sobre los cartones de los dos electroscopios y estar sostenida por estos. Una vez colocada en este lugar, no cambia nada. La tira del electroscopio *I* permanece levantada y la del electroscopio *II* apunta hacia abajo, figura 6.32 (b).

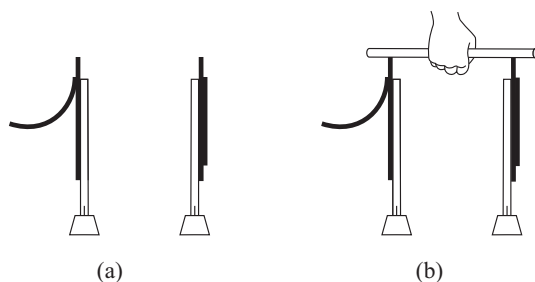


Figura 6.32: (a) El electroscopio *I* está cargado. (b) A continuación, se coloca una pajita neutra para conectar los dos electroscopios. Al hacerlo, no se produce ningún cambio.

Experimento 6.31

Se repite el experimento 6.30. El electroscopio *I* se carga mientras no hay ninguna conexión entre los electroskopios, figura 6.33 (a).

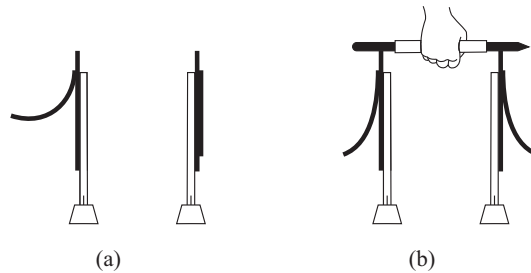


Figura 6.33: (a) Solo el electroscopio *I* está cargado. (b) Un palito de madera está envuelto en una pajita de plástico, y la madera está sostenida por los dos electroskopios. Observamos que la tira *I* desciende ligeramente, mientras que la tira *II* asciende ligeramente.

Pero ahora, los dos electroskopios no estarán conectados por una pajita neutra. En su lugar, se corta una pajita de plástico de unos 10 cm de longitud. Se inserta a través de ella un palito de madera o un alambre de cobre de 20 cm de largo. Con la mano, tocamos solo la pajita y colocamos los extremos del palito de manera que quede apoyada sobre los cartones. Ahora, la tira del electroscopio *I* desciende ligeramente, mientras que la del electroscopio *II* asciende ligeramente, figura 6.33 (b). Al final del procedimiento, las dos tiras estarán a la misma altura, pero más bajas que en la situación ilustrada en la figura 6.33 (a).

Hay dos precauciones esenciales para que este experimento tenga éxito. La primera es que no debemos tocar los cartones, el palito de madera o el alambre con las manos. La segunda es que el palito o el alambre deben estar envueltos en dos o tres pajitas de plástico, ya que no todas las pajitas son buenos aislantes. En consecuencia, podemos descargar el electroscopio *I* parcial o totalmente a través de nuestro cuerpo colocando el palito sobre los cartones. Las cargas eléctricas del electroscopio *I* irán hacia el palito, pasarán a través de la pajita y luego se descargarán a través de nuestro cuerpo. Al colocar dos o tres pajitas unas dentro de otras, aumentamos el aislamiento del sistema. Si tiene dificultades para encajar las pajitas unas dentro de otras, puede utilizar cualquier otro aislante que haya encontrado para sostener el palito de madera (véase la subsección 6.3.2).

En el experimento 6.30, no se produjo ninguna transferencia de carga eléctrica entre los electroskopios *I* y *II* cuando se conectaron mediante una pajita de plástico. Por el contrario, en el experimento 6.31, observamos que cuando el electroscopio *I* pierde un poco de su carga, el electroscopio *II* la gana.

Estas experiencias ilustran cualitativamente la conservación de las cargas eléctricas. Cuando dos cuerpos conductores del mismo tamaño y forma, cargados por igual, se tocan, no se descargan. Por el contrario, cuando están cargados de forma opuesta,

los dos conductores se descargan mutuamente y permanecen neutros tras el contacto. Si solo uno de ellos está cargado inicialmente, el contacto con el segundo conductor desencadena una transferencia de carga del cuerpo electrizado al cuerpo neutro. Al final de este proceso, los dos conductores se electrizan con cargas del mismo signo.

6.10 Gray y la conservación de las cargas eléctricas

Gray fue quizás el primero en observar experimentalmente este tipo de efectos en 1735. Colgó a un niño de hilos de seda para que pudiera acostarse boca abajo. A un lado del niño había un hombre de pie sobre un soporte aislante hecho de goma laca¹⁰ y resina. Al otro lado del niño había un segundo hombre que sostenía un «hilo pendular». Se trataba de una especie de electroscopio inventado por Gray. Probablemente se trataba de un simple hilo de lino o algodón atado a un palito de madera. Al ser un hilo conductor, era atraído por un cuerpo cargado cercano (el niño en este ejemplo). El ángulo de inclinación del hilo pendular con respecto a la vertical sería un indicador del grado de electrización del cuerpo cercano. Gray ya había mencionado este tipo de electroscopio anteriormente.¹¹ El segundo hombre del experimento de Gray probablemente estaba en contacto directo con el suelo, ya que no estaba aislado. Gray frotó un tubo de vidrio con las manos y lo acercó a los pies del niño. Tras este procedimiento, el niño atrajo el hilo del electroscopio que sostenía el segundo hombre. A continuación, el niño acercó su dedo al hombre que estaba de pie sobre la resina. Se produjo una descarga eléctrica y el niño perdió parte de su poder de atracción (como indica la disminución del ángulo de inclinación del electroscopio). Al mismo tiempo, el hombre que estaba de pie sobre la resina se electrizó, atrayendo el hilo del electroscopio.

Citamos los pasajes pertinentes de este experimento crucial:^{12,13}

El 6 de mayo [de 1735], realizamos el siguiente experimento. Con el niño suspendido de los hilos de seda y el tubo [de vidrio frotado] colocado cerca de sus pies, como de costumbre, al acercar la punta de su dedo a la mano de un caballero, que estaba sobre un bloque de laca de concha y colofonia negra, otro caballero se colocó al otro lado del niño con el hilo colgante; entonces se le pidió al niño que acercara el dedo a la mano del primer caballero, tras lo cual se pinchó y se oyó un chasquido; al mismo tiempo, el hilo, que por su atracción se dirigía hacia el niño, cayó hacia atrás, ya que el niño había perdido gran parte de su atracción, y

¹⁰Véase el anexo A.

¹¹[Gra31b, p. 228], [Gra31c, p. 289], y [Gra35b, pp. 167–168]. Véase también la sección 4.9.

¹²[Gra35b, p. 168].

¹³May the 6th [of 1735], we made the following Experiment. The Boy being suspended on the Silk Lines, and the [rubbed glass] Tube being applied near his Feet as usual, upon his holding the End of his Finger near a Gentleman's Hand, that stood on a Cake made of Shell Lack and black Rosin; at the same time another Gentleman stood at the other side of the Boy with the pendulous Thread; then the Boy was bid to hold his Finger near the first Gentleman's Hand, upon which it was prick'd, and the snapping Noise was heard; and at the same time, the Thread which was by its attraction going towards the Boy fell back, the Boy having lost a great part of his attraction, upon a second moving his Finger to the Gentleman's Hand, the attraction ceased; then the Thread being held near that Gentleman, he was found to attract very strongly; but having since repeated this Experiment, I find that though the attraction of the Boy is much diminished, yet he does not quite lose it, till 2, 3, and sometimes 4 applications of his Finger to the hand of him that stands on the Electric Body, but without touching him.

al mover el dedo por segunda vez hacia la mano del caballero, la atracción cesó; entonces, al sostener el hilo cerca de ese caballero, se comprobó que atraía con mucha fuerza; pero, tras repetir este experimento, descubrí que, aunque la atracción del niño había disminuido mucho, no la perdía del todo hasta que aplicaba su dedo dos, tres y, a veces, cuatro veces a la mano del que estaba de pie sobre el cuerpo eléctrico, pero sin tocarlo.

La idea de la conservación de la carga estaba implícita en las concepciones de varios científicos que trabajaban en el campo de la electricidad. Gray nos ofrece el primer experimento que demuestra este hecho de manera cualitativa. Benjamin Franklin (1706–1790) fue uno de los primeros en explorar con éxito el concepto de conservación de la carga entre 1745 y 1747.¹⁴

6.11 Una breve historia del electroscopio y el electrómetro

El método más antiguo para determinar si un cuerpo estaba cargado o era neutro consistía en acercarlo a sustancias ligeras, como en el experimento sobre el efecto del ámbar. Más tarde, se desarrollaron instrumentos más sensibles para detectar esta propiedad de los cuerpos: el perpendículo de Fracastoro, el versorio de Gilbert y el hilo pendular de Gray. En todos estos casos, era necesario reducir la distancia entre el cuerpo frotado y uno de estos instrumentos para observar cómo reaccionaba el instrumento ante la presencia del cuerpo, ya fuera un trozo de ámbar o una pajita de plástico.

En general, no hay diferencias visibles entre un cuerpo neutro y un cuerpo cargado. Un trozo de ámbar, por ejemplo, no cambia ni de color ni de forma cuando se carga. Por lo general, solo podemos detectar si está cargado o no por los efectos que provoca en las sustancias cercanas o en un instrumento sensible colocado cerca. Cuando un péndulo eléctrico se aleja de otros cuerpos, cuelga verticalmente, esté cargado o no. Solo cuando lo acercamos a otras sustancias podemos detectar, gracias al ángulo del cordón del péndulo con respecto a la vertical, si el péndulo está cargado o es neutro.

En esta obra, llamamos «electroscopio» a un instrumento que, cuando se conecta a un cuerpo, indica automáticamente si este cuerpo está cargado o no. Debe indicar esta electricidad automáticamente, de modo que no necesitemos tocar el electroscopio ni realizar ningún otro procedimiento. Incluso cuando este instrumento no está conectado a ningún otro cuerpo, es posible saber si el electroscopio mismo está cargado o no. En este sentido, el electroscopio es un instrumento diferente del versorio y del péndulo eléctrico.

Un instrumento debe poseer dos propiedades principales para ser considerado un electroscopio. (a) La primera es que el electroscopio debe estar aislado eléctricamente del suelo. En su defecto, el cuerpo al que está fijado el electroscopio debe estar aislado del suelo. Este aislamiento eléctrico es esencial. Sin esta propiedad, el electroscopio no puede conservar la carga adquirida. En lo que respecta a los electroscopios utilizados en esta obra, este aislamiento se consigue sosteniendo el cartón fino con la pajita de

¹⁴[Hei99, pp. 327–333].

plástico neutra. (b) La segunda propiedad es que el electroscopio debe tener una parte visible que cambie de estado según si el electroscopio está neutro o cargado. En los electroscopios presentados en esta obra, esta propiedad es el ángulo entre la tira de papel móvil y el cartón fino fijo. En los electroscopios clásicos, este estado se indica mediante el ángulo entre las dos hojas móviles.

El primer electroscopio que presentaba estas dos propiedades fue construido por Du Fay en 1737.¹⁵ Antes de Du Fay, Gray ya había utilizado un hilo de algodón o lino atado a un palito para indicar si un cuerpo cercano estaba cargado. Pero para indicar la carga del cuerpo cercano, era necesario acercar el palito al cuerpo y observar si el hilo se inclinaba hacia él. Du Fay, por su parte, comenzó a colgar hilos doblados por la mitad sobre el cuerpo. Cuando este estaba cargado, las dos mitades de cada hilo se separaban entre sí, formando una letra V invertida. El ángulo de separación entre las dos mitades aumentaba con la cantidad de carga del cuerpo. En el primer experimento en el que describió este nuevo procedimiento,¹⁶ colgó una barra de hierro en horizontal con cordones de seda. Estos cordones aislaban la barra del suelo. En la barra, colgó varios hilos de la misma longitud, pero de diferentes materiales: lino, algodón, seda y lana. Cada hilo estaba doblado por la mitad, con sus puntos centrales sostenidos por la barra. Después de electrizar la barra, observó que las dos mitades de cada hilo se alejaban una de otra. Además, el ángulo de separación era mayor en el hilo de lino, seguido del algodón, la seda y la lana, que presentaba el ángulo de separación más pequeño. Pensó que este hecho indicaba que el lino tenía una mayor capacidad para acumular materia eléctrica que las otras sustancias.

A continuación, presentó la siguiente descripción sumamente interesante:^{17, 18}

Una aguja de hilo colocada sobre una barra de hierro suspendida por cordones de seda presenta la idea del experimento más simple de todos, sin embargo, puede dar lugar a profundas reflexiones y sirve para confirmar la mayoría de los principios que establecí en mis memorias anteriores, tanto sobre la comunicación de la electricidad y sus efectos de repulsión y atracción, como sobre la realidad de los dos tipos de electricidad, a saber, la vitrea y la resinosa. También sirve para saber si la fuerza de la electricidad es mayor o menor, lo que resulta muy útil en la práctica de todos estos experimentos; para ello, basta con colocar el extremo del hilo sobre la barra, como dijimos, y se verá entonces que los dos extremos que

¹⁵[DF37b, pp. 94–98].

¹⁶[DF37b, pp. 95–96].

¹⁷[DF37b, p. 98].

¹⁸Une aiguillée de fil posée sur une barre de fer suspendue par des cordons de soye, présente l'idée de la plus simple de toutes les expériences, cependant elle peut fournir de sujet à des méditations profondes, & elle sert à confirmer la plupart des principes que j'ai établis dans mes Mémoires précédents, tant sur la communication de l'électricité & ses effets de répulsion & d'attraction, que sur la réalité des deux genres d'électricité, sçavoir la Vitree & la Résineuse. Elle sert aussi à connoître si la force de l'électricité est plus ou moins grande, ce qui est très-commode dans la pratique de toutes ces expériences; il ne s'agit pour cela que de poser sur la barre le bout de fil, comme nous l'avons dit, on verra pour lors les deux bouts qui pendent librement d'un côté & de l'autre de la barre s'écarter l'un de l'autre avec plus ou moins de force, & former un angle plus ou moins grand, suivant que la barre aura reçu du tube [en verre frotté] plus ou moins de vertu électrique, & cela fera connoître d'une manière assés exacte, le degré de force de l'électricité, de sorte que l'on pourra choisir le temps & les circonstances les plus favorables pour les expériences qui demandent la plus forte électricité, telles que sont celles qui concernent la lumière, ou la communication le long d'une corde ou d'un autre corps continu.

cuelgan libremente a un lado y otro de la barra se separan entre sí con mayor o menor fuerza, y forman un ángulo más o menos grande, según la barra haya recibido del tubo [de vidrio frotado] más o menos virtud eléctrica [En la figura 6.34 se muestra una ilustración de un experimento de este tipo], & esto permitirá conocer con bastante exactitud el grado de fuerza de la electricidad, de modo que se podrán elegir el momento & las circunstancias más favorables para los experimentos que requieran la electricidad más fuerte, como los relacionados con la luz o la comunicación a lo largo de un cordón u otro cuerpo continuo.

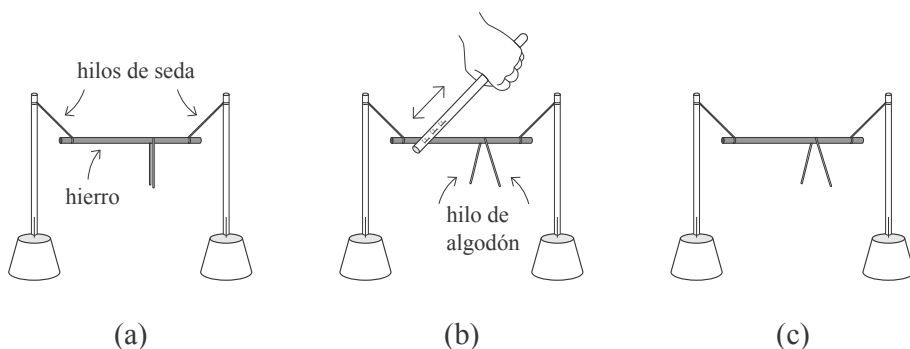


Figura 6.34: El electroscopio de Du Fay. (a) Barra de hierro sostenida por cordones de seda. Un hilo de algodón cuelga de la barra. (b) Un tubo de vidrio frotado se raspa contra la barra. (c) Cuando retiramos el vidrio, las dos mitades del hilo de algodón se separan entre sí.

El experimento de Du Fay es similar a nuestro experimento 6.9, representado en la figura 6.12. Al aumentar la cantidad de carga en el electroscopio, aumentamos el ángulo de separación de las tiras.

Du Fay también utilizó su electroscopio para descubrir qué cuerpos son los mejores aislantes. Para ello, colgó una barra de hierro de hilos hechos de diferentes sustancias, o colocó la barra de hierro sobre cuerpos sólidos hechos de diferentes materiales. Tras esta preparación, cargó la barra de hierro con ayuda de un tubo de vidrio previamente frotado. A continuación, observando el ángulo de su electroscopio conectado a la barra, anotó qué sustancia permitía que la barra permaneciera cargada durante más tiempo. Esa sustancia (los hilos de los que colgaba la barra o el soporte rígido bajo la barra que la mantenía por encima del suelo) era entonces el mejor aislante.¹⁹

Jean Antoine Nollet (1700–1770), figura 6.35, fue asistente de Du Fay durante algunos años, desde 1731 o 1732 hasta aproximadamente 1735.²⁰

En 1747, Nollet presentó una mejora del electroscopio de Du Fay. Los hilos abiertos, en forma de letra V invertida, estaban conectados directamente al cuerpo cargado. Una lámpara iluminaba los hilos y proyectaba su sombra sobre una pantalla graduada donde se podía leer directamente el ángulo formado por los hilos. Esto permitía una

¹⁹[DF37b, p. 99].

²⁰[Hei81e] y [Hei99, pp. 279–289].



Figura 6.35: Jean Antoine Nollet (1700–1770).

gran precisión en la determinación de estos ángulos, ya que la pantalla y el observador podían estar alejados del electroscopio para no afectar a la lectura, figura 6.36.²¹

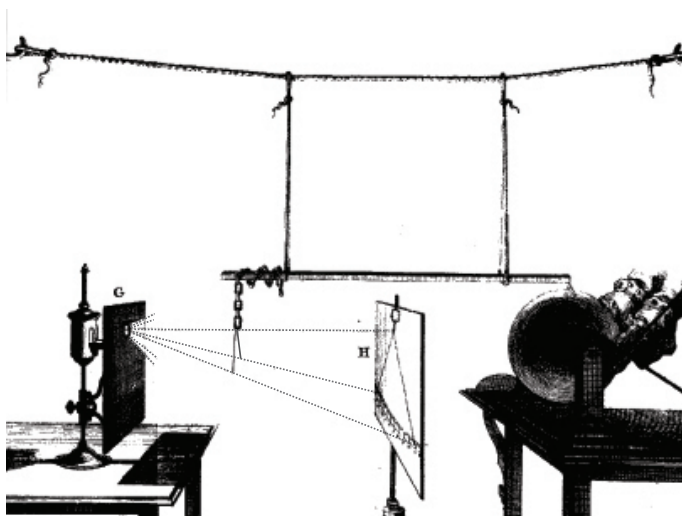


Figura 6.36: Un electrómetro de Nollet.

Nollet dio un nombre a este instrumento: el «electrómetro»:^{22,23}

En muchas ocasiones, para conocer los avances de la electricidad, utilicé un método bastante sencillo que merecería el nombre de «electrómetro», si fuera de aplicación general y sirviera para medir, mediante cantidades bien conocidas e indudables, los aumentos o disminuciones que indica.

²¹ [Nol47, p. 129] y [Hei99, p. 353].

²² [Nol47, p. 129]

²³ Dans bien des occasions je me suis servi, pour connoître les progrès de l'électricité, d'un moyen assez simple & qui méritoit le titre d'*électromètre*, s'il étoit généralement applicable, & s'il pouvoit servir à mesurer par des quantités bien connues, & dont on ne pût douter, les augmentations ou diminutions qu'il indique.

Este nombre es apropiado, ya que este instrumento permite medir cuantitativamente un ángulo. Y el valor de este ángulo está relacionado con la electricidad del cuerpo al que está conectado. El electrómetro es un electroscopio que permite medir con precisión una propiedad cuantitativa, como el ángulo en este caso, asociada a la electricidad.

En la figura 6.37 se muestra otro ejemplo de sus electrómetros.²⁴

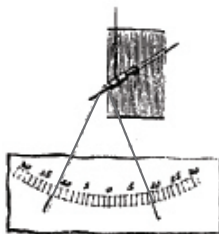


Figura 6.37: Otro electrómetro fabricado por Nollet.

Para evitar pérdidas de electricidad en los extremos de los hilos de cualquier electroscopio, estos se terminaban con pequeñas bolas ligeras fabricadas con médula de saúco o corcho. Uno de los científicos responsables de esta innovación fue John Canton, entre 1752 y 1754.²⁵ La figura 6.38 muestra el electroscopio de Canton.

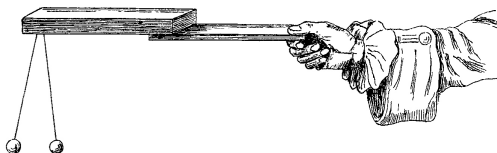


Figura 6.38: El electroscopio de Canton.

Más tarde, los hilos de lino fueron sustituidos por pajitas rígidas y hojas metálicas. Estas eran más duraderas y permitían determinar con mayor precisión el ángulo de apertura. Abraham Bennet (1750–1799) y Alessandro Volta (1745–1827) fueron importantes científicos que contribuyeron a estos avances. El electrómetro de Bennet, con sus dos hojas de oro, se muestra en la figura 6.39.²⁶

Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) creó entre 1744 y 1753 un electrómetro en el que una de las pajitas es fija con respecto al suelo y solo una pajita o tira se aleja de la vertical cuando el electroscopio está cargado, figura 6.40.²⁷ Esto es análogo al electroscopio de la figura 6.1, que se utiliza en la mayoría de los experimentos de este libro.

²⁴ [Nol67, Planche 4, Figure 15].

²⁵ [Can53a], [Can53b] y [Wal36].

²⁶ [Ben87] y [Hei99, p. 450].

²⁷ [Hei99, p. 392].

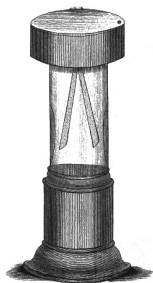


Figura 6.39: El electrómetro de Bennet.

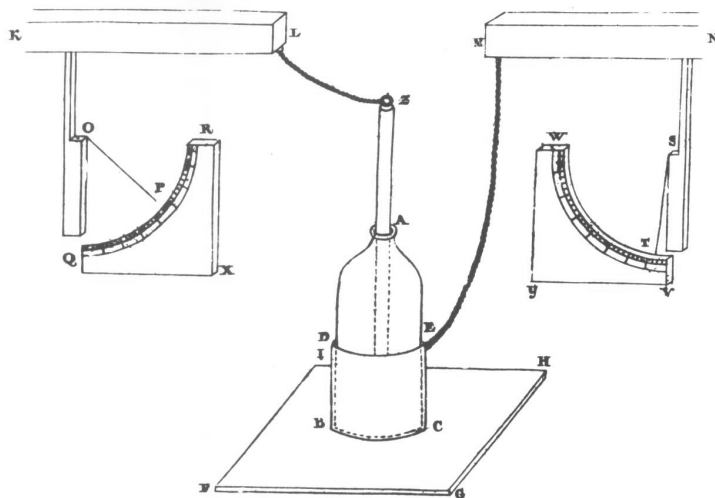


Figura 6.40: Los electrómetros de Richmann conectados a una botella de Leiden. Cada uno de los electrómetros está equipado con una sola tira móvil.

Este tipo de electrómetro fue desarrollado posteriormente por William Henley (fecha de nacimiento desconocida, fallecido en 1779) en 1772, figura 6.41.²⁸ Consta de una única varilla móvil ligera *A*, con una bola de corcho en su extremo, diseñada para girar alrededor del centro *B*. Cuando el electrómetro está cargado, se produce una repulsión entre la varilla móvil *A* y la varilla fija *C*. El ángulo de apertura se puede leer en el transportador conectado al instrumento.

Para más detalles sobre la historia del electoscopio y el electrómetro, véanse los trabajos de Walker, Heilbron y Medeiros.²⁹

²⁸[Pri72].

²⁹[Wal36], [Hei99, pp. xvi, xx, 82, 259, 327, 331, 353, 367, 373–376, 390–392, 418, 421–422, 447–456, 462 y 491–494] y [Med02].

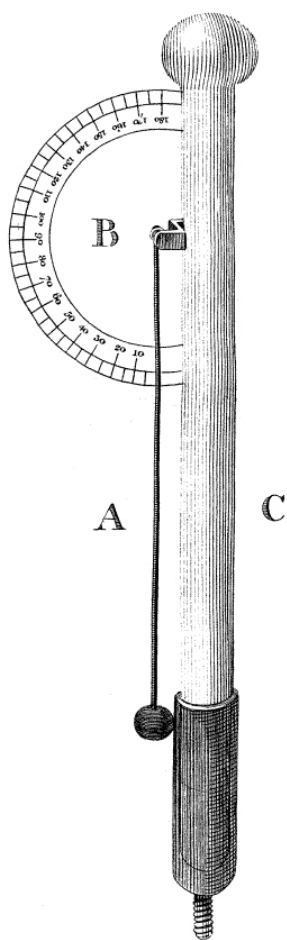


Figura 6.41: El electrómetro de Henley.

Capítulo 7

Las diferencias entre conductores y aislantes

7.1 La movilidad de las cargas sobre los conductores y los aislantes

Vimos que la principal propiedad de un aislante como el plástico es que no deja pasar el flujo de cargas eléctricas. Por lo tanto, no descarga un electroscope cargado. Un conductor, por el contrario, permite el paso de las cargas a través de él. El cuerpo humano, el suelo, un metal, una hoja de papel o el cartón fino de un electroscope son ejemplos de conductores. Por lo tanto, cuando un electroscope cargado se conecta al suelo mediante un conductor, se descarga. A continuación, examinaremos otras propiedades que distinguen a los conductores de los aislantes.

Experimento 7.1

Recortamos una tira rectangular de cartón fino, de 30 cm de largo y 2 cm de ancho. La superficie de la tira será vertical, con su lado más largo paralelo al horizonte. Fijamos el extremo superior de una pajita de plástico vertical en el centro de la tira, formando así una letra *T*. El extremo inferior de la pajita debe fijarse a un soporte adecuado, como plastilina o el soporte del péndulo eléctrico, como en la sección 4.4. A continuación, colgamos cuatro tiras muy finas de papel de seda, de 10 cm de largo, repartidas a lo largo de la tira de cartón fino. Deben doblarse por la mitad, de modo que las dos mitades queden colgadas una al lado de la otra en vertical. Después de este procedimiento, frotamos otra pajita de plástico. Debe rasparse una o varias veces sobre el cartón fino horizontal, para cargarlo. Retiramos la pajita frotada. Todas las tiras de papel de seda se abren hacia fuera, alejándose cada mitad de la otra.

El mismo experimento se puede repetir con una tira de cartón fino más grande, por ejemplo, de 60 cm de largo. Para ello, podemos fijar dos pajitas de plástico verticales equidistantes, una a una distancia de 20 cm de un extremo del cartón y la otra a una distancia de 20 cm del otro extremo. Extendemos varias tiras muy finas de pa-

pel de seda sobre el borde horizontal superior de la tira ancha de cartón fino, como si fueran varios electros copios. Cuando cargamos el cartón fino raspándolo con una pajita, todas las finas tiras de papel de seda se abren. En lugar de una tira de cartón fino rectangular, también podemos utilizar un alambre de cobre duro.

Ahora construimos una T de las mismas dimensiones, pero solo de plástico. La parte superior horizontal de la T puede ser una regla de plástico (con su plano vertical) o una serie de pajitas de plástico unidas entre sí por sus extremos adyacentes. Colgamos las finas tiras de papel de seda sobre la parte superior de la T , repartidas a lo largo de toda su longitud. Frotamos otra pajita de plástico y la raspamos sobre el borde superior de la T de plástico. En este caso, las finas tiras de papel de seda no abren sus patas, excepto las que están cerca de la zona raspada.

Experimento 7.2

Recortamos un disco de cartón fino con un diámetro de 20 cm. El disco permanecerá en posición horizontal, sostenido por pajitas de plástico colocadas verticalmente en los puntos adecuados debajo del mismo. Con unas tijeras o una perforadora de un solo agujero, hacemos varios pares de agujeros a lo largo del diámetro del disco, con los dos agujeros de cada par muy próximos entre sí. A continuación, pasamos una sola tira fina de papel de seda a través de cada par de agujeros de manera que cuelgue en el centro, con cada mitad pasando a través de un agujero y enfrentada a la otra mitad. Otra posibilidad es fijar las tiras como una letra L pegada en la parte inferior del disco. Dos tiras una al lado de la otra formarán una letra T , cuya parte vertical estará compuesta por dos tiras suspendidas verticalmente una al lado de la otra en el disco. Frotamos otra pajita de plástico y la raspamos a lo largo de un borde del disco. Las tiras de papel de seda abren sus patas. Esto también ocurre con las tiras situadas lejos de la zona que fue raspada.

El mismo efecto no se produce con un disco de plástico. En este caso, las tiras de papel de seda alejadas de la zona raspada no se abren después de frotar el disco de plástico con una pajita frotada. Solo las que están cerca de la zona raspada se separan unas de otras.

Estas experiencias demuestran que cuando cargamos un conductor, las cargas tienden a distribuirse por toda su superficie. En un aislante, por el contrario, no se desplazan libremente a lo largo de su superficie, sino que permanecen fijadas al lugar donde se generaron o transferieron al aislante. El mismo efecto se observó en el experimento 6.25.

7.2 Los colectores de carga

Nuestro siguiente instrumento eléctrico es un colector de carga. Se utiliza para obtener una pequeña cantidad de carga de cualquier zona de un cuerpo electrizado. Al mover esta carga recogida cerca de péndulos previamente cargados positiva y negativamente, o de electros copios previamente cargados, es posible determinar el signo de la carga recogida. La intensidad de las atracciones y repulsiones generadas en los

péndulos y electros copios también indica si la carga recogida es grande o pequeña. Aunque un péndulo eléctrico o un electros copio también pueden utilizarse como colectores de carga, utilizaremos este término para referirnos a los instrumentos diseñados específicamente para este fin. Un colector de carga también puede utilizarse para transportar la carga entre dos conductores separados en el espacio.

El colector más sencillo es una bola de papel de aluminio suspendida del extremo de un hilo de seda o nailon, cuyo otro extremo está unido a una pajita de plástico, figura 7.1. La bola también puede estar hecha de papel u otro conductor adecuado. La seda es un aislante, por lo que impide cualquier descarga de la electricidad recogida. Al aumentar el diámetro de la esfera, aumentamos la cantidad de carga que recogerá en cualquier experimento.

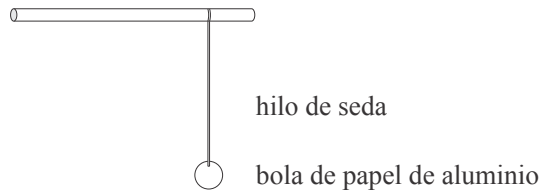


Figura 7.1: Un colector de carga.

Un segundo modelo similar al anterior está compuesto por una bola de papel de aluminio fijada al extremo de una pajita de plástico, figura 7.2. La principal diferencia con el modelo anterior reside en la rigidez de la pajita. Esta permite recoger las cargas situadas en la parte superior o en los laterales de los conductores cargados, sujetando la pajita por debajo o por un lado. De este modo, podemos controlar mejor el lugar al que transportamos la bola de papel de aluminio.

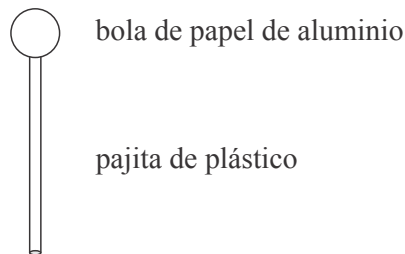


Figura 7.2: Otro colector de carga.

Otro modelo consiste en una tira de papel de aluminio fijada al extremo de una pajita de plástico. Esta tira puede medir, por ejemplo, 5 cm de largo y 2 mm de ancho. La pegamos alrededor del extremo de la pajita, figura 7.3.

El colector de carga más antiguo construido exclusivamente para este fin fue fabricado posiblemente por F. U. T. Aepinus (1724–1802). No se conoce ningún retrato de Aepinus.¹ Su colector de carga era simplemente un pequeño trozo de metal de unos

¹[Aep79, p. 62].

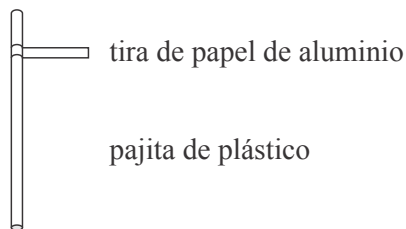


Figura 7.3: Un tercer modelo de colector de carga.

3.8 cm de largo con un pequeño gancho en el centro al que ataba un hilo de seda bien seco. Describió este instrumento y varios experimentos interesantes realizados con él en una obra publicada en latín en 1759, «Ensayo sobre la teoría de la electricidad y el magnetismo».²

Otro modelo fue inventado por Charles Augustin Coulomb (1736–1806) en 1787, y se denominó «plano de prueba», figura 7.4.³ Coulomb conocía los trabajos de Aepinus y los citó en sus artículos.

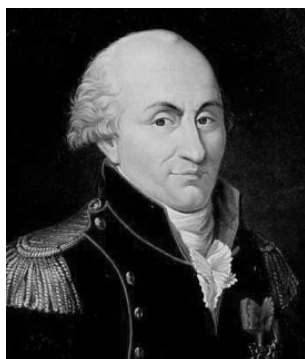


Figura 7.4: Charles-Augustin Coulomb (1736–1806).

El plano de prueba es un disco conductor fijado por su centro a un mango aislante. Coulomb lo utilizó para determinar la distribución de la carga en las superficies de dos o tres conductores cargados por contacto. La cantidad de carga recogida por el plano de prueba es proporcional a la densidad local de carga en la superficie. El modelo que utilizamos aquí es un disco de cartón fino de 3 cm de diámetro. Podemos colocar una tira de papel de aluminio en una de sus caras, pero no es imprescindible. Cortamos un trozo de pajita de plástico de 5 cm de largo. Se fijará en ángulo recto en el centro del disco, como si se tratara del eje de simetría. Uno de los extremos de la pajita se puede fijar al centro del disco con plastilina, figura 7.5. Cuando manipulamos el plano de prueba, debemos tocar solo la pajita, pero no la plastilina ni el disco.

²[Aep79, pp. 312–314].

³[Hei99, p. 495]. Los principales trabajos de Coulomb sobre la torsión, la electricidad y el magnetismo fueron traducidos recientemente al portugués y al inglés, [Ass22] y [AB23].

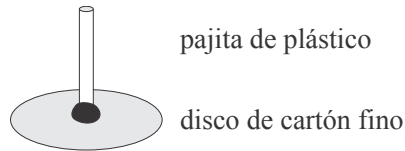


Figura 7.5: El plano de prueba de Coulomb. También se trata de un colector, pero se denominará «plano de prueba» para mayor claridad al describir los siguientes experimentos.

Estos colectores de carga se utilizarán en algunos de los experimentos que se describen a continuación.

7.3 La polarización eléctrica de los conductores

Experimento 7.3

En el experimento 6.12 vimos que el cartón fino es un conductor, mientras que el plástico es un aislante. Utilizamos esta propiedad para construir un conductor aislado: un disco horizontal de cartón fino de 15 cm de diámetro sostenido por cuatro pajitas de plástico verticales fijadas a soportes adecuados, como los soportes de los péndulos eléctricos. Colocamos tres planos de prueba de Coulomb en la parte superior del disco, alineados a lo largo de un diámetro del disco, uno en el centro y los otros dos cerca de los bordes opuestos. Los llamamos 1, 2 y 3, siendo el segundo plano de prueba el que está en el centro del disco. Al principio, tocamos el disco con el dedo para descargarlo. Ahora comenzamos el experimento para estudiar la distribución de las cargas en este disco en presencia de otros cuerpos cargados cercanos. Para ello, primero cargamos dos electros copios, uno positivamente y otro negativamente. Los colocamos lejos uno del otro y lejos de este disco horizontal. También utilizaremos un tercer electroscopio descargado.

Cargamos una pajita negativamente en toda su longitud frotándola con el cabello. A continuación, debe colocarse verticalmente sobre un soporte adecuado. El centro de esta pajita debe estar a la misma altura que el plano horizontal del disco. La pajita frotada se acerca al disco, sin tocarlo, cerca del plano de prueba 1, figura 7.6. Entonces se encontrarán en el siguiente orden: pajita negativa, planos de prueba 1, 2 y 3, respectivamente. La pajita negativa debe estar a unos 2 cm del borde más cercano del disco. Retirar el plano de prueba 2 y acercarlo al electroscopio descargado. No ocurre nada, lo que indica que es eléctricamente neutro. Podemos volver a colocarlo en su posición inicial. Ahora retiramos el plano de prueba 1 y lo acercamos lentamente al electroscopio descargado, sin tocarlo. La tira de este electroscopio es atraída por este plano de prueba, lo que indica que el plano de prueba está cargado. A continuación, lo acercamos lentamente a los electros copios negativo y positivo, asegurándonos, como siempre, de que no entren en contacto. El plano de prueba cargado atrae la tira del electroscopio negativo y repele la tira del electroscopio positivo. A partir de estos hechos, concluimos que el plano de prueba 1 se cargó positivamente debido a la

presencia de la pajita negativa en las proximidades. A continuación, lo volvemos a colocar en su ubicación original sobre el disco horizontal. Ahora retiramos el plano de prueba 3 y repetimos estos procedimientos, concluyendo que se cargó negativamente.

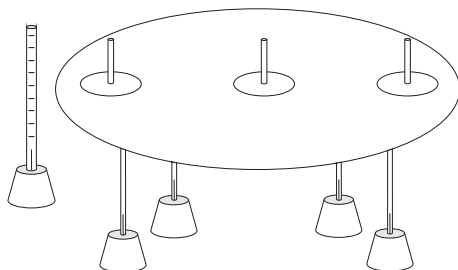


Figura 7.6: Experimento destinado a mostrar la distribución de cargas en un conductor en presencia de cuerpos electrizados cercanos.

Experimento 7.4

Repetimos el experimento 7.3, pero esta vez colocamos la pajita cargada negativamente a unos 5 cm del borde más cercano. Una vez más, esta pajita negativa se alinea con los planos de prueba de Coulomb en el siguiente orden: pajita negativa, planos de prueba 1, 2 y 3, respectivamente. Cuando realizamos el procedimiento anterior, no encontramos ninguna carga en el plano de prueba 2. El plano de prueba 1 vuelve a estar cargado positivamente, pero con una cantidad de carga menor que la del plano de prueba 1 del experimento 7.3. Esto se indica por las fuerzas de atracción y repulsión que ejerce respectivamente sobre los electroscopios negativos y positivos. Estas fuerzas son menos intensas en el presente experimento que las fuerzas análogas ejercidas por el plano de prueba 1 en el experimento 7.3. Después de volver a colocar este primer plano de prueba en su ubicación original sobre el disco, retiramos el plano de prueba 3 y comprobamos su carga. Una vez más, resulta estar cargado negativamente, pero con una carga menor que el plano de prueba 3 del experimento 7.3. Esto se indica por las fuerzas repulsivas y atractivas más débiles que ejerce respectivamente sobre los electroscopios negativo y positivo.

Podemos repetir el experimento 7.3, colocando cada vez la pajita negativa más lejos del disco. Cuanto más lejos esté, menor será la cantidad de cargas opuestas recogidas por los planos de prueba 1 y 3. Cuando la pajita negativa se encuentra a 20 cm del borde más cercano del disco, o incluso más lejos, los planos de prueba no recogen ninguna carga detectable en estos experimentos.

Experimento 7.5

Repetimos el experimento 7.3. Observaremos las fuerzas ejercidas por los planos cargados sobre los electroscopios neutros, positivos y negativos cuando la pajita negativa se encuentra a unos 2 cm del borde del disco.

A continuación, colocamos 2 o 3 pajitas cargadas negativamente una al lado de la otra, cada una en su propio soporte. Sus extremos también pueden unirse entre sí y colocarse todos juntos en un solo soporte. Este conjunto de 2 o 3 pajitas debe colocarse de nuevo a unos 2 cm del borde del disco. Las pajitas deben tener aproximadamente la misma carga, ya que se frotaron con cabello durante el mismo tiempo. Repetimos el experimento 7.3 y observamos que el plano de prueba 1 vuelve a estar cargado positivamente, como antes. Pero ahora ejerce una fuerza de atracción mucho mayor sobre la tira del electroscopio neutro que la fuerza de atracción ejercida por el plano de prueba 1 del experimento 7.3. También ejerce una fuerza de atracción mayor sobre la tira del electroscopio negativo y una fuerza de repulsión mayor sobre la tira del electroscopio positivo. Por esta razón, concluimos que este plano de prueba tiene una carga mayor que la carga recogida por el plano de prueba 1 en el experimento 7.3. Las intensidades de las fuerzas ejercidas por el plano de prueba 3 sobre las tiras de los electroscopios en este experimento también son superiores a las fuerzas análogas ejercidas por el plano de prueba 3 en el experimento 7.3. Por lo tanto, concluimos que adquirió una mayor cantidad de carga negativa que el plano de prueba 3 en el experimento 7.3.

Experimento 7.6

Recortamos un cartón rectangular delgado cuyos lados miden 10 cm y 7 cm. Se colocará en un plano vertical, con el lado más largo en horizontal y el lado más corto en vertical. Fijamos una pajita vertical en el centro del rectángulo con cinta adhesiva. El extremo inferior de la pajita se fija a un soporte adecuado. A continuación, tocamos el rectángulo para descargarlo. Al igual que en el experimento 7.3, preparamos de antemano un electroscopio cargado positivamente y otro cargado negativamente. En este experimento, utilizamos la tira de papel de aluminio fijada a una pajita de plástico como colector de carga, como en la sección 7.2, figura 7.3. Cargamos negativamente otra pajita y la fijamos verticalmente a un soporte adecuado. Los dos electroscopios cargados, el rectángulo y la pajita cargada, están inicialmente bien separados entre sí.

Ahora acercamos la pajita cargada a uno de los bordes verticales del rectángulo, sin tocarlo. Cuando están muy cerca uno del otro, a 1 o 2 cm de distancia, raspamos la tira de aluminio del colector de arriba abajo sobre el otro borde vertical del rectángulo, figura 7.7. A continuación, acercamos esta tira a los dos electroscopios cargados, sin dejar que entren en contacto. Según las atracciones y repulsiones observadas en estos electroscopios, concluimos que la tira del colector se cargó negativamente.

Descargamos esta tira tocándola con el dedo. Ahora la raspamos de arriba abajo por el borde vertical del rectángulo más cercano a la pajita cargada, procurando que no toque la pajita. Cuando acercamos lentamente la tira a los dos electroscopios cargados, concluimos que la tira ahora está cargada positivamente.

Experimento 7.7

Repetimos el experimento 7.6, pero esta vez colocamos la pajita negativa a unos 5 cm del borde más cercano del rectángulo. Al repetir este procedimiento, observamos de nuevo que el lado del rectángulo más alejado de la pajita negativa se cargó

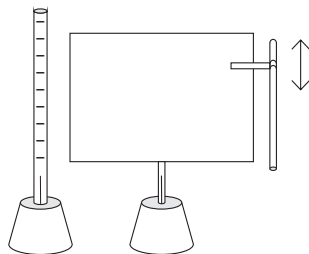


Figura 7.7: Estudio de la distribución de cargas en un conductor.

negativamente, mientras que el lado del rectángulo más cercano a la pajita negativa se cargó positivamente. Sin embargo, las cantidades de carga recogidas son inferiores a las recogidas en el experimento 7.6. Estas cantidades de carga pueden estimarse a partir de las fuerzas ejercidas por la tira cargada sobre los electoscopios positivo y negativo.

Cuando la pajita negativa se encuentra a 20 cm del borde más cercano del rectángulo, o incluso más lejos, la tira metálica no recoge ninguna cantidad apreciable de carga.

Experimento 7.8

Repetimos el experimento 7.6, pero esta vez colocamos 2 o 3 pajitas cargadas negativamente juntas, como en el experimento 7.5. Deberían tener aproximadamente la misma electrización, ya que se frotaron por igual con el cabello. Deberían estar a unos 1 o 2 cm de un lado del rectángulo. Después de repetir el mismo procedimiento que antes, observamos que la tira de papel de aluminio del colector adquirió una mayor cantidad de cargas positivas y negativas que las cargas recogidas en el experimento 7.6.

Estos experimentos demuestran que la presencia de la pajita frotada provoca una separación de cargas en el conductor vecino. La parte del conductor más cercana a la pajita frotada adquiere una carga de signo opuesto al de la pajita, mientras que la parte opuesta del conductor adquiere una carga del mismo signo que la de la pajita.

Definiciones: Este fenómeno y este proceso se denominan «polarización eléctrica o electrostática», «inducción eléctrica o electrostática», «influencia eléctrica o electrostática», «polarización por inducción», «polarización por influencia», «electrización por influencia», «electrización por inducción» o «electrización por comunicación». En este trabajo, utilizamos preferentemente la primera expresión, «polarización eléctrica».

Los experimentos 7.4 y 7.7 nos enseñan aún más. Podemos aumentar la cantidad de cargas inducidas a ambos lados del conductor reduciendo la distancia entre el conductor y la pajita frotada. Esto se representa en la figura 7.8.

Volvamos al experimento 4.5. La inclinación del péndulo con respecto a la vertical aumenta cuando disminuye la distancia entre la pajita frotada y el péndulo. Esto indica

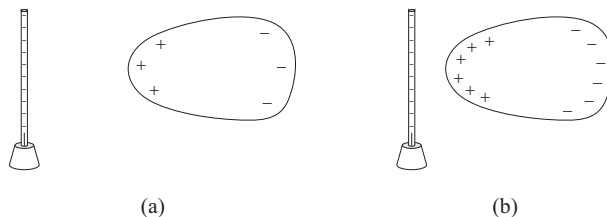


Figura 7.8: (a) La polarización de un conductor debido a la presencia de un aislante electrizado cercano. (b) Cuando reducimos la distancia entre estos cuerpos, aumenta la cantidad de cargas positivas y negativas inducidas en el conductor.

una mayor fuerza entre ambos. Según lo que acabamos de ver, podemos aumentar la polarización del disco acortando su distancia con respecto a la pajita electrizada, figura 7.9.

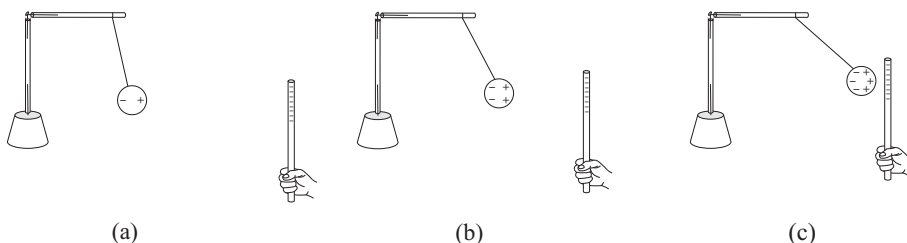


Figura 7.9: Al reducir la distancia entre una pajita frotada y un péndulo, aumentamos la polarización de las cargas inducidas en el disco conductor.

Los experimentos 7.5 y 7.8 también muestran algo interesante. También podemos aumentar la cantidad de cargas inducidas a ambos lados del conductor aumentando la cantidad de carga en el aislante electrizado cercano, figura 7.10.

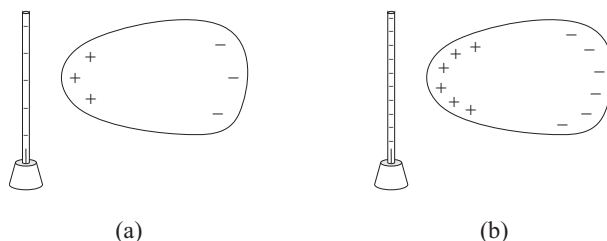


Figura 7.10: (a) La polarización de un conductor debido a un aislante electrizado situado en las proximidades. (b) Cuando aumentamos la electrización del aislante, aumenta la cantidad de cargas positivas y negativas inducidas en el conductor.

7.3.1 Aepinus y la polarización eléctrica

Uno de los científicos más importantes que se interesó por este tema fue Aepinus, entre 1755 y 1759.⁴ Aepinus realizó por primera vez un experimento similar al experimento 7.3, que describió en su obra de 1759.⁵ La figura 7.11 muestra una representación de uno de sus experimentos.

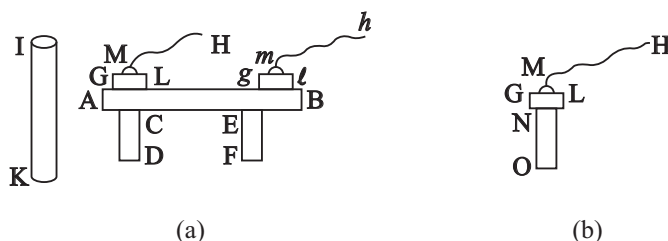


Figura 7.11: Experimento de Aepinus para demostrar la polarización de los conductores cercanos a cuerpos electrizados.

En lugar de un disco de cartón sostenido por pajitas de plástico, disponía de una varilla metálica AB de unos 30 cm de largo sobre soportes aislantes de vidrio CD y EF , figura 7.11 (a). Sus colectores de carga se describen en la sección 7.2. Se trataba de piezas metálicas GL y $g\ell$ de unos 3.8 cm de largo, provistas en el centro de pequeños ganchos M y m a los que se ataban hilos de seda bien secos HM y hm . Para los cuerpos cargados, en lugar de nuestra pajita frotada negativamente, utilizaba el cilindro electrizador IK . Podía tratarse de un cilindro de vidrio electrizado positivamente por fricción, o de un cilindro de azufre electrizado negativamente por fricción.

Probó las cargas inducidas en los extremos de la varilla metálica debido a la presencia de cada cilindro. De este modo, demostró la polarización del conductor. Para ello, tomó el cilindro electrizado por fricción, lo acercó al extremo A de la varilla, a una distancia de aproximadamente 2.5 cm, y lo mantuvo inmóvil en ese lugar. A continuación, levantó la pieza metálica GL con ayuda del hilo de seda HM y la colocó sobre el soporte de vidrio NO , figura 7.11 (b). Cuando acercó los cuerpos positivos y negativos a su colector de carga situado en NO , concluyó que este había adquirido una carga de signo opuesto al del cilindro electrizador. Cuando realizó la misma prueba con el otro colector de carga $g\ell$, concluyó que este había adquirido una carga neta del mismo signo que el cilindro electrizador. En otras palabras, los extremos A y B de la varilla conductora adquirieron cargas de signos opuestos, siendo la carga de B del mismo signo que el cilindro electrizador IK .

⁴[Aep79], [Hei81a] y [Hei99, pp. 384–402].

⁵[Aep79, pp. 312–314].

7.4 Las atracciones y repulsiones ejercidas por un cuerpo polarizado

Experimento 7.9

En este experimento utilizamos el rectángulo de cartón fino del experimento 7.6, un péndulo eléctrico y una pajita de plástico. Descargamos el rectángulo y el péndulo tocándolos con el dedo. Tras este procedimiento, los colocamos uno al lado del otro en el mismo plano, con el péndulo cerca del borde derecho B del rectángulo. La parte del disco más cercana al rectángulo debe estar a una distancia de entre 2 y 5 cm de este, figura 7.12 (a).

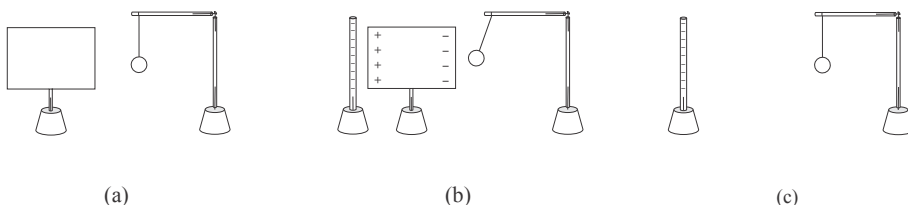


Figura 7.12: (a) Un péndulo neutro está suspendido verticalmente cerca de un rectángulo conductor neutro (borde izquierdo A y borde derecho B). (b) Cuando se acerca una pajita frotada a un borde del rectángulo, el péndulo es atraído por el otro borde. (c) Cuando retiramos el rectángulo, el péndulo vuelve a la posición vertical.

Cargamos negativamente una pajita de plástico frotándola a lo largo de todo su largo por el cabello y, a continuación, la fijamos verticalmente en un soporte. A continuación, la colocamos en el plano del rectángulo, en el lado opuesto al péndulo y alejado de él. A continuación, acercamos lentamente la pajita al borde izquierdo A del rectángulo. Cuando está lo suficientemente cerca, el péndulo se inclina hacia el rectángulo, figura 7.12 (b). No debemos acercar la pajita demasiado al rectángulo, para evitar cualquier contacto entre el disco y el rectángulo. Cuando retiramos la pajita, observamos que el péndulo vuelve a su orientación vertical.

Suponemos que la pajita frotada vuelve a estar cerca del rectángulo, de modo que el péndulo se inclina hacia el rectángulo, como en la figura 7.12 (b). Ahora retiramos el rectángulo, sin tocar la pajita ni el péndulo. El rectángulo debe retirarse en una dirección perpendicular a su plano. Una vez retirado el rectángulo, observamos que el péndulo vuelve a su orientación vertical, figura 7.12 (c).

Este experimento demuestra que el péndulo es atraído por el rectángulo polarizado y no por la pajita frotada, que está demasiado lejos del péndulo. La pajita electrizada es responsable de la polarización del rectángulo conductor, pero está demasiado lejos para tener un efecto notable sobre el péndulo.

Experimento 7.10

En este experimento utilizamos el rectángulo de cartón fino del experimento 7.6, un péndulo eléctrico y una pajita de plástico. Cargamos la pajita negativamente

frotándola a lo largo con el cabello y, a continuación, la colocamos verticalmente sobre el soporte. Cuando acercamos un péndulo neutro a la pajita frotada, observamos una atracción cuando están muy cerca uno del otro. Esto se traduce en una inclinación del disco del péndulo hacia la pajita frotada. Por el contrario, cuando la distancia entre la pajita frotada y el disco de papel del péndulo es superior o igual a unos 15 cm, el péndulo permanece vertical. Aunque la pajita frotada puede atraerlo, esta fuerza es tan débil que apenas se percibe, figura 7.13 (a).

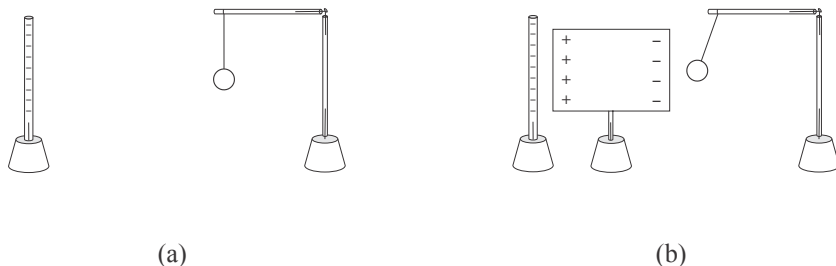


Figura 7.13: (a) Una pajita negativa a una distancia de 15 cm de un péndulo neutro. (b) Cuando colocamos un rectángulo conductor entre ellos, observamos que el péndulo es atraído por el rectángulo.

Supongamos ahora que la pajita frotada verticalmente y el hilo vertical del péndulo eléctrico neutro están separados por 15 cm, con el cartón rectangular alejado de ellos, como se muestra en la figura 7.13 (a). A continuación, colocamos el plano del cartón, de 10 cm por 7 cm, paralelo al plano que une la pajita y el hilo del péndulo, estando estos dos planos separados entre sí. Después, desplazamos el rectángulo en una dirección perpendicular a su plano, de manera que quede entre la pajita frotada y el péndulo, los tres en el mismo plano, figura 7.13 (b). Observamos que el péndulo es atraído por el rectángulo, inclinándose hacia él. Por ahora, evitaremos que entren en contacto.

Los experimentos 7.9 y 7.10 muestran un nuevo tipo de atracción. Hasta ahora, vimos cómo un cuerpo cargado (conductor o aislante) atrae a cuerpos neutros. En los casos presentes, por el contrario, la pajita frotada está alejada del péndulo y no lo atrae lo suficiente como para inclinarlo hacia ella. Pero en la sección 7.3, vimos que un rectángulo conductor se polariza cerca de la pajita frotada. Esta separación de cargas en el cuerpo del rectángulo se ilustra en la figura 7.13 (b). El rectángulo no tiene carga neta. La suma de sus cargas positivas (cerca de la pajita frotada) y sus cargas negativas (en el extremo más alejado) es cero. A pesar de este hecho, atrae un péndulo neutro colocado cerca de su lado negativo. Esto se indica mediante la inclinación del péndulo en la figura 7.13 (b). Como las cargas negativas del rectángulo están más cerca del disco del péndulo que las cargas positivas del rectángulo, el péndulo es atraído por el rectángulo. En otras palabras, la influencia de las cargas negativas cercanas al disco es mayor que la influencia opuesta de las cargas positivas lejanas.

Como se verá en el apéndice B, este nuevo tipo de atracción fue reconocido y descubierto como un fenómeno eléctrico típico por Stephen Gray en 1729. Aunque descubrió este nuevo tipo de atracción, no conocía la polarización del conductor y no tenía nuestra interpretación moderna de sus propios experimentos. La interpreta-

ción actual se debe esencialmente a Aepinus. Hay que tener en cuenta que, aunque el rectángulo conductor no tiene carga neta, puede atraer a otro cuerpo neutro II que se encuentre cerca de uno de sus lados, siempre que el rectángulo esté polarizado por un cuerpo cargado I situado cerca del otro lado del rectángulo.

Experimento 7.11

En este experimento volvemos a utilizar el rectángulo de cartón fino del experimento 7.6, un péndulo eléctrico y una pajita de plástico.

Frotamos la pajita con el cabello y cargamos el disco de papel del péndulo eléctrico con el mecanismo ACR, tal y como se describe en la sección 4.8. Cuando acercamos la pajita frotada al péndulo cargado, observamos una repulsión, como indica la inclinación del péndulo con respecto a la vertical. Por el contrario, cuando la distancia entre la pajita frotada y el disco de papel del péndulo es superior o igual a 15 cm, el péndulo permanece vertical. Aunque ambos están cargados negativamente, la fuerza de repulsión a esta distancia es demasiado débil para ser detectada fácilmente, figura 7.14 (a).

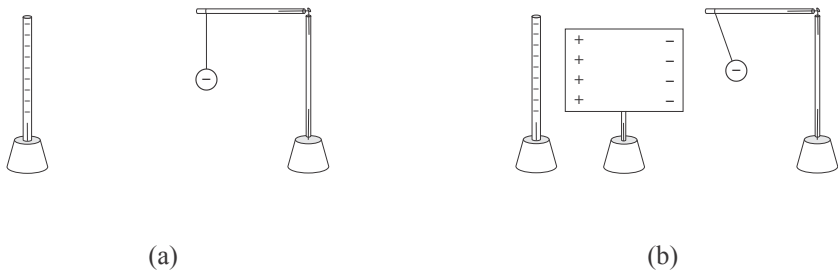


Figura 7.14: (a) Una pajita con carga negativa no tiene ningún efecto notable sobre un péndulo con carga negativa que se encuentra lejos de ella. (b) Cuando se coloca entre ellos un rectángulo conductor inicialmente neutro, se produce una repulsión.

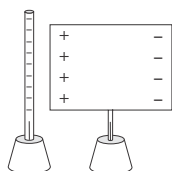
Ahora movemos la pajita frotada verticalmente cerca de un borde del rectángulo de cartón fino, evitando que entren en contacto. En el mismo plano vertical, colocamos la pajita frotada verticalmente, el rectángulo y el péndulo cargado. La pajita cargada permanece cerca de un borde vertical del rectángulo y el péndulo se encuentra inicialmente alejado del otro borde. Ahora acercamos lentamente el péndulo al rectángulo. Observamos que el péndulo es repelido por el rectángulo. Esta repulsión aumenta cuando reducimos la distancia entre ellos. Cuando hay una distancia de 15 cm entre la pajita frotada y la proyección vertical del punto de apoyo del hilo de seda del péndulo, este hilo se aleja visiblemente de la vertical, ya que es repelido por el rectángulo entre la pajita y el péndulo, figura 7.14 (b).

Ahora retiramos el rectángulo, manteniendo la pajita frotada y el péndulo inmóviles con respecto al suelo. El rectángulo debe retirarse en una dirección horizontal perpendicular a su plano. Una vez retirado el rectángulo, observamos que el péndulo cargado vuelve a la vertical, a 15 cm de la pajita frotada.

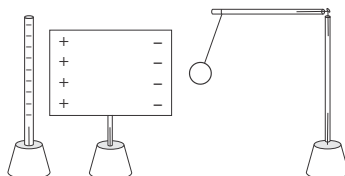
Este experimento es otra prueba de la polarización del rectángulo conductor en presencia de la pajita frotada.

Experimento 7.12

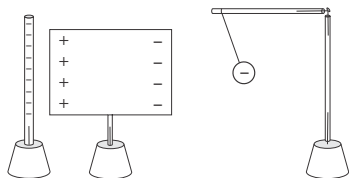
Es posible realizar un experimento similar al experimento 7.11 utilizando un rectángulo de cartón fino como el del experimento 7.6, una pajita de plástico frotada y un péndulo eléctrico descargado. La pajita frotada se coloca verticalmente cerca de un borde del rectángulo (el borde izquierdo, por ejemplo), con el péndulo descargado alejado del rectángulo, pero en el mismo plano vertical, figura 7.15 (a).



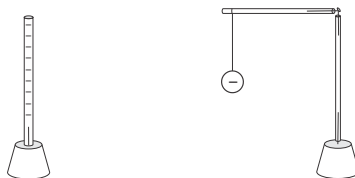
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.15: (a) Rectángulo conductor colocado cerca de una pajita cargada. (b) Un péndulo neutro situado cerca es atraído por el rectángulo. (c) Tras el contacto, el péndulo es repelido por el rectángulo. (d) Cuando se retira el rectángulo, el péndulo negativo permanece suspendido verticalmente, ya que se aleja de la pajita negativa.

Ahora acercamos lentamente el péndulo al borde derecho del rectángulo. A cierta distancia del rectángulo, observamos que el disco de papel del péndulo es atraído por el rectángulo, como se muestra en la figura 7.15 (b).

Cuando la pajita cargada se acerca aún más al borde izquierdo del rectángulo, el disco toca el rectángulo y comienza a ser repelido por él debido al mecanismo ACR. Entonces llegamos a una situación análoga a la de la figura 7.14, como en la figura 7.15 (c).

Cuando retiramos el rectángulo, el péndulo vuelve a la posición vertical, como en la figura 7.15 (d). Cuando la pajita frotada se acerca al péndulo, se produce una

repulsión. Esto indica que los dos cuerpos (la pajita y el péndulo) están electrizados con cargas del mismo signo.

Experimento 7.13

Un experimento similar al experimento 7.12 consiste en acercar un péndulo eléctrico inicialmente descargado a un borde de un rectángulo conductor descargado, sin tocarlo. El péndulo permanece vertical. Ahora acercamos lentamente una pajita vertical frotada al otro borde del rectángulo. A cierta distancia, el péndulo comienza a ser atraído por el rectángulo, lo toca y luego es repelido. Ahora retiramos el rectángulo. Cuando la pajita cargada se acerca al péndulo, aparece una repulsión. Esto indica que ambos tienen cargas del mismo signo.

7.5 El uso de la polarización para cargar un electroscopio

Hasta ahora, vimos cómo cargar un cuerpo positiva o negativamente por fricción. Además, cuando utilizamos el mecanismo ACR, vimos cómo electrizar un conductor con una carga del mismo signo que la de un cuerpo previamente frotado. Ahora utilizamos la polarización eléctrica de los conductores, así como el hecho de que las cargas se desplazan libremente por su superficie, para describir un tercer mecanismo de electrización.

Definiciones: De acuerdo con las definiciones presentadas en la sección 7.3, los mecanismos de carga descritos en esta sección se denominan «electrización por inducción», «carga por inducción», «carga por influencia» o «electrización por influencia».

7.5.1 Primer proceso de electrización por inducción

Experimento 7.14

Construimos dos electroscopios a partir de rectángulos de cartón fino de 10 cm por 7 cm, *A* y *B*, como en la sección 6.1. Los lados más largos serán verticales. Se fijan tiras de papel de seda en el centro superior de estos electroscopios. Estos dos electroscopios se colocan uno al lado del otro en un mismo plano vertical, con sus lados más cercanos en contacto, como se muestra en la figura 7.16 (a). Los descargamos mediante el contacto con nuestro dedo. Las dos tiras permanecen verticales. Frotamos una pajita de plástico con el cabello para que se electrice bien, como indica la prueba de la pared en el experimento 3.6. Esta pajita frotada se fija verticalmente a un soporte adecuado y, inicialmente, se aleja de los electroscopios.

Acercamos lentamente esta pajita frotada al borde vertical libre del electroscopio *A*, sin que entren en contacto. Debe permanecer cerca de este borde, con el electroscopio *A* entre ella y el electroscopio *B*. Las dos tiras se levantan, lo que indica que cada electroscopio se cargó, como se muestra en la figura 7.16 (b).

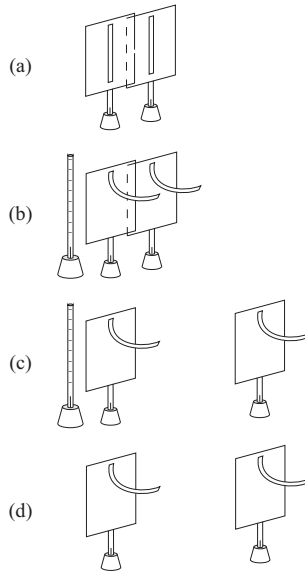


Figura 7.16: Primer procedimiento de carga por inducción.

Manteniendo la pajita frotada cerca del borde libre del electroscopio *A*, alejamos el electroscopio *B* del electroscopio *A*. Al hacerlo, debemos asegurarnos de tocar solo la pajita de plástico o su base de soporte, que sostiene la placa del electroscopio *B*, sin tocar su placa o su tira. Observamos que las dos tiras permanecen levantadas, como se muestra en la figura 7.16 (c).

Después de este procedimiento, colocamos la pajita frotada lejos de los dos electros copios. Observamos que las dos tiras permanecen levantadas, como se muestra en la figura 7.16 (d), lo que indica que los electros copios están cargados.

Ahora mantenemos la pajita frotada en posición horizontal, a la misma altura que los extremos inferiores de las tiras levantadas de los electros copios. Cuando acercamos la pajita frotada horizontal a la tira del electroscopio *B*, evitando que entren en contacto, observamos una repulsión de la tira. En otras palabras, la tira se aleja de la pajita frotada, hacia la placa del electroscopio *B*. Esto demuestra que este electroscopio se electrizó con una carga del mismo signo que la pajita frotada.

Cuando la pajita frotada se acerca lentamente a la tira del electroscopio *A*, sin entrar en contacto, se produce una atracción. En otras palabras, esta tira se desplaza hacia la pajita, alejándose de la placa de su electroscopio. Esto indica que este electroscopio se electrizó con una carga de signo opuesto al de la pajita frotada.

Ahora retiramos la pajita frotada. Colocamos los dos electros copios en planos paralelos, uno frente al otro, con las tiras apuntando una hacia la otra. Al acercar estos dos electros copios entre sí, pero evitando el contacto entre las dos tiras, podemos observar su atracción mutua. Esto demuestra una vez más que tienen cargas opuestas, figura 7.17.

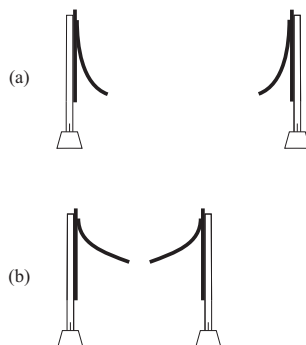


Figura 7.17: Dos electros copios cargados por inducción se electrizan de manera opuesta.

Este experimento aporta una prueba más de la polarización eléctrica de los conductores. En este caso, los dos electros copios *A* y *B*, que inicialmente estaban en contacto, se comportaron como un solo conductor. Cuando acercamos la pajita frotada al electros copio *A*, este se cargó con una carga de signo opuesto al de la pajita, mientras que el electros copio *B* se cargó con una carga del mismo signo que la de la pajita. Cuando retiramos el electros copio *B*, este conservó su carga. Lo mismo ocurrió con el electros copio *A* cuando se retiró la pajita.

Este experimento también demuestra la conservación de la carga. La razón es que ambos electros copios estaban inicialmente descargados. Durante los experimentos, estaban aislados del suelo y no los tocamos con la pajita frotada. Después de ser electrizados, uno de ellos recibió una carga positiva y el otro una carga negativa. Este experimento también demuestra que las cargas eléctricas pueden moverse libremente por la superficie de los conductores. También demuestra que podemos separar espacialmente las cargas positivas y negativas, acumulando cada una de ellas en electros copios distintos.

7.5.2 Segundo proceso de electrización por inducción

Experimento 7.15

Ahora describiremos otro procedimiento para electrizar por inducción.

La tira de un electros copio inicialmente descargado apunta verticalmente hacia abajo. Frotamos cuidadosamente una pajita de plástico con el cabello para cargarla bien, como en el experimento 3.6. Esta pajita frotada se fija verticalmente a un soporte adecuado, lejos del electros copio.

Acercamos lentamente la pajita frotada a un borde del electros copio, evitando que entren en contacto. Su tira se levanta y permanece levantada.

Mientras mantenemos la pajita frotada cerca de un borde del electros copio, tocamos el otro borde con el dedo. La tira vuelve a bajar y permanece apuntando hacia abajo.

Mientras mantenemos la pajita frotada cerca de un borde del electros copio, retiramos el dedo del otro borde. La tira permanece apuntando hacia abajo.

Ahora alejamos la pajita frotada del electroscopio. Una vez retirada la pajita, ¡la tira se levanta y permanece levantada! Esto indica que este procedimiento cargó el electroscopio.

Estos cinco pasos se ilustran en la figura 7.18.

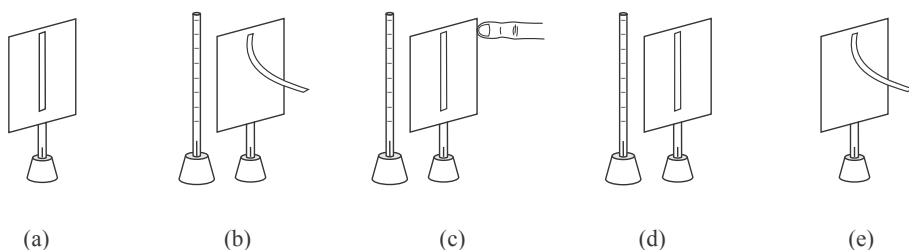


Figura 7.18: Segundo procedimiento para cargar un electroscopio por inducción.

Ahora colocamos la pajita frotada horizontalmente a la misma altura que el extremo inferior de la tira levantada. Acercamos lentamente la pajita a esta tira, evitando que entren en contacto. Observamos que se atraen mutuamente, desplazándose la tira hacia ella y alejándose de la placa del electroscopio. Al mover la pajita frotada hacia arriba, podemos incluso hacer que el extremo libre de la tira se eleve por encima del borde superior del electroscopio, figura 7.19.

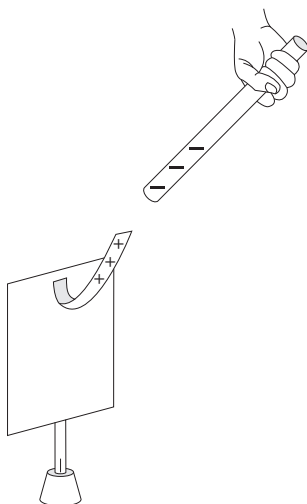


Figura 7.19: Pajita con carga negativa atrayendo la tira del electroscopio de la figura 7.18 tras el experimento.

Esto indica que el electroscopio se electrizó con una carga de signo opuesto al de la pajita frotada.

Podemos describir lo que ocurrió utilizando los resultados anteriores. Cuando la pajita frotada se acercó a un borde del electroscopio, este se polarizó eléctricamente.

El borde cercano a la pajita se cargó con una carga de signo opuesto al de la pajita, mientras que el borde opuesto se cargó con una carga del mismo signo que la de la pajita. Cuando tocamos el borde opuesto libre del electroscopio, descargamos la electricidad que se había acumulado en ese lado. Como la pajita frotada permaneció cerca del primer borde, las cargas de este borde siguieron siendo opuestas a la carga de la pajita, debido a su atracción mutua. En otras palabras, no se descargaron cuando tocamos el otro borde con el dedo. Cuando retiramos el dedo del segundo borde libre, las cargas del primer borde no cambiaron. A continuación, retiramos la pajita cargada. Tras este procedimiento, las cargas que se concentraban en el primer borde se distribuyeron por todo el electroscopio. Esto levantó la tira. Esta distribución de las cargas se ilustra en la figura 7.20.

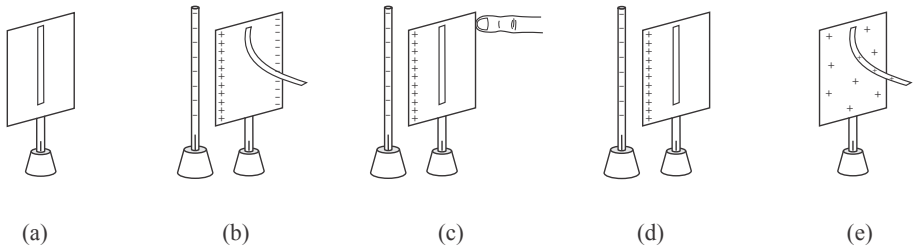


Figura 7.20: Distribución de cargas de la figura 7.18.

Con este experimento obtenemos un efecto opuesto al de los experimentos 6.2 y 6.5, en los que, al cargar un electroscopio por fricción o por contacto, este adquiría una carga del mismo signo que el cuerpo que lo había cargado. En este experimento, por el contrario, el electroscopio adquirió una carga de signo opuesto al del cuerpo frotado que se había colocado cerca.

En este caso, la placa de cartón del electroscopio era inicialmente neutra. Al final del proceso, estaba electrizada. Para conseguir esta electrización del electroscopio, utilizamos el siguiente procedimiento. Primero polarizamos el electroscopio en presencia de un cuerpo cargado, conectamos a tierra el extremo libre del electroscopio, eliminamos el contacto con la tierra y retiramos el cuerpo frotado al final del proceso. La conexión a tierra era necesaria para neutralizar la carga que se había acumulado en el extremo libre del conductor debido a su polarización. El resultado final es que el electroscopio se electrizó. En este caso, ¡la conexión a tierra tuvo el efecto de cargarlo! Esto demuestra que la conexión a tierra no siempre descarga un cuerpo, como era el caso en el experimento 4.9.

7.5.3 Tercer proceso de electrización por inducción

Experimento 7.16

El experimento 7.15 puede realizarse de otra manera utilizando nuevamente un electroscopio. En primer lugar, conectamos uno de los extremos del electroscopio a tierra tocándolo con el dedo o conectándolo a tierra con un trozo de alambre metálico. Una vez conectado este extremo a tierra, acercamos una pajita frotada al otro extremo

del electroscopio, sin tocarlo. Cuando la pajita frotada está cerca de este segundo extremo, retiramos la conexión a tierra del primer extremo. A continuación, retiramos la pajita frotada y observamos que, al final del proceso, el electroscopio se electrizó, como indica su tira levantada, figura 7.21. Cuando comprobamos el signo de la carga adquirida por el electroscopio, observamos que es opuesto al de la pajita.

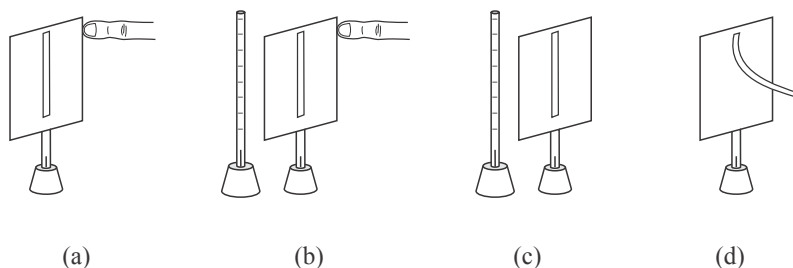


Figura 7.21: Tercer procedimiento para cargar un electroscopio por inducción.

La distribución de cargas en este experimento se ilustra en la figura 7.22.

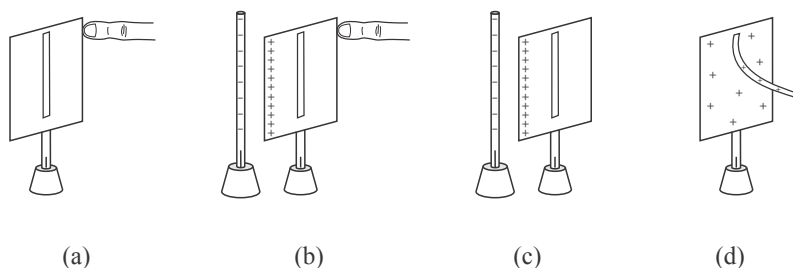


Figura 7.22: Distribución de cargas de la figura 7.21.

7.6 La polarización eléctrica de los aislantes

Ahora vamos a examinar otras diferencias entre los conductores y los aislantes.

Experimento 7.17

Ahora repetimos el experimento 7.11 con una placa rectangular de poliestireno neutro de 10 cm por 7 cm, en lugar de la placa rectangular de cartón fino. El poliestireno es un aislante, mientras que el cartón fino es un conductor. Frotamos una pajita de plástico con el cabello y esta carga un péndulo mediante el mecanismo ACR, que entonces también se carga negativamente.

Cuando la pajita frotada se encuentra a una distancia superior o igual a 15 cm del péndulo cargado, el hilo de seda permanece vertical. Su repulsión es demasiado débil para ser detectada. Sin embargo, cuando esta distancia es de 15 cm y la placa de

poliestireno se coloca entre la pajita frotada y el péndulo, observamos que el péndulo cargado es repelido por la placa.

Esta repulsión no puede deberse directamente a la pajita frotada, ya que esta se encuentra a gran distancia del péndulo. Esto significa que esta repulsión debe deberse a una polarización del poliestireno. En otras palabras, el borde del poliestireno más cercano a la pajita frotada se carga positivamente, mientras que el borde más alejado se carga negativamente. Lo que indica esta polarización es la repulsión visible del péndulo cargado negativamente cuando se encuentra a una distancia superior a 15 cm de la pajita frotada.

Experimento 7.18

Ahora construiremos un «péndulo eléctrico de plástico», también llamado «péndulo de plástico», figura 7.23.

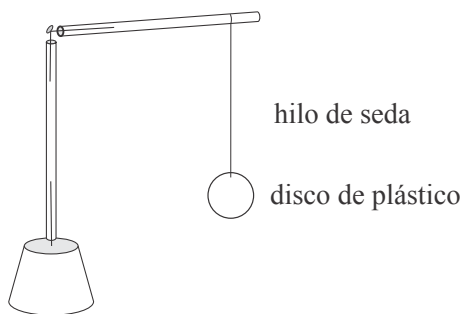


Figura 7.23: Péndulo eléctrico de plástico.

En el péndulo eléctrico clásico de la sección 4.4, tenemos un disco de papel en el extremo inferior del hilo de seda. El papel es un conductor. En el péndulo eléctrico de plástico, sustituimos el disco de papel por un aislante.

La mayoría de los plásticos se comportan como aislantes. Sin embargo, algunos de ellos se comportan como conductores. Esto puede deberse a la humedad acumulada en su superficie o a su composición química. Por lo tanto, primero debemos elegir una bolsa de plástico que no descargue un electroscoPIO electrizado cuando el plástico, sostenido en nuestra mano, toque el borde superior del cartón fino. Este plástico aislante se utilizará para construir el péndulo eléctrico de plástico.

Para ello, recortamos un disco de 1 o 2 cm de diámetro de una bolsa de plástico fina. Hacemos un agujero en este pequeño disco con un alfiler y lo atamos con hilo de seda o nailon.

Antes de comenzar el experimento, es importante comprobar si el péndulo de plástico es realmente neutro. Para saber si está cargado, acercamos un dedo y observamos si el disco de plástico permanece inmóvil en posición vertical. Si es así, decimos que es neutro. Si el disco de plástico es atraído por el dedo, decimos que está cargado. Entonces tiramos este péndulo cargado y construimos uno nuevo neutro. A menudo, el péndulo de plástico puede cargarse al manipularlo, cuando cortamos o atamos el disco.

Frotamos una pajita de plástico con el cabello y la acercamos a un péndulo de plástico neutro. El disco de plástico es atraído por la pajita frotada. Pero esta atracción es mucho más débil que una atracción similar entre una pajita frotada y el disco de papel de un péndulo eléctrico normal. Esta fuerza se indica mediante un ángulo de inclinación del disco con respecto a la vertical cuando la pajita frotada se encuentra a la misma distancia de ambos péndulos.

Si dejamos que la pajita frotada y el disco de plástico del péndulo de plástico entren en contacto, se pegan entre sí. En otras palabras, el fenómeno ACR descrito en el experimento 4.10 y en la sección 4.8 no se produce con un péndulo de plástico. La secuencia de atracción, contacto y repulsión solo se produce normalmente con un conductor. Cuando el cuerpo que es atraído es un aislante neutro, puede tocar el cuerpo que lo atrae sin ser repelido por él posteriormente. El mecanismo ACR solo se produce para un aislante después de varios contactos con el cuerpo frotado, o cuando raspamos el cuerpo frotado sobre el aislante.

Esta es una diferencia importante entre los conductores y los aislantes. Para cargar un aislante como el plástico, debemos frotarlo, como en el experimento 2.1. Un conductor, por el contrario, puede cargarse no solo por fricción, como vimos en los experimentos 6.2 y 6.24, sino también por el mecanismo ACR. En este caso, el contacto entre un conductor y un cuerpo previamente cargado suele ser suficiente para que parte de la carga del cuerpo electrizado se transfiera al conductor.

Experimento 7.19

Repetimos el experimento 7.3 con un disco neutro de plástico duro o poliestireno, en lugar de un disco de cartón fino. Esta vez, cuando retiramos los planos de Coulomb para comprobar sus cargas, observamos que ninguno de ellos se electrizó.

Sin embargo, en el experimento 7.17 vimos que el poliestireno se polariza eléctricamente en presencia de una pajita frotada. Esto demuestra que la polarización que se produce en un aislante es diferente de la polarización de un conductor.

7.7 ¿Un cuerpo electrizado atrae más a un conductor o a un aislante?

En esta sección abordamos una cuestión interesante. En primer lugar, electrizamos una pajita de plástico frotándola con el cabello. Colocamos un pequeño conductor ligero y un pequeño aislante ligero separados entre sí sobre una mesa. Supongamos que este conductor y este aislante tienen el mismo peso y tamaño. Cuando acercamos la pajita frotada al conductor y al aislante, ¿cuál será el más atraído? En otras palabras, ¿cuál sufrirá la mayor fuerza ejercida por la pajita electrizada?

En los experimentos 2.3 y 2.4, vimos que un plástico frotado atrae con más fuerza a las sustancias conductoras (como el papel y el metal) que a las sustancias aislantes del mismo peso, tamaño y forma (como el plástico o la seda).

Experimento 7.20

En este experimento, ilustramos la propiedad según la cual un conductor sufre una fuerza mayor ejercida por un cuerpo electrizado cercano que un aislante. No necesitaremos pesar el conductor ni el aislante. Para ello, utilizamos dos péndulos de plástico del mismo tamaño y forma, fabricados con los mismos materiales, figura 7.23. En el péndulo *II*, se fija un disco de papel o papel de aluminio al disco de plástico. Debido al material adicional que se le añadió, pesa más que el péndulo *I*, al que no se le añadió nada.

Antes de comenzar el experimento, acercamos un dedo a los dos péndulos. Si no se sienten atraídos por el dedo, esto indica que no se electrizaron durante su fabricación. Esto no siempre es fácil de lograr, ya que el péndulo de plástico puede adquirir fácilmente una carga neta durante su fabricación (fricción con nuestra mano al cortar o fijar el disco de plástico al hilo de seda). Si esto ocurre, existe un procedimiento sencillo para descargar el péndulo. Basta con esperar mucho tiempo (varias horas) a que el disco de plástico pierda esta carga al entrar en contacto con el aire ambiente. En la sección 7.14 tratamos este tema con más detalle.

A partir de ahora, supondremos que ambos péndulos son neutros.

Ahora acercamos una pajita frotada a los dos péndulos, asegurándonos siempre de que la pajita y los discos de los péndulos no entren en contacto. El péndulo de plástico es ligeramente atraído por la pajita frotada, figura 7.24 (a). El péndulo con el disco de papel, por el contrario, es atraído con mucha más fuerza que el péndulo de plástico, figura 7.24 (b). Esta fuerza se indica por el ángulo de inclinación de cada péndulo con respecto a la vertical (suponiendo que la pajita electrizada se encuentra a la misma distancia del disco del péndulo atraído). Aunque el péndulo *II* es más pesado que el péndulo *I*, sufre una fuerza de atracción mayor que el primer péndulo.

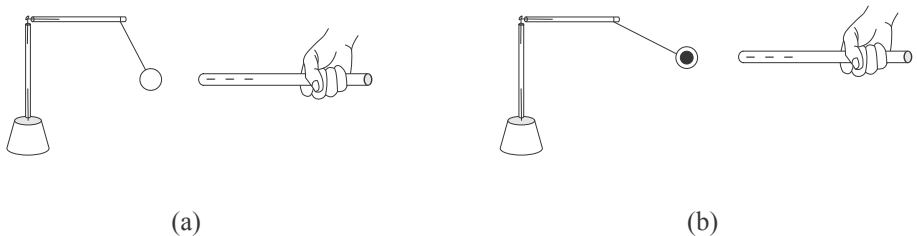


Figura 7.24: (a) Un péndulo de plástico es ligeramente atraído por una pajita frotada. (b) Por el contrario, un péndulo de plástico al que se le añadió un disco conductor es fuertemente atraído por la pajita frotada, a pesar de su mayor peso.

Experimento 7.21

Se puede realizar un experimento similar con dos péndulos en los que sustituimos los discos de plástico por pequeñas bolas de poliestireno. Al igual que el plástico, el poliestireno también es un material aislante. Colocamos esferas del mismo tamaño en los dos péndulos. Tras este procedimiento, cubrimos el péndulo *II* con papel de aluminio. A continuación, acercamos una pajita frotada a los dos péndulos. Observamos

que el péndulo cubierto con papel de aluminio es más atraído que el péndulo *I*, al que no se le añadió nada.

Experimento 7.22

Ahora construimos dos «hilos pendulares aislantes», como en la figura 7.25. Son análogos al hilo pendular de Gray, figura 4.28. Pero ahora sustituimos el palito de madera por una pajita de plástico, y el hilo de algodón por una tira de plástico flexible. Los dos hilos pendulares aislantes deben tener la misma longitud y forma, y estar fabricados con el mismo material. Ahora enrollamos la tira de plástico del péndulo *II* con un hilo de algodón ligero, como una hélice alrededor de este. Cuando todo está listo, probamos los dos hilos pendulares para verificar que son neutros antes de comenzar el experimento.

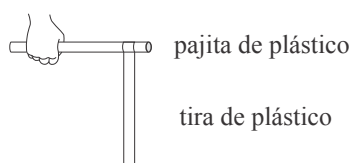


Figura 7.25: Un hilo pendular aislante.

Acercamos una pajita frotada a los dos hilos colgantes. Observamos que el hilo colgante *II*, provisto del hilo conductor de algodón, es más atraído que el hilo colgante *I*, al que no se le añadió nada, figura 7.26. Aunque el hilo colgante *I* es más ligero que el hilo colgante *II*, es menos atraído que este último.

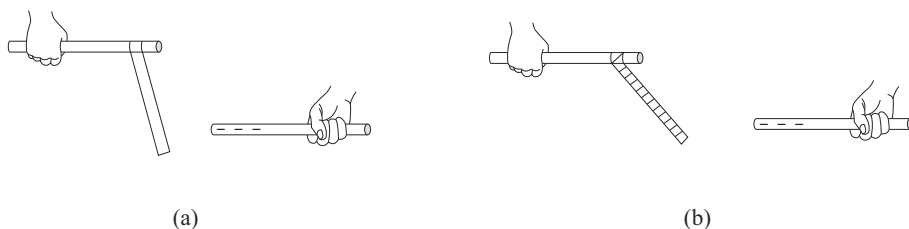


Figura 7.26: (a) Un hilo pendular aislante es menos atraído por un cuerpo electrizado que otro hilo pendular aislante al que se le añadió un hilo conductor (b).

Estos experimentos demuestran que un conductor sufre una fuerza mayor que un aislante, siendo ambas fuerzas ejercidas por el mismo cuerpo electrizado. Du Fay y Aepinus se encuentran entre los investigadores que descubrieron este hecho de forma experimental.⁶

⁶[DF33d, pp. 233–234] y [Aep79, pp. 261, 274 y 309–315].

7.7.1 Debate sobre el péndulo eléctrico de Gray

Como se menciona en la sección 4.6, en 1720, Gray describió un péndulo eléctrico en el que ató un plumón a un hilo de seda conectado a un palito. En aquella época, nadie conocía la diferencia entre conductores y aislantes. Esto significa que su uso de un hilo de seda fue fortuito. La seda es un material aislante. En aquella época, Gray podría haber utilizado igualmente un hilo de lino o de algodón, que son conductores. Gray calentó un trozo de papel marrón (convirtiendo este papel en aislante) y lo cargó por fricción. Al acercar este fino papel marrón al plumón conectado al hilo de seda, pudo levantarla hasta que el hilo de seda quedó en posición horizontal, es decir, perpendicular al palito vertical. Al levantar aún más el papel marrón frotado, pudo hacer que el hilo de seda se extendiera por encima del plano horizontal, permaneciendo recto en el aire, como se muestra en la figura 4.21 (c). A continuación de este experimento, mencionó lo siguiente:^{7,8}

A continuación, repetí este experimento sin el plumón, es decir, utilizando solo un hilo de seda de unos 5 o 6 pulgadas de largo [13 o 15 cm], que se colocó en posición vertical como se mencionó anteriormente, sin tocar el papel [frotado y calentado]; [...]

En la figura 7.27 se muestra una ilustración de este experimento.

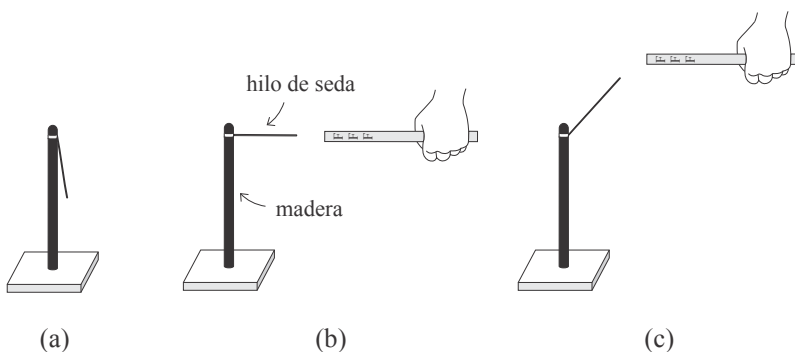


Figura 7.27: Gray atrae un hilo de seda acercando un trozo de papel arrugado.

Esto demuestra que el plumón solo tenía un papel secundario en este experimento, ya que podía levantar el hilo de seda incluso sin ella. Hay dos posibles explicaciones para este curioso efecto. La primera es que, al atar y desatar el plumón al hilo de seda, la seda actuó como aislante y se cargó en su extremo inferior al frotarla con las manos. El papel marrón calentado y frotado pudo haberse electrizado con una carga de signo opuesto al de la seda cargada. Cuando Gray acercó estas dos sustancias, se atrajeron entre sí. Gray pudo entonces levantar el hilo de seda por encima de la horizontal. La segunda posibilidad es que, al atar y desatar el plumón, el hilo de seda

⁷[Gra20, p. 107].

⁸I then repeated this Experiment without the Feather, viz. by a single thread of Silk only of about 5 or 6 inches long [13 or 15 cm], which was made to stand extended upright as above-mentioned, without touching the [rubbed and heated] Paper; [...]

se humedeciera, tal vez por el sudor de las manos de Gray. Si fuera así, el hilo de seda se habría comportado como un conductor. Al acercar el papel marrón calentado y frotado al hilo, el hilo conductor se habría polarizado. En otras palabras, su extremo más bajo, que estaba más cerca del papel cargado, habría adquirido una carga de signo opuesto. Debido a la fuerte atracción entre las cargas del papel y las situadas en el extremo libre del hilo, Gray podría haber levantado el hilo por encima de la horizontal. Esto sería análogo a nuestro experimento 6.6.

Si el hilo de seda estuviera seco y descargado, se comportaría como un aislante neutro ordinario. En ese caso, Gray no podría levantarlo por encima de la horizontal, ni siquiera acercando el papel marrón cargado al hilo. Normalmente, la atracción entre un cuerpo cargado y un aislante neutro es mucho más débil que la atracción entre un cuerpo cargado y un conductor neutro. También es mucho más débil que la atracción entre dos cuerpos con cargas opuestas.

7.8 Fuerzas de origen no electrostático

Como vimos en el capítulo 5, dos cuerpos con carga positiva se repelen, dos cuerpos con carga negativa se repelen, mientras que un cuerpo positivo y un cuerpo negativo se atraen. A veces se expresa diciendo que las cargas del mismo signo se repelen, mientras que las cargas opuestas se atraen. Las fuerzas eléctricas que estos cuerpos ejercen entre sí cuando están en reposo se denominan fuerzas electrostáticas.

En todas las situaciones en las que dos o más cargas están en reposo entre sí en una configuración de equilibrio estable, se necesitan fuerzas no electrostáticas para equilibrar las fuerzas electrostáticas ejercidas entre las cargas en interacción.⁹ Ilustramos esto aquí en el caso de una esfera conductora con carga negativa. La esfera puede haberse electrizado, por ejemplo, frotando una pajita de plástico con el cabello. Las cargas del conductor se repelen entre sí. Una vez alcanzado el equilibrio, se distribuyen uniformemente por la superficie de la esfera, figura 7.28.

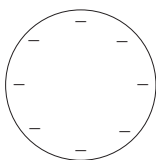


Figura 7.28: Una esfera cargada uniformemente.

Consideremos la carga negativa en la parte superior de la esfera. Es repelida por todas las demás cargas negativas. Por lo tanto, sufre una fuerza electrostática vertical dirigida hacia el exterior del centro de la esfera. Para mantener esta carga negativa en reposo, es necesaria una fuerza de origen no electrostático dirigida hacia abajo, de intensidad igual a la de la fuerza electrostática dirigida hacia arriba. En esta situación específica, esta fuerza no electrostática se denomina a veces fuerza de contacto. Pero su origen no se comprende claramente. Tampoco sabemos cómo se produce, etc.

⁹Véase [AH07, Sección 5.3], [AH09, Sección 5.3], y las referencias que allí se mencionan.

La misma situación se produce cuando la esfera conductora está cargada positivamente. Y el mismo razonamiento es válido para una esfera aislante que está uniformemente electrizada, ya sea negativa o positivamente.

7.9 Modelos microscópicos de conductores y aislantes

Para comprender todas estas experiencias que muestran las diferencias y similitudes entre los conductores y los aislantes, se crean modelos microscópicos de estos cuerpos. Estos modelos nos ayudan a comprender y visualizar los procesos aquí descritos. Se crearon a partir de los resultados de experimentos análogos a los descritos en este libro. A continuación, se invierte el procedimiento. En otras palabras, estos modelos se postulan y luego se utilizan para ilustrar o describir lo que ocurre en los experimentos.

Este comportamiento variable da lugar a dos modelos microscópicos diferentes para los conductores polarizados y los aislantes polarizados. Para los conductores, suponemos la existencia de cargas libres. Suponemos que en los conductores existen cargas que no están unidas a las moléculas del material y que, por lo tanto, son libres de moverse por todo el conductor. Cuando el conductor es neutro, estas cargas libres no experimentan ningún movimiento macroscópico neto y no generan ningún efecto externo. Sin embargo, cuando movemos un cuerpo cargado cerca de este conductor, este se polariza. En particular, la parte del conductor más cercana al cuerpo cargado se electriza con una carga neta de signo opuesto, mientras que la parte opuesta del conductor se electriza con cargas del mismo signo que las del cuerpo cargado, figura 7.29. Estas cargas libres polarizadas pueden transferirse a otros conductores si estos entran en contacto con el conductor polarizado.

Suponemos la existencia de una fuerza de origen no electrostático para impedir que estas cargas libres abandonen la superficie del conductor, salvo en condiciones de ruptura, en las que se producen descargas eléctricas en el aire.

La conexión a tierra de un conductor en presencia de un cuerpo cargado cercano, como se muestra en los experimentos 7.15 y 7.16, se ilustra en la figura 7.30.

Ahora presentamos el modelo microscópico de un aislante. En este caso, suponemos que cuando acercamos un cuerpo cargado a un aislante, solo se polarizan las moléculas del aislante. Es decir, las partes de las moléculas del aislante que están más cerca del cuerpo cargado se electrizan con cargas de signo opuesto al del cuerpo cargado. Las partes de las moléculas del aislante que están más alejadas del cuerpo cargado, por el contrario, se cargan eléctricamente con cargas del mismo signo que este cuerpo. En el caso de los aislantes, no habría un movimiento neto de las cargas libres, solo una polarización de sus moléculas, figura 7.31 (a).

Dentro del aislante, habría cantidades iguales de cargas positivas y negativas, muy próximas entre sí. Si consideramos un pequeño volumen dentro del aislante que contiene numerosas moléculas, la suma neta de estas cargas sería aproximadamente cero. Esto significa que podemos considerar el interior del aislante polarizado como macroscópicamente neutro. Pero este no sería el caso de la superficie. El efecto neto de estas

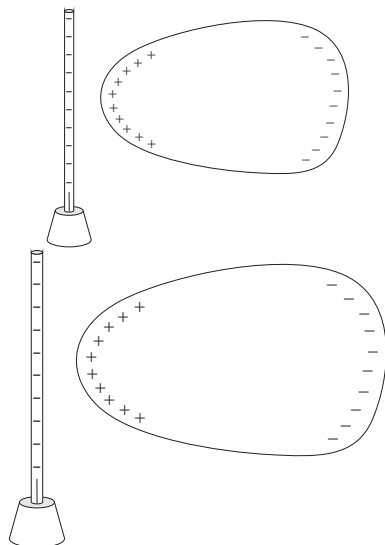


Figura 7.29: Modelo microscópico de un conductor polarizado idealizado cercano a otro cuerpo cargado.

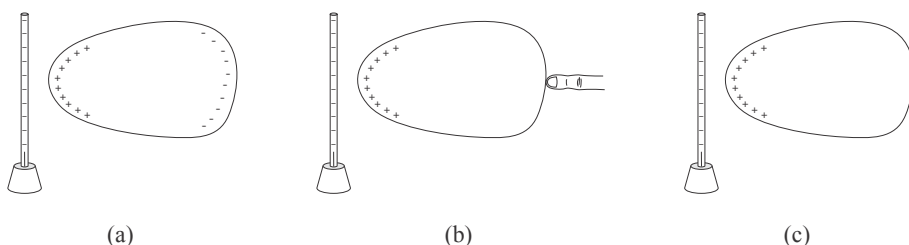


Figura 7.30: Puesta a tierra de un conductor en presencia de un cuerpo cargado cercano.

polarizaciones moleculares sería que la superficie del aislante más cercana al cuerpo cargado se comportaría como si estuviera electrizada con cargas de signo opuesto a las del cuerpo cargado externo. La superficie del aislante más alejada del cuerpo cargado, por el contrario, se comportaría como si estuviera electrizada con cargas del mismo signo que las de ese cuerpo. Esta polarización efectiva se ilustra en la figura 7.31 (b).

Una vez más, se necesita una fuerza de origen no electrostático para impedir que las cargas polarizadas en cada molécula se desplacen a través del aislante.

La polarización que se muestra en la figura 7.29 es mayor o más intensa que la polarización que se muestra en la figura 7.31 (b). Estas figuras se realizaron deliberadamente. Suponemos que los conductores y los aislantes tienen la misma forma y tamaño, y que ambos se encuentran a la misma distancia de una pajita cargada con la misma intensidad en ambos casos. La razón de las cantidades de carga en estas figuras se dio en la sección 7.7. Los experimentos muestran que la fuerza ejercida por

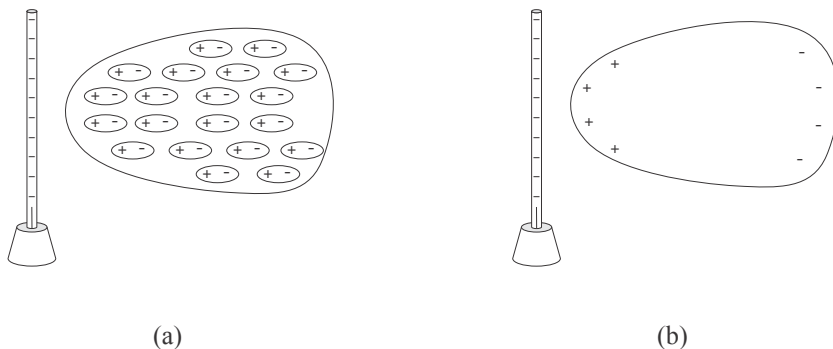


Figura 7.31: (a) Modelo microscópico de un aislante idealizado polarizado en presencia de otro cuerpo cargado. (b) Polarización efectiva del aislante en la situación (a).

un cuerpo cargado sobre un conductor es mayor que la fuerza ejercida por ese cuerpo cargado sobre un aislante. Esto indica que la polarización de un conductor es mayor que la polarización efectiva de un aislante. La intensidad o el grado de esta polarización se representa mediante el número de cargas opuestas distribuidas a ambos lados del cuerpo polarizado. En un conductor hay más cargas polarizadas que en un aislante, como se muestra en las figuras 7.29 y 7.31 (b).

Además, aumentamos el número de cargas polarizadas en los conductores y aislantes al disminuir su distancia con respecto al cuerpo cargado vecino que induce estas cargas. También aumentamos el número de cargas polarizadas al aumentar la electrización del cuerpo vecino que polariza el conductor y el aislante.

En realidad, ningún cuerpo es un conductor perfecto ni un aislante perfecto. Por lo tanto, estos modelos microscópicos son idealizaciones. Los cuerpos reales presentan las características de ambos comportamientos, en diversos grados. Existe una gradación entre los buenos conductores y los buenos aislantes.

En cualquier caso, estos modelos idealizados son extremadamente útiles para ayudarnos a comprender y visualizar lo que ocurre en muchos fenómenos eléctricos.

7.10 ¿Pueden atraerse dos cuerpos con cargas eléctricas de signos opuestos?

Experimento 7.23

Repetimos el experimento 6.5, figura 6.7. Pero esta vez, la pajita negativa se acerca aún más a la tira del electroscopio cargado negativamente. Observamos que, para distancias inferiores o iguales a un determinado valor, del orden de 2 a 4 cm, la tira ya no es repelida por la pajita, sino atraída por ella. La tira toca la pajita y permanece adherida a ella.

Experimento 7.24

Repetimos los experimentos 4.7 y 5.23, figuras 4.18 y 5.27. Pero esta vez, la pajita negativa se acerca aún más al disco negativo del péndulo. Observamos que la inclinación del péndulo con respecto a la vertical aumenta cuando la distancia entre la pajita y el péndulo pasa de 15 a 5 cm aproximadamente. Esto demuestra que la intensidad de la fuerza repulsiva aumenta cuando la distancia entre ellos disminuye en este rango.

Sin embargo, para distancias inferiores o iguales a un determinado valor, del orden de 5 cm, ya no hay repulsión entre la pajita negativa y el disco negativo. A estas pequeñas distancias, se atraen mutuamente. El disco toca la pajita negativa por segunda vez y vuelve a ser repelido por ella.

Después de 2 o 3 de estos contactos entre la pajita negativa y el disco del péndulo, se observan de nuevo los mismos fenómenos, pero a distancias algo diferentes. Cuando el disco tiene un mayor grado de electrización, la repulsión entre el disco y la pajita negativa puede observarse a una distancia mayor que antes, del orden de 20 cm aproximadamente. La intensidad de la fuerza repulsiva aumenta cuando esta distancia disminuye entre 20 cm y un límite inferior de 2 o 3 cm. Cuando la distancia entre la pajita y el disco es inferior o igual a este límite inferior, vuelve a producirse una atracción entre ellos y entra en juego el mecanismo ACR.

Estas experiencias pueden entenderse a partir de los principios descubiertos hasta ahora.

Supongamos que un cuerpo aislante I fue cargado negativamente por fricción. Se encuentra cerca de un cuerpo neutro II , conductor, que no tiene carga neta. Habrá una fuerza de atracción entre ellos. Esta fuerza de atracción se debe a la polarización del cuerpo II en presencia del cuerpo I , como se muestra en la figura 7.29. Representamos su fuerza de atracción por $F_A > 0$, figura 7.32 (a). Ahora electrizamos el cuerpo II con una carga del mismo signo que la carga del cuerpo atractivo I . Esto se puede hacer, por ejemplo, mediante el mecanismo ACR. Esto generará una nueva fuerza entre ellos. Es repulsiva y se representará aquí mediante $F_R < 0$. En la figura 7.32 (b), presentamos esta nueva fuerza de repulsión, sin tener en cuenta la fuerza de atracción anterior debida a la polarización del conductor. La nueva carga negativa en el conductor se representa en el centro del cuerpo II únicamente para distinguirla de las cargas polarizadas. Esta nueva carga en el cuerpo II tenderá a polarizar el cuerpo I , generando una fuerza de atracción entre ellos, pero no tendremos en cuenta este pequeño componente aquí. En cualquier caso, la atracción anterior que existía entre ellos permanecerá inalterada. La fuerza neta vendrá dada aproximadamente por $F_N = F_A + F_R$. Si $F_A > |F_R|$, la fuerza neta será atractiva. Si $F_A < |F_R|$, la fuerza neta será repulsiva. En la figura 7.32 (c), mostramos un ejemplo en el que $F_A < |F_R|$.

Según lo que vimos hasta ahora, podemos establecer tres condiciones en las que puede existir una fuerza de atracción neta entre estos dos cuerpos electrizados con cargas del mismo signo.

- La fuerza de atracción inicial es independiente del valor de la nueva carga dada al cuerpo inicialmente neutro II , mientras que la nueva fuerza de repulsión depende del valor de esta nueva carga. Si esta nueva carga es muy importante, $|F_R|$ será generalmente superior a F_A , figura 7.33 (a). Al disminuir la intensidad

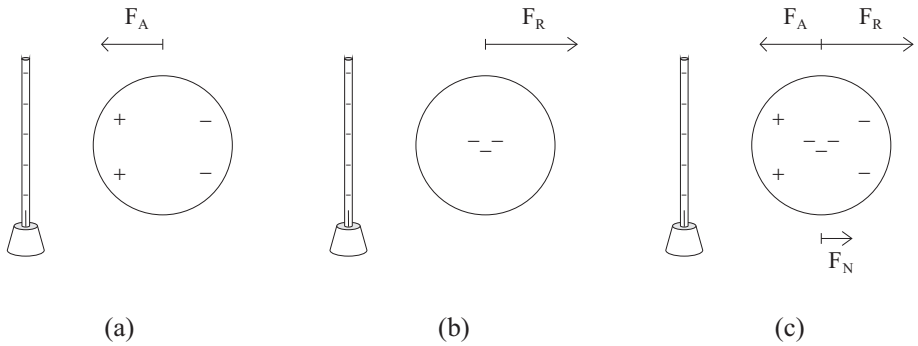


Figura 7.32: (a) Fuerza de atracción debida a la polarización de un conductor neutro cerca de un aislante electrizado. (b) Fuerza de repulsión ideal entre un aislante negativo y un conductor negativo, suponiendo que el conductor no haya sido polarizado por la pajita negativa. (c) Fuerza neta $F_N = F_A + F_R$ entre un aislante electrizado y un conductor, suponiendo que el conductor está electrizado y polarizado. Situación en la que $F_A < |F_R|$.

de esta nueva carga sobre el cuerpo II, podemos disminuir la intensidad de la nueva fuerza de repulsión de tal manera que subsista una atracción neta entre los dos cuerpos que tienen una carga neta del mismo signo, figura 7.33 (b).

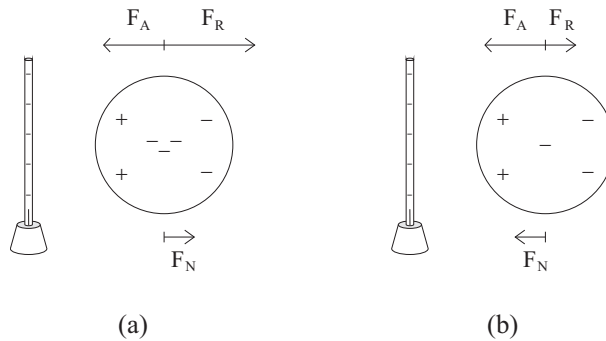


Figura 7.33: (a) Cuando la carga neta del conductor es importante, subsiste una fuerza repulsiva neta entre este y el aislante negativo. (b) Cuando el conductor solo tiene una carga neta débil, la fuerza de atracción debida a su polarización es superior a la fuerza repulsiva debida a su carga neta, lo que da lugar a una fuerza de atracción neta.

- Supongamos que tanto el conductor como el aislante son negativos y que $|F_R| > F_A$, de modo que existe una repulsión neta entre ellos, figura 7.34 (a). Cuando aumentamos la cantidad de carga en el aislante, aumentamos la intensidad de la fuerza repulsiva $|F_R|$. La intensidad de la fuerza de atracción F_A aumenta, pero lo hace más rápidamente que el aumento de $|F_R|$. La razón es que también aumentamos el número de cargas polarizadas en el conductor, co-

mo se muestra en la sección 7.3, figura 7.10. Por ejemplo, si la carga del aislante se triplica, $|F_R|$ también se triplica aproximadamente. Pero, por otro lado, F_A aumenta aproximadamente nueve veces. Cuando se aumenta la cantidad de carga en el aislante, habrá un punto en el que F_A será mayor que $|F_R|$, lo que producirá una fuerza de atracción neta entre ellos, figura 7.34 (b).

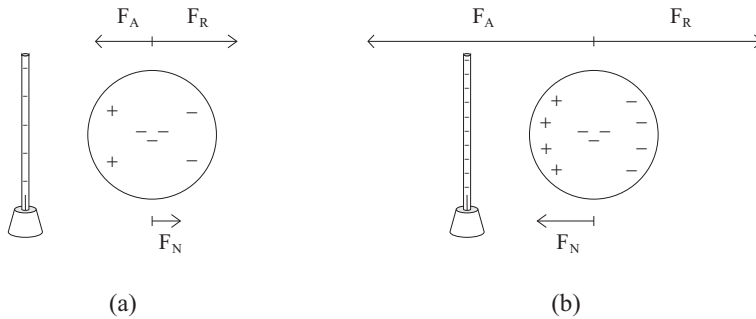


Figura 7.34: (a) La fuerza repulsiva es mayor que la fuerza atractiva. (b) F_A aumenta más que $|F_R|$ debido al aumento de la cantidad de carga en el aislante vecino. Aquí presentamos una situación en la que la fuerza atractiva se volvió mayor que la fuerza repulsiva.

- También existe otra situación que puede producir una fuerza de atracción neta entre dos cuerpos con cargas del mismo signo. Supongamos que el conductor y el aislante son ambos negativos y que $|F_R| > F_A$, de modo que existe una repulsión neta entre ellos cuando están separados por una distancia d , figura 7.35 (a). Las intensidades de estas dos fuerzas de atracción y repulsión se comportan de manera diferente en función de la distancia entre los dos cuerpos. Al reducir su distancia, aumentamos la amplitud de F_R únicamente debido al acercamiento entre la carga negativa de I y la carga negativa neta de II . La fuerza de atracción F_A , por el contrario, aumenta por dos razones diferentes. (a) La primera se debe a la reducción de la distancia entre la carga negativa de I y las cargas polarizadas de II . (b) La segunda razón es que el número de cargas polarizadas en II también aumenta cuando la distancia entre I y II disminuye, como se muestra en la sección 7.3, figura 7.8. Dado que la fuerza depende no solo de la distancia, sino también del número de cargas en los cuerpos, esta polarización más intensa producirá, en consecuencia, una fuerza de atracción mayor. Esto significa que si los cuerpos I y II están muy cerca uno del otro, puede existir una atracción neta entre ellos incluso cuando ambos tienen una carga neta del mismo signo, figura 7.35 (b).

El signo de la fuerza neta (es decir, si es atractiva o repulsiva) dependerá de los valores de las dos cargas, de la distancia entre los cuerpos, de sus formas, de sus tamaños y de sus propiedades intrínsecas (es decir, si son conductores o aislantes, ya que esto afectará a su grado de polarización).

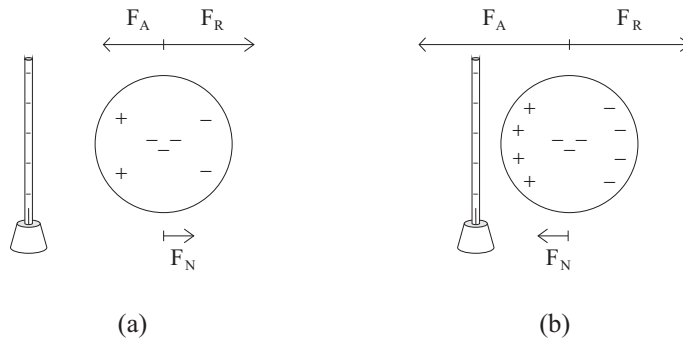


Figura 7.35: (a) La fuerza repulsiva $|F_R|$ es mayor que la fuerza atractiva F_A . (b) Cuando la distancia entre los dos cuerpos disminuye, F_A aumenta más que $|F_R|$. Aquí presentamos una distancia corta en la que la fuerza atractiva se vuelve mayor que la fuerza repulsiva.

El propio Du Fay sabía que, en determinadas circunstancias, dos cuerpos electrizados con cargas del mismo signo podían atraerse:^{10,11}

Para tener éxito en estos experimentos [de atracción entre cuerpos con cargas opuestas y repulsión entre cuerpos electrizados con cargas del mismo tipo], es necesario que los dos cuerpos, que se colocan uno cerca del otro para descubrir la naturaleza de su electricidad, se hagan lo más eléctricos posible; pues si uno de ellos no fuera en absoluto, o fuera débilmente, eléctrico, sería atraído por el otro, aunque fuera de ese tipo que [si se frotara bien] debería ser repelido naturalmente por él. Pero el experimento siempre tendrá éxito si ambos cuerpos son suficientemente eléctricos.

Aepinus dio un primer esbozo de explicación matemática de las posibles atracciones entre dos cuerpos con cargas del mismo signo. Demostró teórica y experimentalmente que si dos cuerpos electrizados con cargas del mismo signo están lo suficientemente cerca, o si una de las dos cargas implicadas es mucho más débil que la otra, los efectos de la polarización mutua pueden ser suficientes para transformar la fuerza repulsiva normal en una atracción.¹²

No entraremos en detalles aquí, pero se puede encontrar un análisis matemático moderno que indica las condiciones en las que los cuerpos electrizados, con cargas del mismo signo, pueden atraerse, por ejemplo, en los trabajos de Maxwell, en un artículo de Melehy y en el libro de Jackson.¹³

¹⁰[DF34a, p. 265].

¹¹In order to succeed in these Experiments [of attraction between oppositely charge bodies, and repulsion between electrified bodies having charges of the same type], 'tis requisite that the two Bodies, which are put near one another, to find out the Nature of their Electricity, be rendered as electrical as possible; for if one of them was not at all, or but weakly electrical, it would be attracted by the other, though it be of that Sort, that [if well rubbed] should naturally be repelled by it. But the Experiment will always succeed perfectly well, if both Bodies are sufficiently electrical.

¹²[Aep79, pp. 126 y 315–325], [BW], y [Hei99, pp. 396–398].

¹³[Max81, Chapter VII: Theory of electrical images, pp. 80–88], [Mel98], y [Jac99, Sección 2.3].

7.11 La conductividad del agua

En la sección 6.3, vimos que el agua dulce descarga un electroscope electrizado. Esto significa que se comporta como un conductor para los experimentos electrostáticos habituales descritos en este libro. Por otro lado, cuando se le aplica una diferencia de potencial de unos pocos voltios a unos cientos de voltios, se comporta como un aislante, como vimos en la sección 6.6. En los experimentos de la sección 2.5, tratamos una diferencia de potencial de unos pocos miles de voltios, cuando el agua se comportaba como un conductor. Hay razones que explican este comportamiento del agua. Una de ellas es que, en su estado natural, el agua dulce contiene iones positivos, H_3O^+ , e iones negativos, OH^- , además de moléculas de H_2O . Además, el agua dulce contiene numerosas sales, minerales e impurezas que están repletas de partículas con carga eléctrica, también llamadas iones. En presencia de diferencias de potencial elevadas, estos iones electrizados se desplazan en el agua, lo que le confiere su comportamiento conductor.

Ahora analizaremos los experimentos de la sección 2.5. Supongamos que la gota de agua del experimento de Gilbert, el experimento 2.10, se encuentra sobre una superficie conductora, como la madera, los metales o la mayoría de los sólidos. Cuando acercamos una pajita de plástico frotada, la gota cambia de forma. Se deforma dirigiéndose hacia la parte frotada de la pajita. Si la fricción entre el agua y la superficie sobre la que se encuentra es baja, la gota puede incluso desplazarse en su conjunto hacia la pajita. Los resultados presentados en este capítulo permiten ilustrar lo que ocurre en este experimento. Esto es lo que muestra la figura 7.36. Supongamos que la pajita se frotó con cabello, adquiriendo así una carga negativa. Cuando se acerca a la gota, el agua se polariza inicialmente en su conjunto, de forma similar a lo que vimos en la figura 7.29. Es decir, se carga positivamente en la zona más cercana a la pajita frotada y se carga negativamente en la zona más alejada que está en contacto con la superficie seca. Como supusimos una superficie sólida conductora, se produce una neutralización eléctrica en la sección del agua que está en contacto con la superficie. Esto es análogo a la conexión a tierra en las figuras 7.20, 7.22 y 7.30. Por lo tanto, el agua termina electrizándose en su conjunto, es decir, con una carga positiva neta, opuesta al signo de las cargas en la pajita. Como las cargas de signo opuesto se atraen, la gota se deforma y apunta hacia la pajita frotada. Incluso puede desplazarse en su conjunto hacia ella.

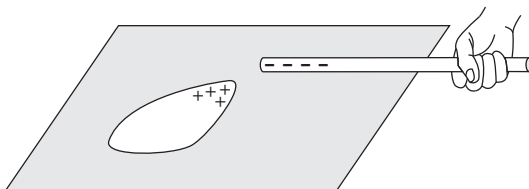


Figura 7.36: Cargas eléctricas en una gota de agua cerca de una pajita de plástico frotada.

En otras palabras, creemos que este comportamiento de la gota de agua no se debe a una simple orientación u organización de las moléculas polarizadas del agua (aunque una molécula H_2O no tiene carga neta, está naturalmente polarizada, como un dipolo eléctrico permanente). Si solo se tratara de la organización o alineación de las moléculas polares del agua, debido a la presencia de la pajita frotada en las proximidades, tendríamos algo análogo a la figura 7.31 (a). En cambio, parece más razonable decir que la gota de agua en su conjunto, sostenida por una superficie conductora y cercana a una pajita frotada, adquirió una carga neta. Además, esta carga neta en la gota debería ser de signo opuesto al de la pajita frotada, como se muestra en la figura 7.30 (c).

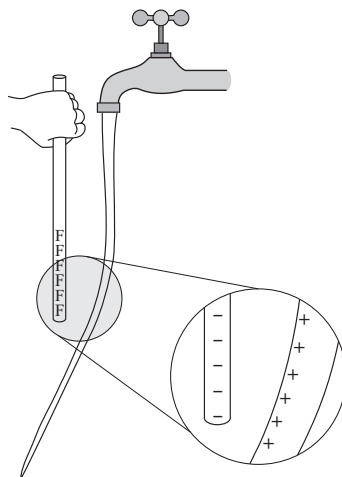


Figura 7.37: Cargas eléctricas en un chorro de agua cerca de una pajita de plástico frotada.

Un fenómeno similar se produce en el experimento de Desaguliers (el experimento 2.8). Tenemos un chorro de agua dulce que sale de un grifo. La figura 7.37 ilustra la distribución de las cargas a lo largo del chorro de agua. Debido a las altas diferencias de potencial de este experimento, este chorro de agua se comporta como un conductor. Además, suponiendo un chorro de agua continuo, se conecta a tierra por contacto con el grifo metálico, que está en contacto con el suelo. Supongamos que acercamos una pajita de plástico con carga negativa al chorro de agua. El chorro de agua está inicialmente polarizado (debido al movimiento y la separación de los iones presentes en el agua, como H_3O^+ , OH^- , etc.), de forma análoga a la figura 7.29. La parte del chorro más cercana a la pajita negativa se carga positivamente. Por otro lado, las cargas negativas en la parte más alejada del chorro se neutralizan debido a la conexión a tierra del chorro de agua. Esto es análogo a la conexión a tierra de las figuras 7.20, 7.22 y 7.30. Por esta razón, el chorro en su conjunto debería cargarse positivamente, principalmente en la sección más cercana a la pajita negativa. Entonces existe una atracción entre las cargas negativas de la pajita de plástico y las cargas positivas del chorro. Por lo tanto, el chorro en su conjunto se curva hacia la pajita.

7.12 ¿Es posible electrizar el agua?

El agua se comporta como un conductor en los experimentos habituales de electrostática. Por lo tanto, es posible electrizarla como se hace habitualmente con los conductores sólidos. Para ello, debe colocarse sobre un recipiente aislante. De esta manera, se evita su descarga hacia el suelo.

Como se indica en la sección 7.11, en el experimento de Gilbert, una pequeña cantidad de agua fue atraída hacia un trozo de ámbar frotado. Es probable que el agua en su conjunto se haya electrizado en esta situación. Pero Gilbert no analizó si el agua se había electrizado en este caso, se limitó a observar su atracción. Gray fue quizás el primero, en 1731, en electrizar agua y confirmar su electrización.¹⁴ Colocó agua sobre un soporte aislante de resina o vidrio. A continuación, acercó un tubo electrizado tres o cuatro veces al agua. Tras este procedimiento, alejó el tubo electrizado del agua. Al acercar un hilo pendular, observó que era atraído por el agua. Esto demostraba que el agua había sido electrizada por el tubo electrizado cuando este se encontraba cerca del agua. El mecanismo de carga en este caso probablemente consistía en diminutas chispas entre el tubo y el agua. Esto provocaba una transferencia de carga del tubo al agua conductora. El agua podía almacenar esta carga adquirida gracias a que se mantenía sobre un soporte aislante. Este experimento fue posteriormente confirmado por Du Fay.¹⁵

Con las adaptaciones adecuadas, es posible reproducir muchos de los experimentos del capítulo 7 utilizando agua en un recipiente de plástico, en lugar de utilizar un cartón fino fijado a una pajita de plástico. El agua asumirá el comportamiento conductor del cartón. El recipiente de plástico evitará la conexión a tierra del agua, al igual que la pajita de plástico aislaba el cartón del electroscopio.

7.12.1 El generador electrostático de Kelvin

Uno de los experimentos más fascinantes que demuestra que el agua se comporta como un conductor en situaciones electrostáticas habituales fue realizado en 1867 por W. Thomson (Lord Kelvin), figura 7.38.

Construyó un instrumento conocido como gotero de agua, máquina eléctrica de gotas de agua, generador de gotas de agua o generador electrostático de Kelvin.¹⁶ A continuación, presentamos los aspectos principales del generador. En primer lugar, se coloca el agua en un recipiente aislante, como un vaso de plástico. En el fondo de este vaso hay un agujero o un gotero. Al comienzo del experimento, permanecen cerrados. Conectamos un anillo metálico al vaso con un material aislante. El anillo debe estar muy cerca del agujero o del gotero, a unos centímetros de distancia. Frotamos una pajita de plástico con el cabello para cargarla negativamente. A continuación, raspamos la pajita negativa sobre el anillo metálico para cargarlo negativamente. Tras este procedimiento, alejamos la pajita de plástico del anillo. El agua, al comportarse como un conductor, se polariza debido a la presencia del anillo negativo situado justo debajo. La parte inferior del agua se carga positivamente, mientras que la parte superior, que

¹⁴[Gra31b] y [Hei99, p. 253].

¹⁵[DF33a, p. 34] y [DF33c, p. 84].

¹⁶[Tho], [Llo80] con traducción al portugués en [Llo07] y [CA08].

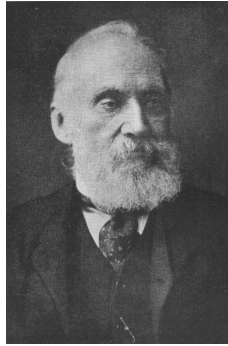


Figura 7.38: W. Thomson (Lord Kelvin) (1824–1907).

está en contacto con el aire, se carga negativamente, figura 7.39 (a). Este fenómeno es análogo a la polarización descrita en la figura 7.29.

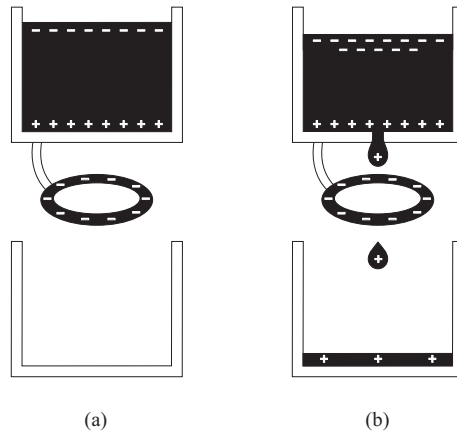


Figura 7.39: (a) Polarización del agua debido al anillo negativo situado en las proximidades. (b) Las gotas de agua caen con carga positiva.

Una vez que el anillo se cargó negativamente, abrimos el orificio o el gotero. Las gotas de agua deben pasar por el centro del anillo, sin entrar en contacto con él. La parte inferior del agua en el recipiente superior está cargada positivamente. Por lo tanto, lo mismo ocurrirá con las gotas. Estas gotas positivas se recogen en un segundo recipiente aislante situado debajo del anillo, figura 7.39 (b). A medida que las gotas de agua siguen cayendo, aumenta la cantidad de carga acumulada en el recipiente inferior. Esta figura muestra los aspectos principales del mecanismo de funcionamiento del generador de Kelvin.

Normalmente, el generador de Kelvin funciona con dos goteros. Uno de los anillos está electrizado positivamente y el otro negativamente, figura 7.40. Un alambre metálico con una esfera metálica en su extremo superior está conectado al interior de cada

recipiente inferior. Las dos esferas metálicas deben estar muy próximas entre sí, con una distancia típica de unos pocos milímetros. Las gotas de agua que caen a través del anillo negativo se cargan positivamente, mientras que las que caen a través del anillo positivo se cargan negativamente.

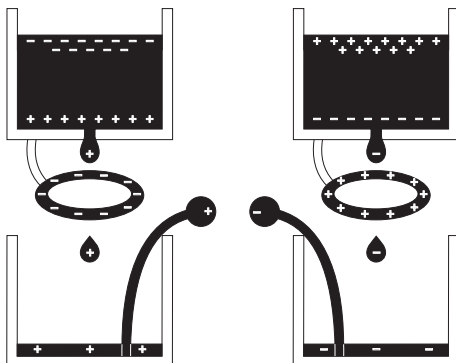


Figura 7.40: Primera fase del proceso de funcionamiento del generador de Kelvin.

Con el paso del tiempo, la cantidad de cargas acumuladas en cada receptáculo inferior aumenta. Por lo tanto, la diferencia de potencial entre las dos esferas metálicas también aumenta. El aire seco es normalmente un buen aislante, especialmente si la fuerza eléctrica por unidad de carga es inferior a un determinado límite. Cuando la fuerza por unidad de carga es superior a este límite, se vuelve conductor y se produce una descarga eléctrica en el aire, en forma de chispa. Este límite se denomina campo eléctrico de ruptura o ruptura corona. A presión atmosférica, es de aproximadamente 3×10^6 V/m. Cuando la fuerza eléctrica por unidad de carga en la región entre las dos esferas supera este límite, se produce una descarga eléctrica en el aire, figura 7.41.

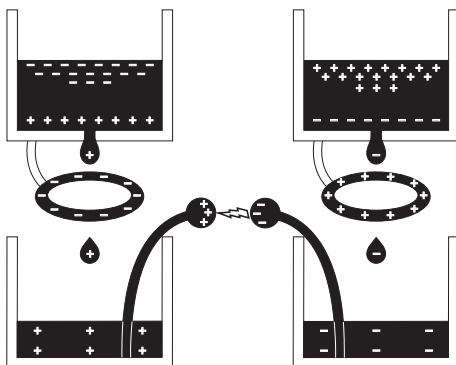


Figura 7.41: Descarga eléctrica entre esferas con cargas opuestas.

Esta descarga neutraliza las cargas opuestas que se habían acumulado en los receptáculos inferiores. Si las gotas continúan cayendo después de la chispa, el proceso continúa como se muestra en las figuras 7.40 y 7.41. El intervalo de tiempo entre dos

chispas consecutivas dependerá de la frecuencia de las gotas, la distancia entre las esferas metálicas, la cantidad de carga en los anillos y la distancia entre los anillos y los goteros. Un orden de magnitud típico es una chispa cada 10 segundos. Las chispas continuarán mientras las gotas sigan cayendo.

Este experimento muestra dos cosas importantes. La primera es que el agua se comporta como un conductor en los experimentos habituales de electrostática, como vimos en las secciones 6.3 y 7.11. La segunda es que si un cuerpo electrizado se encuentra cerca del lugar donde cae el agua, las gotas de agua se cargarán eléctricamente, con una carga neta de signo opuesto al de las cargas del cuerpo electrizado cercano.

7.13 La conductividad del aire

Experimento 7.25

Es fácil electrizar un electroscopio en tiempo seco. Basta con frotar una pajita de plástico con el cabello y luego rasparla sobre el cartón fino del electroscopio, como vimos en el experimento 6.2, figura 6.5. El electroscopio permanece cargado durante varios segundos o minutos después de este procedimiento. Esto significa que el aire seco es un buen aislante.

Sin embargo, no es un aislante perfecto. Después de varios minutos, el electroscopio se descarga por completo, como vimos en el experimento 6.21. En cualquier caso, puede considerarse un buen aislante, según la definición dada en la subsección 6.7.1.

Experimento 7.26

El experimento 7.25 se repite en condiciones de humedad y lluvia. La tira del electroscopio permanece levantada mientras raspamos la pajita sobre el cartón del electroscopio, como se muestra en la figura 6.5 (b).

A continuación, retiramos la pajita frotada. La tira vuelve a bajar poco después, volviendo a la situación de la figura 6.5 (a). Cuanto mayor sea la humedad del aire, más rápida será la descarga del electroscopio. En función del valor de esta humedad, el aire puede comportarse como un mal o un buen conductor. Es la presencia de agua en el aire húmedo lo que hace que se comporte como un conductor, ya que el agua es un buen conductor para los experimentos habituales de electrostática, como se indica en la sección 7.11.

Experimento 7.27

Existe otro procedimiento sencillo que puede influir en las propiedades aislantes del aire. Repetimos los experimentos 6.2 y 7.25 en tiempo seco. El electroscopio está inicialmente electrizado. Su tira permanece levantada, como en la figura 7.42 (a).

Encendemos un fósforo o un mechero cerca del electroscopio electrizado. La tira desciende en pocos segundos, figura 7.42 (b). La tira no vuelve a subir después de retirar el fósforo, figura 7.42 (c).

Este experimento demuestra que el electroscopio se descarga muy rápidamente cuando hay fuego cerca.

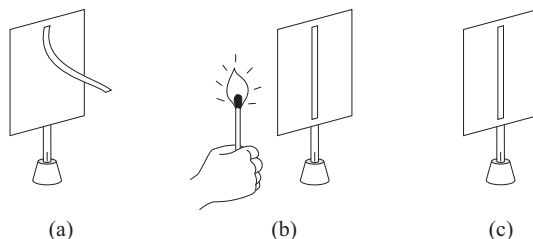


Figura 7.42: (a) Electroscopio electrizado. (b) La tira desciende en solo unos segundos cuando se frota un fósforo o un mechero cerca. (c) La tira permanece vertical después de retirar el fósforo.

La interpretación moderna de este fenómeno es que la llama aumenta considerablemente la ionización del aire. Con el aumento del número de cargas positivas y negativas móviles en el aire, las cargas sobre el electroscopio se neutralizan rápidamente por estos iones. Con el aumento de la conductividad del aire, el electroscopio también se descarga a través de la mano y el suelo. El fuego hace que el aire se comporte como un buen conductor.

7.14 ¿Cómo descargar un aislante electrizado?

La conexión a tierra es la forma más sencilla de descargar un conductor electrizado, como vimos en las secciones 4.5, 6.2 y 6.3. Para ello, basta con que el conductor entre en contacto con el suelo. Otro método consiste en conectar el conductor electrizado al suelo mediante una sustancia conductora (como el cuerpo humano o un alambre metálico).

Pero este método no permite descargar un aislante electrizado. Esto queda patente en el primer experimento que dio origen a la ciencia de la electricidad, el efecto del ámbar, secciones 2.1 y 2.2. En la figura 2.3, tenemos una pajita frotada que atrae pequeños trozos de papel. La pajita de plástico se sostiene en la mano mientras atrae estos trozos. A pesar de ello, la pajita no se descargó. Esta es una de las principales diferencias entre los conductores y los aislantes, como vimos en la sección 7.1.

Experimento 7.28

Se frota una pajita de plástico con cabello. A continuación, la pajita atrae trozos de papel, como en el experimento 2.1. A continuación, intentamos conectar la pajita a tierra. Para ello, conectamos un alambre metálico entre la tierra y una de las partes frotadas de la pajita. Tras este procedimiento, se retira el alambre metálico. Volvemos a acercar la pajita a estos trozos. Observamos que la pajita sigue atrayéndolos.

Lo que ocurre en este experimento es fácil de describir. Solo la parte específica de la pajita de plástico que entró en contacto con el alambre metálico se descargó a tierra. En otras palabras, las otras partes frotadas de la pajita no se descargan mediante esta conexión a tierra eléctrica. Después de todo, estas cargas no pueden desplazarse a través de la pajita, ya que el plástico es un muy buen aislante.

En el siguiente experimento, veremos tres procedimientos utilizados para descargar un aislante electrizado.

Experimento 7.29

Se frota tres pajitas de plástico por igual con el cabello. Las llamamos pajitas *I*, *II* y *III*. Después de cargarlas, las pajitas *II* y *III* se mantienen en posición vertical sobre soportes adecuados separados, como los del péndulo eléctrico. Por ejemplo, pueden sostenerse con tensores de papel conectados a un vaso de plástico lleno de pasta de yeso o cemento blanco, figura 7.43. Con la pajita *I*, repetimos el experimento 2.1 y observamos que atrae pequeños trozos de papel cuando se acerca a ellos.

Después de unos minutos o unas horas, se repite este experimento con la pajita *II*, que solo fue sometida al frotamiento inicial con las pajitas *I* y *III*. Normalmente, solo atraerá un número muy reducido de trozos de papel, mucho menos que la pajita *I*. El número de trozos de papel dependerá del tiempo de espera tras el roce inicial, del tipo de roce, del tipo de plástico y de las condiciones meteorológicas locales (es decir, si es un día seco o húmedo).

Al día siguiente, se repite este experimento con la pajita *III*. No se hizo nada con esta pajita después del roce inicial. Observamos que ya no atrae los trozos de papel, figura 7.43.

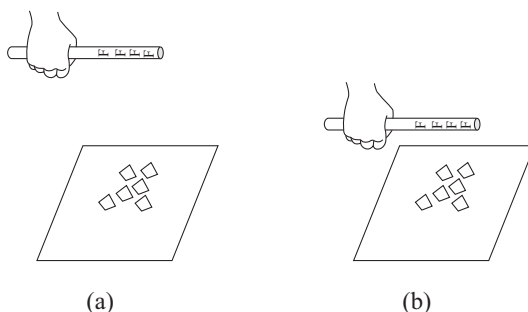


Figura 7.43: Una pajita frotada pierde su electrización varias horas después de haber sido frotada. Ya no atrae los trozos de papel cuando se acerca a ellos.

El símbolo *F* en la figura 7.43 solo indica que la pajita se frotó hace varias horas. No se hizo nada más con ella. A pesar del frotamiento, pierde su electrización tras un largo periodo de espera. En otras palabras, pierde su capacidad de atraer pequeños trozos de papel cuando se acerca a ellos. Según la definición de la sección 2.1, esto significa que la pajita volvió a ser eléctricamente neutra, como lo era antes del frotamiento. En otras palabras, perdió su electrización, o las cargas que había adquirido durante el proceso de fricción. Estas cargas se pierden en el aire ambiente. Aunque el aire seco es un buen aislante, no es perfecto, como se explica en la subsección 6.7.1.

Experimento 7.30

Ahora presentamos el segundo procedimiento para descargar un aislante electrizado.

Al principio, frotamos una pajita de plástico con el cabello. Atrae trozos de papel, como en el experimento 2.1. Después de esta prueba, la pajita de plástico se sumerge en un recipiente lleno de agua dulce. Se saca la pajita del agua. Volvemos a acercar la pajita a estos trozos. Esta vez, ya no los atrae, como se muestra en la figura 7.43. Al igual que en los otros experimentos, solo debemos acercar la pajita a los trozos, evitando que entren en contacto. Si entran en contacto, los trozos pueden pegarse a la pajita debido a su humedad. También podemos dar unos golpecitos a la pajita después de sacarla del agua, o soplar ligeramente sobre ella, para eliminar el exceso de agua de su superficie.

Este experimento muestra que la pajita frotada perdió su poder de atracción después de haber sido sumergida en agua. Esto significa que el agua neutralizó la pajita. Esta neutralización se debe, una vez más, al poder conductor del agua dulce. Cuando el agua entra en contacto íntimo con todas las partes frotadas de la pajita de plástico que se electrizaron por fricción, neutraliza estas cargas superficiales gracias a la gran cantidad de iones positivos y negativos móviles que contiene. La diferencia con respecto al experimento 7.28 es que ahora tenemos una conexión a tierra de todas las partes electrizadas de la pajita frotada, que se neutralizan simultáneamente.

Experimento 7.31

El tercer procedimiento para descargar un aislante electrizado también es muy sencillo.

Para empezar, cargamos una pajita de plástico frotándola con el cabello. Entonces atrae trozos de papel, como en el experimento 2.1. Alejamos la pajita frotada de la mesa. Después de este procedimiento, encendemos un fósforo o un mechero cerca de la pajita. La llama debería desplazarse cerca de todas las partes de la pajita frotada, como en la figura 7.44.

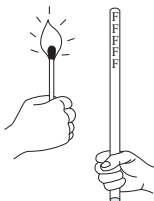


Figura 7.44: Encendemos un fósforo cerca de una pajita frotada.

Después de este procedimiento, la pajita se vuelve a acercar a los trozos de papel. Esta vez, ya no los atrae, como se muestra en la figura 7.43. La pajita se descargó gracias a este procedimiento.

Como vimos en la sección 2.6, Gilbert fue el primero en describir este fenómeno. Observó que una llama impedía las atracciones habituales ejercidas por las sustancias

frotadas. En lugar de observar la atracción o la ausencia de atracción ejercida sobre los trozos de papel, analizó si el ámbar frotado orientaba o no un versorio situado en las proximidades. Como él mismo dijo,¹⁷

[los eléctricos frotados] no tienen ningún efecto sobre un versorio si está muy cerca, por cualquier lado, de la llama de una lámpara.

Interpretó este hecho suponiendo que la llama consumía los supuestos efluvios emitidos por las sustancias frotadas. Pensaba que las atracciones habituales ejercidas por el ámbar frotado se debían a la acción de estos efluvios emitidos.

Hoy en día, tenemos otra interpretación de este fenómeno. Lo que ocurrió en este caso es análogo a la situación descrita en el experimento 7.27. En efecto, la llama aumenta considerablemente la ionización de las moléculas de aire. En consecuencia, el aire comienza a comportarse como un buen conductor, ya que ahora contiene un gran número de iones móviles positivos y negativos. El contacto íntimo entre este aire ionizado y todas las partes de la pajita frotada neutraliza las cargas que se encontraban en toda la superficie del plástico. De esta manera, la pajita pierde las cargas que había adquirido por fricción. Por lo tanto, ya no atrae los trozos de papel.

7.15 ¿Un pequeño trozo de papel es atraído con mayor fuerza cuando se encuentra sobre un aislante o sobre un conductor?

Experimento 7.32

Elegimos una bolsa de plástico que actúa como aislante, es decir, que no descarga un electroscopio electrizado cuando ambos entran en contacto. Cortamos varios trozos de esta bolsa de plástico y varios trozos de una hoja de papel. A continuación, creamos dos superficies: una superficie aislante formada por una placa de poliestireno y una superficie conductora formada por una hoja de papel (o una mesa o una placa metálica). Un grupo de trozos de plástico, el grupo *I*, se coloca sobre la placa de poliestireno. Sobre la misma placa, colocamos también un grupo de trozos de papel, el grupo *II*, separado del primer grupo. Sobre la superficie conductora, se coloca otro grupo de trozos de plástico, el grupo *III*. Sobre la misma superficie conductora, pero separado del tercer grupo, colocamos un grupo de trozos de papel, el grupo *IV*.

Antes de comenzar el experimento, es importante verificar que los pequeños trozos de plástico sobre la placa de poliestireno y la hoja de papel sean neutros. A veces, estos trozos de plástico se electrizan al manipularlos, al cortarlos, etc. Para verificar esta neutralidad de carga, acercamos una pajita de plástico neutra a estos pequeños trozos de plástico. Si no hay atracción entre ellos, los trozos de plástico pueden considerarse neutros. Si son atraídos por la pajita neutra, significa que los trozos de plástico están electrizados. Si esto ocurre, debemos esperar varias horas hasta que se descarguen naturalmente en el aire. Entonces podemos comenzar el experimento.

¹⁷[rubbed electrics] have no effect on a versorium if it have very near it on any side the flame of a lamp.

Ahora frotamos una pajita de plástico con el cabello. Acercamos la pajita horizontal a cada uno de estos cuatro grupos. Observamos que la fuerza más importante se ejerce sobre el grupo *IV*, los trozos de papel sobre la superficie conductora, seguido del grupo *II*, los trozos de papel sobre la superficie aislante. Los grupos *I* y *III*, los trozos de plástico sobre cualquiera de las dos superficies, son atraídos muy débilmente, y es difícil distinguir cuál sufre la mayor atracción. La fuerza puede estimarse de dos maneras. La primera consiste en observar la distancia a la que comienza a detectarse la fuerza, como lo indica el movimiento de los trozos de papel o plástico. Cuanto mayor sea la distancia, mayor será la fuerza, figura 7.45. El segundo método consiste en observar el número de trozos de papel o plástico que son atraídos por la pajita frotada cuando se encuentra a una distancia constante de la mesa (por ejemplo, 5 o 10 cm).

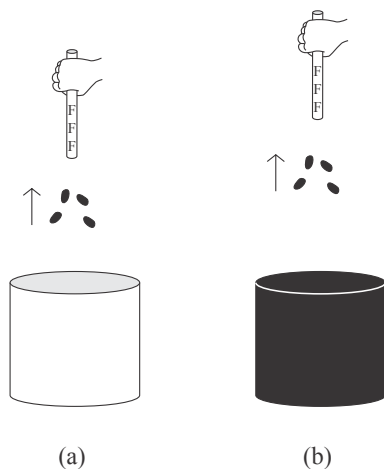


Figura 7.45: (a) Los trozos de papel sostenidos por una superficie aislante son atraídos por una pajita frotada. (b) Los trozos de papel sostenidos por una superficie conductora son atraídos por una pajita frotada. La distancia mínima a la que la pajita puede atraer los trozos de papel es mayor en el caso (b) que en el caso (a). Las flechas indican la dirección del movimiento.

Experimento 7.33

Ahora utilizamos un péndulo eléctrico compuesto por un disco de papel sostenido por un hilo de seda. Frotamos una pajita de plástico *I* con el cabello para que se cargue negativamente. A continuación, la colocamos sobre un soporte adecuado, lejos del péndulo. Cargamos positivamente una segunda pajita frotándola entre dos tubos de goma dura. También se coloca lejos del péndulo y de la primera pajita.

Tocamos el disco de papel con el dedo. A continuación, acercamos lentamente la pajita *I* al disco. El péndulo es atraído por la pajita. No dejamos que entren en contacto. Después de retirar la primera pajita, acercamos la segunda al péndulo. El péndulo también es atraído por esta pajita. También impedimos que entren en contacto.

Ahora sostenemos una hoja de papel (o una placa metálica) y la colocamos en diagonal debajo del disco de papel, en el lado opuesto a la pajita, figura 7.46. La hoja de papel debe tocar el disco.

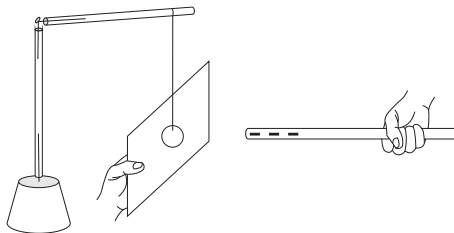


Figura 7.46: Al principio, el disco de papel de un péndulo eléctrico toca la hoja de papel o la placa metálica.

A continuación, acercamos la primera pajita al péndulo de manera que este quede entre la hoja de papel y la pajita. A cierta distancia, el disco se desplaza hacia la pajita, alejándose de la hoja de papel. Cuando esto ocurre, retiramos la hoja de papel, pero evitando que el disco y la pajita entren en contacto. Después de esto, también se puede retirar la pajita y el péndulo vuelve a la posición vertical. Si volvemos a acercar la pajita *I* al péndulo, observamos una atracción entre ambos. Hay que evitar que entren en contacto.

A continuación, retiramos la primera pajita y acercamos lentamente la pajita *II* al péndulo. No debemos acercarla demasiado al disco y debemos observar atentamente en qué dirección tiende a desplazarse el disco. Cuando este experimento se realiza con cuidado, observamos que el disco tiende a alejarse de la pajita *II*, ya que es repelido por ella! Esto indica que los dos cuerpos tienen cargas del mismo signo: positivas. Si la pajita *II* se acerca demasiado al disco, se producirá una atracción entre ellos, como se ve en la sección 7.10. Esto debe evitarse.

Experimento 7.34

El experimento 7.33 puede repetirse invirtiendo el orden en el que se acercan las pajitas. Es decir, primero se acerca la pajita *II*, que está cargada positivamente, al disco de papel que toca la hoja de papel. Esta hoja de papel debe retirarse cuando el disco de papel se acerque a la pajita. Hay que evitar que los dos elementos entren en contacto. Una vez retirada la hoja de papel, también hay que retirar la segunda pajita. Si ahora acercamos lentamente la pajita *I* al disco de papel, observaremos una repulsión entre ambos. Esto indica que los dos tienen cargas negativas. En otras palabras, la carga adquirida por el disco de papel es de signo opuesto a la carga de la segunda pajita.

Experimento 7.35

Repetimos los experimentos 7.33 y 7.34, pero esta vez colocando el disco de papel sobre una placa de poliestireno. Al final de este experimento, observamos que el disco de papel es atraído por las dos pajitas, *I* y *II*, independientemente de cuál se haya desplazado primero hacia él.

Los experimentos 7.33 y 7.34 muestran que cuando un trozo de papel (en este caso, el disco de papel), colocado sobre una hoja de papel conductor, es atraído por una pajita electrizada, se produce una electrización del trozo de papel. Además, la carga que adquiere después de tocar la hoja de papel y alejarse de ella es de signo opuesto al de la pajita electrizada. El experimento 7.35, por el contrario, muestra que un trozo de papel, cuando se coloca sobre una placa de poliestireno aislante, no adquiere ninguna carga neta después de haber sido atraído por una pajita electrizada. En otras palabras, no hay carga neta en el pequeño trozo de papel después de que se haya alejado de la placa de poliestireno.

Capítulo 8

Consideraciones finales

8.1 Cambio de nombres y significados: de cuerpos eléctricos y no eléctricos a aislantes y conductores

En 1600, Gilbert clasificó los cuerpos en dos categorías: eléctricos y no eléctricos, secciones 2.7 y 2.8. Los materiales eléctricos, como el ámbar, eran aquellos que, tras ser frotados, adquirían la propiedad de atraer sustancias ligeras cercanas. Los materiales no eléctricos no adquirían esta propiedad mediante fricción. Todos los metales, en particular, formaban parte de los cuerpos no eléctricos.

En 1729, Gray descubrió que al colocar un cuerpo electrizado, como el vidrio flint frotado, en contacto o cerca de un metal, este último adquiría la propiedad de atraer sustancias ligeras situadas en las proximidades. Vimos experimentos que demuestran este efecto en la sección 7.4. Los procedimientos de Gray se discutirán en detalle en el apéndice B. El mismo comportamiento de atracción se producía también con otros cuerpos clasificados como no eléctricos en la época de Gray. Du Fay descubrió el mecanismo *ACR*, demostrando que una fina pieza de metal se electrizaba al entrar en contacto con otro cuerpo frotado, sección 4.8. Más tarde, se aprendió a electrizar un trozo de metal por inducción utilizando la polarización eléctrica y la conexión a tierra, sección 7.5. En la década de 1770, se descubrió que los metales también podían electrizarse por fricción, siempre que estuvieran aislados de la Tierra, sección 6.8. Estos descubrimientos llevaron al abandono de la nomenclatura y el sistema de clasificación de Gilbert.

Desde entonces, adoptamos otra clasificación. Las sustancias se clasifican ahora en «conductores» y «aislantes». Estas expresiones se deben a Du Fay y Desaguliers, subsección 6.3.1. La mayoría de los cuerpos que Gilbert clasificaba como eléctricos se denominan ahora aislantes. Los cuerpos que se denominaban no eléctricos se denominan ahora conductores. Aquí hay una novedad conceptual. No se trata solo de un cambio de nombre o de una simple modificación de la nomenclatura. Después de todo, es posible hacer que los metales atraigan sustancias ligeras después de haber sido

frotados, siempre que los metales estén aislados durante el frotamiento. Lo mismo ocurre con otros materiales aislados. Es la distinción de Gilbert la que ya no tiene sentido. Lo que caracteriza a los conductores ideales es el hecho de que poseen cargas eléctricas móviles y permiten el paso o el flujo de cargas a través de ellos. Los aislantes ideales, por el contrario, no poseen cargas móviles, salvo en el interior de sus moléculas. Además, los aislantes no permiten el paso o el flujo de cargas a través de ellos.

Existe una gradación entre los buenos conductores y los buenos aislantes. Además, estas propiedades dependen no solo de las propiedades intrínsecas de estos cuerpos, sino también de las condiciones externas a las que están sometidos. En cualquier caso, la distinción entre sustancias conductoras y aislantes es una de las características más importantes de toda la ciencia de la electricidad.

8.2 Datos sencillos y básicos sobre la electricidad

Después de realizar los experimentos descritos en este libro, adquirimos conocimientos razonables sobre la electricidad. Es evidente que no cubrimos todos los aspectos posibles del tema. En cualquier caso, ahora tenemos una idea clara de los principales hechos relacionados con la electricidad. En esta sección, presentamos, en palabras de Du Fay, los hechos o principios simples y primitivos relacionados con la electricidad.¹ Nos limitamos aquí a describir estos hechos observados, sin explicarlos. Por lo tanto, podemos considerarlos primitivos. En otras palabras, podemos utilizar estos principios simples para explicar otros fenómenos y experimentos más complejos, pero los principios fundamentales en sí mismos no se explican. Nunca es posible explicarlo todo. Siempre es necesario partir de ciertos hechos iniciales o considerarlos verdaderos. A continuación, utilizamos estas hipótesis primitivas para explicar otras observaciones de la naturaleza. Estos son los hechos primitivos:

1. Los cuerpos naturales pueden encontrarse en tres estados diferentes denominados eléctricamente neutros, cargados positivamente y cargados negativamente. También se dice que tienen una carga nula, una carga positiva y una carga negativa, respectivamente. También se puede decir que los cuerpos no están electrizados, o están electrizados positiva o negativamente.
2. Estos estados se caracterizan por el comportamiento observado de los cuerpos. Dos cuerpos neutros no se atraen ni se repelen. Existe una atracción entre un cuerpo positivo y un cuerpo inicialmente neutro. También existe una atracción entre un cuerpo negativo y un cuerpo inicialmente neutro. Los cuerpos con cargas de signo opuesto se atraen. Los cuerpos con cargas del mismo signo normalmente se repelen, pero en algunas situaciones también pueden atraerse.
3. Estas fuerzas de atracción y repulsión aumentan en intensidad cuando disminuye la distancia entre los cuerpos en interacción. La intensidad de estas fuerzas también aumenta cuando aumenta la fuerza de la carga en los cuerpos. Estas fuerzas son mutuas, actuando con la misma intensidad sobre los dos cuerpos en

¹[DF34c, p. 525].

interacción. Se dirigen a lo largo de la línea recta que une los cuerpos, pero en direcciones opuestas.

4. Los cuerpos se pueden dividir en dos grupos llamados conductores y aislantes. La principal diferencia entre estos dos grupos es que los conductores tienen cargas móviles y permiten el paso o el flujo de cargas eléctricas a través de ellos. Los aislantes, por el contrario, no tienen cargas móviles, excepto en el interior de sus moléculas. Los aislantes no permiten el paso o el flujo de cargas a través de ellos.
5. Los conductores y los aislantes pueden ser eléctricamente neutros, positivos o negativos. Cuando un conductor cargado toca el suelo, se descarga. Este proceso se denomina puesta a tierra. La misma descarga no se produce en el caso de un aislante cargado que toca el suelo. Otra forma de realizar esta clasificación consiste en tocar un extremo del cuerpo con la placa de cartón de un electroscopio electrizado y tocar el otro extremo del cuerpo con el suelo. Los cuerpos que descargan el electroscopio se denominan conductores, mientras que los que no lo descargan se denominan aislantes.
6. Un cuerpo que se comporta como un aislante cuando se somete a una pequeña diferencia de potencial eléctrico puede comportarse como un conductor cuando dicha diferencia de potencial supera un determinado valor. La mayoría de los cuerpos sólidos y líquidos se comportan como conductores en los experimentos habituales de electrostática, ya que pocos de ellos son aislantes. Entre los aislantes se encuentran el aire seco, el ámbar, la seda y la mayoría de los plásticos y resinas.
7. El comportamiento de un cuerpo como conductor o aislante también depende de otros aspectos. Supongamos que un extremo del cuerpo toca el cartón de un electroscopio cargado, mientras que el otro extremo toca el suelo. Los factores que influyen en las propiedades de este cuerpo son los siguientes: (a) El tiempo necesario para descargar un electroscopio (cuanto más tiempo de contacto, mayor será la cantidad de descarga). (b) La longitud del cuerpo (cuanto mayor sea esta longitud, más lenta será la descarga). Y (c) la sección transversal del cuerpo (cuanto mayor sea esta sección, más rápida será la descarga).
8. Los cuerpos neutros pueden cargarse mediante varios mecanismos. El procedimiento más habitual es el roce de dos cuerpos neutros. Después de la fricción, uno de los cuerpos frotados se vuelve positivo y el otro negativo. Los aislantes solo se cargan en la parte frotada de su superficie. La carga adquirida por los conductores frotados, por el contrario, se extiende por las superficies exteriores de los conductores cuando estos están completamente rodeados de aislantes, o va a tierra si hay un contacto conductor con la tierra.
9. Un conductor neutro también puede adquirir una carga de un aislante cargado cuando se ponen en contacto entre sí, sin ninguna fricción. La carga adquirida por el conductor tiene el mismo signo que el aislante cargado. En este proceso, la cantidad de carga perdida por el aislante es igual a la ganada por el conductor.

Por otra parte, la cantidad de carga adquirida por un aislante neutro cuando entra en contacto con otro aislante cargado es insignificante cuando no hay fricción entre ellos.

10. Los conductores se se polarizan eléctricamente en presencia de un cuerpo cargado cercano. La parte del conductor más cercana al cuerpo cargado se electriza con una carga de signo opuesto al del cuerpo cargado cercano. La parte más alejada del conductor se electriza con una carga del mismo signo que el cuerpo cercano cuando el conductor está aislado eléctricamente. Si el conductor está aislado y se separa en dos partes en presencia del cuerpo cargado cercano, ambas partes se electrizarán con cargas de signo opuesto.
11. Si el conductor está conectado a tierra eléctricamente en presencia del cuerpo cargado cercano, la parte del conductor más alejada del cuerpo cargado se neutralizará. Este hecho permite que un conductor se electrice con una carga de signo opuesto al del cuerpo cercano.
12. Las moléculas de un aislante se polarizan en presencia de un cuerpo cargado cercano. La parte de cualquier molécula que está más cerca (más lejos) del cuerpo cargado se electriza con el signo opuesto (idéntico) al del cuerpo cargado. Estas cargas polarizadas se limitan a las moléculas y no se desplazan a lo largo del aislante. Además, no pasan a otro conductor que entre en contacto con el aislante.
13. El número de cargas polarizadas en los conductores cercanos a un cuerpo cargado aumenta a medida que disminuye la distancia entre ellos. Lo mismo ocurre con las cargas polarizadas efectivas de los aislantes cercanos a un cuerpo cargado.
14. La polarización de los conductores y aislantes aumenta cuando aumenta el grado de electrización del cuerpo cargado cercano.
15. Una fuerza de origen no electrostático mantiene las cargas en la superficie de los conductores y aislantes en reposo cuando estos cuerpos están electrizados o polarizados. Una fuerza de origen no electrostático también es responsable de la generación de cargas opuestas cuando dos cuerpos se frotan entre sí.

Al describir estos hechos sencillos, debemos tener en cuenta que hablamos en términos generales, refiriéndonos implícitamente a los experimentos descritos en este libro. Todos estos efectos dependen del orden de magnitud implicado en los experimentos, siempre hay excepciones en todas las descripciones experimentales. Por ejemplo, cuando decimos que dos cuerpos neutros no interactúan entre sí, no tenemos en cuenta la atracción gravitatoria entre ellos. La razón es que esta interacción gravitatoria no se observa ni se puede detectar en los experimentos ordinarios con cuerpos pequeños y ligeros. Solo muestra su efecto cuando al menos uno de los cuerpos tiene dimensiones astronómicas, como nuestra propia Tierra. Cuando decimos que un cuerpo cargado atrae a un cuerpo inicialmente neutro, suponemos que se trata de

cuerpos ligeros o sostenidos por cordones, de modo que solo hay una pequeña resistencia al movimiento lateral de estos cuerpos. Si este es el caso, estos cuerpos neutros podrán desplazarse cerca del cuerpo cargado cuando exista una atracción entre ellos. Además, para observar este efecto de atracción, la distancia entre los cuerpos en interacción no puede ser muy grande y la carga sobre el cuerpo frotado no debe ser muy débil, ya que de lo contrario estos efectos no son perceptibles. Lo mismo ocurre con los demás principios.

8.3 Descripción del efecto del ámbar

Estos principios primitivos pueden utilizarse para explicar o describir fenómenos más complejos. Pero aquí los utilizaremos para describir lo que ocurrió en el experimento 2.1, que es análogo al efecto del ámbar, el primer experimento de la historia de la electricidad. En este experimento, una pajita de plástico no frotada no atraía los trozos de papel, mientras que una pajita frotada los atraía cuando se acercaba a ellos, como se muestra en las figuras 2.1 y 2.3. El experimento 2.11 dio un resultado diferente. En este caso, un palito de madera, frotado o no, no atraía los trozos de papel, figura 2.9. En los experimentos 2.3, 7.18 y 7.20, observamos que una pajita de plástico frotada ejerce una fuerza mayor sobre pequeños trozos de papel que sobre pequeños trozos de plástico de aproximadamente el mismo peso y forma que el papel. En los experimentos 7.32 a 7.35, se demostró que los trozos de papel que descansan sobre una superficie conductora experimentan una atracción más fuerte por parte de una pajita frotada cerca que los trozos de papel que descansan sobre una superficie aislante. Además, los trozos de papel que descansan sobre una superficie conductora adquieren una carga neta después de ser atraídos por un cuerpo cargado cercano. La carga neta adquirida por los trozos de papel tiene un signo opuesto al del cuerpo cercano que los atrae.

En estos experimentos, los cuerpos que se comportaban como aislantes eran el aire, la pajita de plástico frotada, el hilo de seda del péndulo eléctrico, la placa de poliestireno y los pequeños trozos de plástico que eran atraídos. La pajita de plástico se frotó con cabello. Según lo observado en la sección 5.4, la pajita adquirió una carga negativa. Aunque la sostuvimos en la mano, no se descargó porque el plástico es un aislante.

Los cuerpos que actuaban como conductores en estos experimentos eran el suelo, el cuerpo humano, el palito de madera, el disco de papel del péndulo eléctrico, la hoja de papel que sostenía este disco de papel por encima y los pequeños trozos de papel atraídos por la pajita. No era posible atraer los trozos de papel con un palito frotado. Cuando se frotaba el palito, podía adquirir momentáneamente una carga eléctrica. Pero como se comporta como un conductor en esta situación y se sostenía en nuestra mano en contacto con la Tierra, la madera se conectaba a tierra. Por lo tanto, cualquier carga que apareciera en el palito durante el proceso de fricción se neutralizaba inmediatamente. Por ello, no atraía los pequeños trozos de papel, incluso después de haber sido frotado. Un conductor solo puede conservar las cargas que adquiere por fricción cuando está aislado, como se muestra en la sección 6.8.

La pajita de plástico podía frotarse con aislantes (cabello, tela de seda o una bolsa de plástico) o con conductores (nuestra mano, una hoja de papel o una tela de algodón). No es esencial saber si esta sustancia era un aislante o un conductor. Pero el signo de

la carga adquirida por la pajita de plástico dependerá del tipo de material con el que se haya frotado, es decir, si es un aislante o un conductor.

La atracción que ejerce la pajita frotada sobre un trozo de plástico puede ilustrarse microscópicamente con ayuda de un péndulo de plástico. Como siempre, hay que asegurarse de utilizar un disco de plástico recortado de una bolsa de plástico que actúe como aislante. Además, este disco de plástico debe ser neutro cuando se aleja de otros cuerpos electrizados. En este caso, cuando acercamos la pajita frotada al disco de plástico del péndulo, observamos una débil atracción entre ambos. Se supone que las moléculas de plástico se polarizan en presencia del plástico frotado. La parte de cada molécula que está más cerca del cuerpo frotado se electriza con una carga de signo opuesto. La parte de cada molécula que está más alejada del cuerpo frotado se electriza con una carga del mismo signo que este cuerpo. Esto se ilustra en la figura 8.1 (a). El interior del plástico polarizado se comporta macroscópicamente como si fuera neutro, debido a la cancelación de las cargas vecinas de signos opuestos. Pero la superficie del plástico polarizado se comporta como si tuviera una carga efectiva, tal y como se ilustra en la figura 8.1 (b).

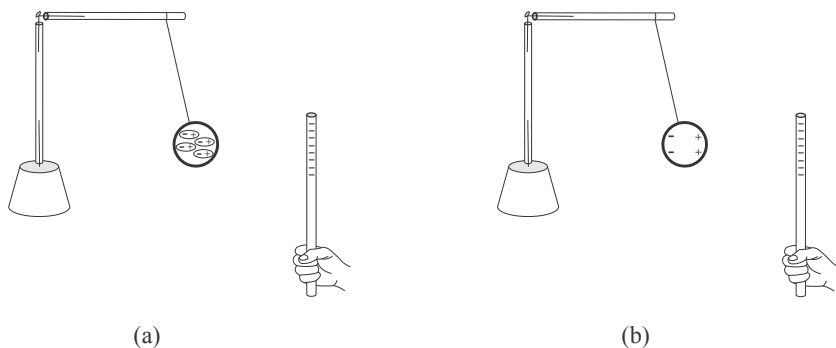


Figura 8.1: (a) Un plástico frotado que polariza y atrae un disco de plástico. (b) Polarización eficaz del disco de plástico.

Se supone que las moléculas de plástico se polarizan por la presencia de la pajita frotada cerca debido a la existencia de cargas positivas y negativas en cada molécula. Además, estas cargas positivas y negativas deben ser móviles dentro de cada molécula. La polarización de cada molécula también se debe al hecho de que las cargas del mismo signo se repelen, mientras que las cargas de signo opuesto se atraen. Una fuerza de origen no electrostático impide que estas cargas polarizadas se alejen indefinidamente unas de otras. Cuanto mayor sea la carga de la pajita de plástico electrizada, mayor será la polarización del disco de plástico. Esta polarización también aumenta cuando disminuye la distancia entre la pajita y el disco. Cuanto mayor sea esta polarización efectiva del disco de plástico, mayor será la fuerza neta que se ejerce sobre él.

La polarización del plástico no cambia mucho si se sostiene con una placa aislante de poliestireno o una hoja de papel conductor. En ambos casos, el plástico no recibe ninguna carga neta.

La atracción observada entre la pajita frotada y el plástico polarizado puede ser consecuencia de otra propiedad de las fuerzas eléctricas: las fuerzas de atracción y repulsión aumentan en intensidad cuando disminuyen las distancias entre las cargas. Por lo tanto, la fuerza de atracción entre la pajita frotada y las cargas efectivas distribuidas sobre la superficie del plástico más cercana a la pajita es mayor que la fuerza de repulsión entre la pajita y las cargas efectivas del mismo signo distribuidas sobre la superficie del plástico más alejada de la pajita. La suma de estas dos fuerzas no es nula. La fuerza de atracción es mayor que la fuerza de repulsión. Estas fuerzas parciales de diferente amplitud generan una fuerza de atracción neta entre la pajita frotada y el plástico polarizado.

Analicemos ahora la atracción ejercida por la pajita frotada sobre un conductor, como un pequeño trozo de papel. Supongamos inicialmente que este trozo de papel es el disco de papel de un péndulo eléctrico suspendido por un hilo de seda o nailon (materiales aislantes). Este caso difiere del disco de plástico en dos aspectos. La primera es que la polarización de un conductor se debe al movimiento de cargas libres en el volumen del conductor. En otras palabras, existe una verdadera polarización macroscópica del conductor, y no solo una polarización de sus moléculas, figura 8.2.

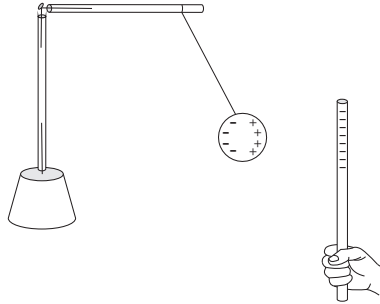


Figura 8.2: Una pajita frotada que polariza y atrae un disco de papel.

La segunda diferencia radica en que esta polarización es más intensa que la polarización efectiva de un aislante en presencia de la pajita frotada. El resultado es que la pajita frotada ejerce una fuerza mayor sobre el disco de papel que sobre el disco de plástico. Suponemos aquí que los discos de papel y plástico tienen la misma forma y tamaño, y que ambos se encuentran a la misma distancia de la pajita frotada. Podemos observar esta segunda diferencia comparando las figuras 8.1 y 8.2. El hilo de seda del péndulo con un disco de papel está más inclinado con respecto a la vertical que el hilo de seda del péndulo con un disco de plástico. En ambas situaciones, la distancia entre la pajita frotada y el péndulo es la misma. Esto indica que la fuerza ejercida sobre el papel conductor es mayor que la ejercida sobre el plástico aislante. Una vez más, una fuerza de origen no electrostático impide que estas cargas polarizadas se separen más entre sí y se dispersen en el aire más allá del disco de papel. Es esta fuerza de origen no electrostático la que mantiene las cargas polarizadas en el borde del disco de papel, impidiendo que se descarguen en el aire.

Si el disco de papel se conecta a tierra mientras está polarizado, las cargas del disco que están alejadas de la pajita frotada se neutralizan con las cargas de la Tierra

debido a la conexión a tierra. Esto es análogo a lo que vimos en la figura 7.30. En este caso, este disco de papel tiene una carga neta distinta de cero, de signo opuesto al de la pajita frotada vecina. Por lo tanto, este disco de papel cargado sufre una fuerza de atracción más fuerte por parte de la pajita frotada que la fuerza ejercida por la pajita frotada sobre el disco polarizado. La razón es que, en la situación actual, la repulsión que existía anteriormente entre la pajita frotada y las cargas del mismo signo que se distribuían por la superficie más alejada del disco de papel ya no existe, figura 8.3.

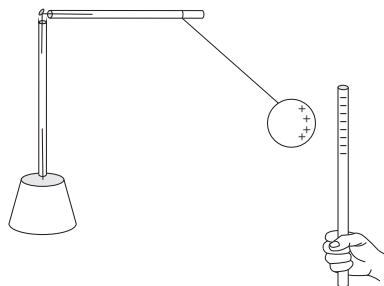


Figura 8.3: Un disco de papel electrizado atraído por una pajita frotada.

En la figura 8.4, comparamos estos tres casos. Suponemos que, en todos los casos, la pajita frotada se encuentra a la misma distancia del péndulo eléctrico. En (a), se ejerce una fuerza de atracción débil sobre un disco de plástico polarizado por una pajita electrizada situada cerca. En (b), se ejerce una fuerza mayor sobre un disco conductor que está más polarizado. En (c), se ejerce una fuerza de atracción aún mayor por una pajita electrizada sobre un disco conductor cargado.

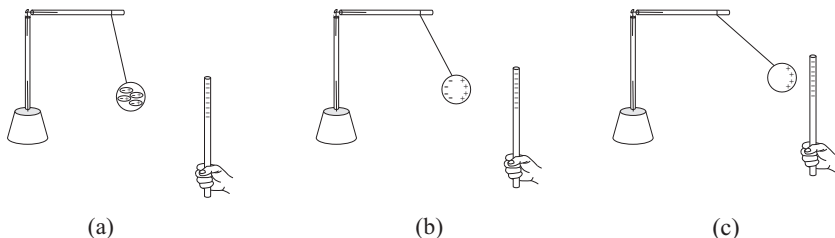


Figura 8.4: (a) Un aislante polarizado atraído por un cuerpo electrizado cercano. (b) Un conductor polarizado atraído. (c) Un conductor cargado atraído. La fuerza aumenta de (a) a (c), con la pajita frotada a la misma distancia de los péndulos eléctricos.

La descripción microscópica de lo que ocurre con el pequeño trozo de papel (un conductor) colocado sobre una placa de poliestireno (un aislante) cuando acercamos una pajita electrizada en el experimento 7.32 se ilustra en la figura 8.5.

El papel conductor está representado por el rectángulo negro. El poliestireno aislante está representado por el rectángulo blanco grande. Cuando se coloca una pajita electrizada sobre el papel, pero lejos de él, el papel y el poliestireno se polarizan, figura 8.5 (a). Aparece una fuerza de atracción electrostática entre la pajita y el trozo de

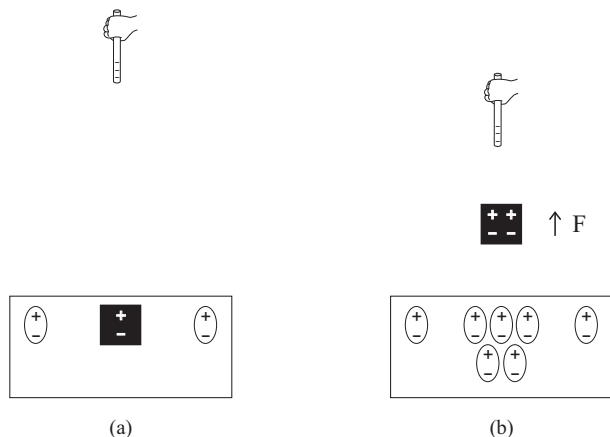


Figura 8.5: (a) Un trozo de papel polarizado colocado sobre una placa de poliestireno polarizado en presencia de una pajita electrizada alejada del papel. (b) Al acercar la pajita al papel, aumentamos la polarización del papel y del poliestireno. Esto crea una fuerza electrostática de atracción sobre el papel, que puede ser superior a su peso. Si esto ocurre, el papel se desplaza hacia la pajita.

papel. Como esta fuerza electrostática es inferior al peso del papel, este no se desplaza hacia la pajita. Al acercar aún más la pajita al papel, aumentamos la polarización del papel y del poliestireno. Esto aumenta la fuerza de atracción entre la pajita y el papel. Cuando la distancia entre la pajita y el papel es inferior o igual a un determinado valor d_1 , la fuerza electrostática se vuelve mayor que el peso del papel. El papel se desplaza entonces hacia la pajita, figura 8.5 (b). La intensidad de la fuerza se indica mediante el tamaño de la flecha.

Se producen procesos diferentes cuando el trozo de papel conductor está inicialmente sostenido por una hoja de papel conductora, figura 8.6.

El trozo de papel conductor está representado por el pequeño rectángulo negro, mientras que la hoja de papel conductora está representada por el rectángulo negro grande. Al colocar una pajita electrizada sobre el papel, pero alejada de él, creamos una redistribución de las cargas en el suelo. Por lo tanto, la superficie del trozo de papel y la superficie de la hoja de papel se electrizan con cargas de signo opuesto a la carga de la pajita, figura 8.6 (a). Entonces se genera una fuerza de atracción electrostática entre el trozo de papel y la pajita. Como esta fuerza electrostática es menor que el peso del trozo de papel, este no se desplaza hacia la pajita. Al acercar aún más la pajita al trozo de papel, aumentamos la electrización del trozo de papel y de la hoja de papel. Cuando la distancia entre la pajita y el trozo de papel es inferior o igual a un determinado valor d_2 , la fuerza electrostática se vuelve superior al peso del trozo de papel. Entonces, este comienza a desplazarse hacia la pajita, figura 8.6 (b). Esta distancia d_2 es mayor que la distancia anterior d_1 , figura 7.45.

Supongamos que los trozos de papel se desplazan por el aire, atraídos por la pajita frotada. Aquí comparamos dos casos. En el primer caso, el trozo de papel estaba inicialmente sostenido por una superficie aislante. En el segundo caso, el trozo de

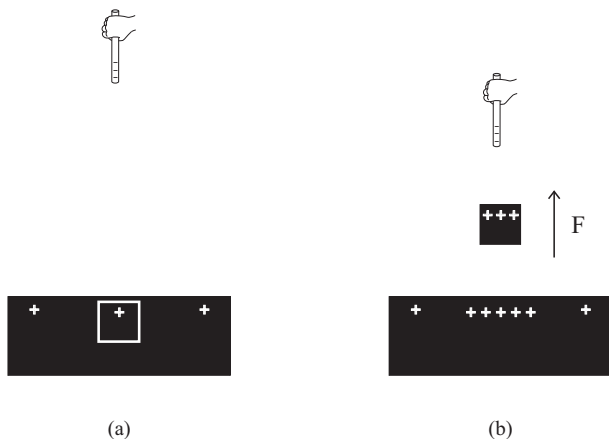


Figura 8.6: (a) Un trozo de papel electrizado colocado sobre una hoja de papel electrizada en presencia de una pajita electrizada alejada del papel. (b) Al acercar la pajita al trozo de papel, aumentamos la electrización del trozo de papel y de la hoja de papel. Esto genera una fuerza electrostática sobre el trozo de papel que puede ser superior a su peso. El trozo de papel puede entonces desplazarse hacia la pajita.

papel estaba inicialmente sostenido por una superficie conductora. Supondremos que la pajita se encuentra a la misma distancia de ambas superficies. También supondremos que cada trozo de papel se encuentra a mitad de camino entre la superficie inferior y la pajita. Las fuerzas se indican mediante el tamaño de las flechas. Es más débil en la primera situación que en la segunda. Esto se puede visualizar comparando las figuras 8.5 y 8.6, figura 8.7. La razón de esta diferencia es que, en el segundo caso, hay una carga neta en el trozo de papel, de signo opuesto a la carga en la pajita. Este no es el caso en la primera situación. Además, en la segunda situación también hay una fuerza repulsiva sobre el trozo de papel ejercida por la superficie conductora inferior. Esto se debe a que estos dos cuerpos tienen cargas del mismo signo.

En el experimento 2.1, no es fácil detectar la carga neta en el trozo de papel cuando se desplaza hacia la pajita frotada, después de haber sido retirado de la superficie del suelo o de una mesa. Sin embargo, esto puede demostrarse mediante observaciones atentas, como se indica en los experimentos 7.33 y 7.34. En la figura 8.7, ilustramos microscópicamente lo que ocurría en la figura 7.45.

A mucha gente le sorprende que en el experimento más antiguo sobre la electricidad, como el de la experiencia 2.1, la sustancia ligera y el suelo se comporten como conductores. Aún más sorprendente es el hecho de que, en general, la sustancia ligera tiene una carga neta cuando se desplaza hacia el plástico frotado. A pesar de estas sorpresas, esta es la situación más común en la que se observan atracciones electrostáticas. En otras palabras, normalmente, cuando una sustancia sólida o líquida es atraída significativamente por un cuerpo electrizado, esa sustancia es un conductor. Si la sustancia fuera un aislante, la fuerza neta ejercida sobre ella sería generalmente débil, lo que dificultaría la observación de su movimiento. Además, como esta sustancia conductora que es atraída estaba antes sostenida por otra sustancia conductora (como el suelo, el cuerpo humano, una mesa

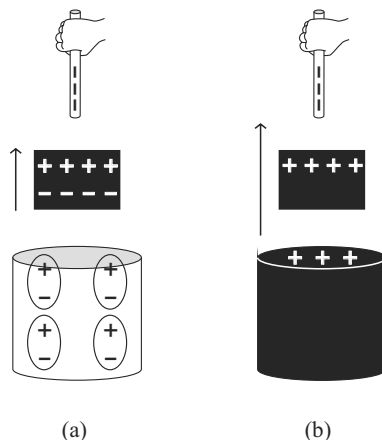


Figura 8.7: (a) Un trozo de papel polarizado, inicialmente colocado sobre una superficie aislante, es atraído por una pajita frotada. (b) Un trozo de papel electrizado, inicialmente colocado sobre una superficie conductora, es atraído por una pajita frotada. El tamaño de las flechas indica la fuerza ejercida, suponiendo que las distancias son idénticas en ambos casos.

de madera, una hoja de papel o una placa metálica), tendrá una carga neta cuando se desplace hacia el plástico frotado. Y la carga neta sobre la sustancia conductora ligera en esta situación tendrá un signo opuesto al del cuerpo electrizado que la atrae.

El generador electrostático de Kelvin, subsección 7.12.1, es análogo a los experimentos 7.32 a 7.34. La diferencia es que utiliza gotas de agua en lugar de pequeños trozos de papel.

Aquí no tenemos en cuenta las influencias de otros cuerpos cercanos en el experimento del efecto del ámbar. Además, no tenemos en cuenta lo que sucedería si hubiera una placa conductora o aislante entre la pajita frotada y las sustancias ligeras. Tampoco tenemos en cuenta la influencia de la forma del soporte en la fuerza neta ejercida sobre la sustancia ligera.

Estos fenómenos pueden no producirse, o solo con una intensidad muy débil, si la pajita frotada se humedece debido al sudor de nuestra mano o a la humedad del aire ambiente. Dado que el agua dulce se comporta como un conductor en estos experimentos, puede ayudar a descargar la pajita frotada. Esta conexión a tierra puede realizarse a través de nuestra mano o del aire ambiente.

Tras entrar en contacto con la pajita electrizada, debido al mecanismo ACR, la pequeña sustancia conductora puede recibir una carga del mismo signo que la pajita. Tras este contacto, la sustancia caerá al suelo, ya sea por su peso o por la repulsión eléctrica ejercida por la pajita. Este mecanismo no funciona tan bien cuando una sustancia aislante entra en contacto con la pajita frotada. Por lo tanto, después de ser atraída y entrar en contacto con la pajita frotada, la sustancia aislante cae al suelo después de un tiempo debido a su peso y a la pérdida de electrización que se produce

naturalmente en la pajita con el paso del tiempo. Esta pérdida de electrización se debe a la baja conductividad del aire seco.

Como podemos observar, en el experimento del efecto del ámbar se producen numerosos fenómenos y procesos, que son análogos a los del experimento 2.1. Por lo tanto, entendemos por qué se tardó tanto tiempo en comprender claramente lo que ocurría aquí. Además, solo describimos con más detalle los numerosos procesos microscópicos que tienen lugar, pero no explicamos el experimento. Después de todo, no explicamos por qué las cargas de signo opuesto se atraen, ni los mecanismos responsables de la electrización por fricción, ni las razones por las que algunos cuerpos se comportan como conductores mientras que otros se comportan como aislantes, ni el origen de las fuerzas no electrostáticas que mantienen las cargas fijadas a la superficie de los conductores y aislantes electrizados o polarizados; tampoco explicamos por qué la fuerza depende de la distancia, ni la serie triboeléctrica, ni las razones por las que un determinado cuerpo A se carga negativamente cuando se frota contra un determinado cuerpo B (en lugar de cargarse positivamente o permanecer eléctricamente neutro), etc.

En cualquier caso, hoy en día tenemos un conocimiento razonable de lo que ocurre en muchos fenómenos eléctricos. Además, podemos controlar muchos de los mecanismos que intervienen en estos procesos. Sin duda, esto supone un gran avance en nuestro dominio de la naturaleza y en nuestra comprensión de muchos fenómenos físicos.

La historia de la electricidad es relativamente corta en comparación con la de la astronomía, la geometría o la mecánica. Por eso todavía tenemos acceso a los escritos de algunos de los principales científicos responsables del descubrimiento de los fenómenos eléctricos más importantes. Es fascinante reproducir sus experimentos con materiales sencillos y económicos. También es muy interesante leer los informes de sus trabajos y ver cómo reaccionaron ante sus descubrimientos, qué les guió, etc.

Con este libro, esperamos ayudar a otras personas a seguir los fascinantes caminos de la naturaleza, tal y como los descubrieron algunos de los científicos más importantes en los inicios de la historia de la electricidad.

Apéndice A

Definiciones

A continuación, presentamos las definiciones de algunos términos utilizados en esta obra.

Ámbar: resina fósil dura, translúcida, de color amarillento o marrón.

Azabache: carbón compacto, negro aterciopelado, que se pule bien.

Copal: resina reciente o fósil procedente de diversos árboles tropicales.

Goma laca: sustancia resinosa secretada por ciertas especies de cochinillas y utilizada principalmente en forma de goma laca.

Nailon: uno de los muchos materiales poliamídicos sintéticos elásticos y resistentes que se transforman en fibras, filamentos, cerdas u hojas y se utilizan, entre otras cosas, en textiles y plásticos.

Poliamida: polímero que contiene grupos amida repetidos, un polímero amida. El nailon es un material poliamida sintético.

Poliéster: el poliéster es una categoría de polímeros que contienen el grupo funcional éster en su cadena principal.

Resina: cualquier sustancia orgánica natural sólida o semisólida, amorfa, fusible e inflamable, generalmente transparente o translúcida, de color amarillento a marrón, formada principalmente en las secreciones vegetales.

Tripas de gato: cuerda resistente, generalmente fabricada con intestinos de oveja.

Vidrio flint: vidrio pesado y brillante que contiene óxido de plomo.

Apéndice B

Stephen Gray y el descubrimiento de la conducción eléctrica

Uno de los aspectos más importantes de toda la ciencia de la electricidad es el hecho de que existen dos tipos de cuerpos con propiedades muy distintas: los «aislantes» y los «conductores». En el caso de los aislantes, las cargas generadas por la fricción permanecen en la zona frotada y no se desplazan a lo largo del material. Un aislante frotado no se descarga al entrar en contacto con el suelo. En los conductores, por el contrario, las cargas generadas por la fricción se propagan inmediatamente por toda la superficie del conductor. Si un conductor cargado entra en contacto con el suelo, se descarga inmediatamente, perdiendo su carga eléctrica en beneficio de la Tierra.

El descubrimiento de estos dos tipos de cuerpos y sus principales propiedades se produjo muy tarde en la historia de la electricidad. Stephen Gray (1666–1736) hizo este gran descubrimiento en 1729 y publicó una obra fundamental sobre el tema en 1731.¹ A continuación presentamos algunos aspectos de su vida y su obra.² Publicó algunos de los artículos más importantes de la historia de los inicios de la electricidad.³

Gray nació alrededor de 1666 en Canterbury, Inglaterra. No se conoce ningún retrato de Gray. Su padre y su hermano eran tintoreros de profesión. Teñían telas durante su fabricación. El propio Gray también trabajaba como tintorero, según estableció Heilbron.⁴ Nunca estudió en la universidad. Era un científico aficionado, que contribuyó principalmente a la astronomía y la electricidad. Probablemente nunca se casó. A los 53 años, comenzó a vivir como pensionista en Charterhouse, un hogar benéfico para capitanes de marina retirados y niños pobres. Las personas que vivían allí llevaban una vida sencilla, con pocas comodidades, pero sin temor al hambre. Vivió allí hasta su muerte, a los 70 años.

¹[Gra31a].

²[CM79], [Hei81c], [Hei99, pp. 242–249], [CC00] y [BC10].

³[Chi54], [Gra20], [Gra31a], [Gra31b], [Gra31c], [Gra31d], [Gra35a], [Gra35b], [Gra35c] y [Gra35d].

⁴[Hei81c].

Es posible que estudiara con su amigo, el astrónomo real John Flamsteed (1646–1719). En 1707, Roger Cotes (1682–1716) lo llevó a Cambridge. Gray fue elegido miembro de la Royal Society en 1732. Gracias a sus investigaciones sobre la electricidad, Gray fue el primer ganador de la medalla Copley de la Royal Society por sus logros científicos.

Su interés por la electricidad se despertó gracias a los artículos de Francis Hauksbee (nacido hacia 1666 y fallecido en 1713) publicados en las *Philosophical Transactions* entre 1704 y 1707. Hauksbee describía en ellos los experimentos realizados con un tubo de vidrio frotado que, además de atraer pequeñas sustancias, también emitía luz. En 1708, Gray envió una carta al secretario de la Royal Society, Hans Sloane (1660–1753), en la que describía varios experimentos sobre la electricidad. Esta carta no se publicó hasta 1954.⁵ En ella describía varios experimentos similares a los de Guericke, en los que un plumón es atraído por un vidrio frotado, lo toca y luego es repelida, como en el experimento 4.4. Aunque Gray no citó a Guericke en sus trabajos, es posible que conociera sus experimentos.⁶ En 1720, Gray publicó un artículo en el que describía nuevos experimentos sobre la electricidad.⁷ En esta obra, describía una especie de péndulo eléctrico y nuevas sustancias eléctricas. En otras palabras, descubrió nuevas sustancias que atraen los cuerpos ligeros cuando se frotan, o que son atraídas por la madera o el cuerpo humano cuando estas nuevas sustancias se frotan, como en el experimento 3.10.

B.1 El generador eléctrico de Gray

Sus principales descubrimientos se produjeron entre 1729 y 1736, cuando tenía entre 63 y 70 años. El artículo principal en el que describía su descubrimiento de los conductores y los aislantes se publicó en 1731.⁸ Hasta entonces, nadie había logrado que los metales atrajeran cuerpos ligeros, ni siquiera frotándolos, calentándolos o acariciándolos. Este fue uno de los descubrimientos más importantes de Gray: aprendió a transmitir la propiedad eléctrica de atraer cuerpos ligeros a una gran variedad de sustancias que nadie había logrado electrizar hasta entonces. Gray no electrizaba los metales por fricción. Pero demostró que los metales adquieren la propiedad de atraer cuerpos ligeros cuando se conectan a un tubo de vidrio frotado, o simplemente al acercar este tubo al metal.

Su artículo comienza con las siguientes palabras:^{9,10}

En el año 1729 comuniqué al Dr. *Desaguliers* y a otros caballeros un descubrimiento que había hecho recientemente, demostrando que la virtud eléctrica de un tubo de vidrio puede transmitirse a cualquier otro cuerpo, de modo que les

⁵[Chi54].

⁶[Chi54, p. 38, párrafo 6].

⁷[Gra20].

⁸[Gra31a].

⁹[Gra31a, pp. 18–19].

¹⁰In the year 1729 I communicated to Dr. *Desaguliers*, and some other Gentlemen, a Discovery I had then lately made, shewing that the Electrck Vertue of a Glass Tube may be conveyed to any other Bodies, so as to give them the same Property of attracting and repelling light Bodies, as the Tube does, when excited by rubbing; that this attractive Vertue might be carried to Bodies that were many Feet distant from the Tube.

confiere la misma propiedad de atraer y repeler cuerpos ligeros que el tubo, cuando se excita al frotarlo; que esta virtud atractiva puede transmitirse a cuerpos que se encuentran a muchos pies de distancia del tubo.

El tubo de vidrio hueco que utilizó era de vidrio flint, es decir, un vidrio pesado y brillante que contiene óxido de plomo. Frotó el tubo con las manos desnudas, tal y como mencionó en su artículo de 1707–1708.^{11,12}

El tubo de vidrio utilizado era aproximadamente del mismo tamaño que el utilizado por el Sr. Hauksbee, pero en lugar de frotarlo con papel como él indica, descubrí que me daba mejores resultados frotándolo solo con la mano desnuda.

También sostenía el tubo de vidrio frotado en su mano durante los experimentos. Como el tubo no se descargaba al entrar en contacto con las manos, esto significa que actuaba como un muy buen aislante, a diferencia de la mayoría de los vidrios modernos que se encuentran hoy en día en los hogares.

Es normal que nuestras manos suden debido al calor generado durante el proceso de fricción. El vidrio puede humedecerse durante este proceso, perdiendo así algunas de sus propiedades aislantes. El vidrio flint de Gray era un tubo cilíndrico hueco de aproximadamente 1 metro de largo. Es posible que su longitud contribuyera a mantener sus propiedades aislantes. Quizás lo frotaba solo por un extremo, sujetándolo por el otro. Esto habría permitido mantener una cantidad razonable de vidrio seco entre estas dos zonas, lo que habría proporcionado un grado de aislamiento razonable.

El tubo de vidrio de Gray no solo era un excelente aislante. Según veremos, logró transmitir una fuerza de atracción a cordones conductores muy largos. El vidrio tocaba el cordón o se mantenía cerca de un extremo, mientras que el otro extremo del cordón atraía una lámina de latón. Esto significa que pudo crear una fuerte polarización del cordón gracias a la gran cantidad de carga en su tubo de vidrio. Su tubo de vidrio pudo acumular una gran cantidad de cargas eléctricas durante el proceso de fricción.

Describió el tubo de la siguiente manera:^{13,14}

Antes de pasar a los experimentos, quizá sea necesario describir el tubo: su longitud es de tres pies y cinco pulgadas [1 m], y su diámetro [externo] es de casi una pulgada y dos décimas [3 cm]: doy las dimensiones medias, ya que el tubo es más grande en cada extremo que en el centro, y el diámetro interior es de aproximadamente una pulgada [2.5 cm]. En cada extremo coloqué un corcho para evitar que entrara polvo cuando el tubo no se utilizaba.

Esta última precaución pudo haber estado motivada por los experimentos realizados por Hauksbee, que demostraron que los contaminantes presentes en el interior del tubo podían reducir su electricidad.¹⁵

¹¹[Chi54, pp. 34, 37].

¹²The Glass tube made use of was about the size of that made use of by Mr Hauksbee but insted of rubbing it with Paper as he directs I found it to succeed better with me when Rubed with my bare hand only.

¹³[Gra31a, p. 20].

¹⁴Before I proceed to the Experiments, it may be necessary to give a Description of the Tube: Its Length is three Feet five Inches [1 m], and near one Inch two Tenths in [external] Diameter [3 cm]: I give the mean Dimensions, the Tube being larger at each End than in the Middle, the Bore about one Inch [2.5 cm]. To each End I fitted a Cork, to keep the Dust out when the Tube was not in use.

¹⁵[Hau08] y [Hei99, p. 245].

Este tubo de vidrio hueco que frotaba con las manos era su generador eléctrico estándar.

B.2 El descubrimiento de la electrización a través de la comunicación

Llegamos ahora al gran descubrimiento de Gray, realizado en febrero de 1729 (el subrayado en cursiva es nuestro):^{16,17}

El primer experimento que realicé fue para ver si podía encontrar alguna diferencia en su atracción cuando el tubo [frotado] estaba taponado en ambos extremos por los corchos, o cuando se dejaba abierto, pero no pude percibir ninguna diferencia apreciable; sin embargo, al sostener un plumón frente al extremo superior del tubo, descubrí que se dirigía hacia el corcho, siendo atraída y repelida por él, al igual que por el tubo cuando había sido excitado por el frotamiento. A continuación, mantuve el plumón frente al extremo plano del corcho, que lo atrajo y repelió muchas veces seguidas, *lo que me sorprendió mucho y me llevó a concluir que, sin duda, el tubo excitado había transmitido al corcho una virtud atractiva.*

En otras palabras, solo había frotado el tubo de vidrio, pero no el corcho. Sin embargo, observó que el plumón era atraído y repelido por el corcho que estaba en contacto con el tubo. Hizo una prueba y concluyó que efectivamente era así, ya que el corcho atraía no solo por su superficie lateral, que estaba en contacto con el tubo, sino también por su cara plana, que no había sido frotada y que no estaba en contacto directo con el vidrio.

Como Gray no proporcionó ningún dibujo en sus artículos, no es fácil saber exactamente qué tipo de experimento realizó aquí. Vemos tres posibilidades.

(a) Quizás sostuvo el plumón en su mano, que servía de aislante. Entonces habría observado cómo el plumón se curvaba y era atraído y repelido por el corcho, tocando alternativamente el corcho y su mano. Las fibras del plumón habrían actuado como conductor, cargándose gracias al mecanismo ACR y descargándose al tocar su mano, repitiéndose este proceso varias veces, figura B.1.

(b) El plumón estaba posiblemente atado a un hilo de seda, un aislante, y se movía como un péndulo oscilante. En otras palabras, se cargaba cuando entraba en contacto con el corcho y se descargaba cuando entraba en contacto con un conductor cercano, como su mano, un objeto de madera o una pared, figura B.2. El verbo que utilizó en su descripción fue «sostener» (“to hold”). Esto sugiere que sostenía el plumón con la mano. Dado que el plumón fue atraído y repelido varias veces, esto sugiere que se encontraba entre el corcho y un conductor (quizás la mano de Gray, una pared

¹⁶[Gra31a, p. 20].

¹⁷The first Experiment I made, was to see if I could find any Difference in its Attraction, when the [rubbed] Tube was stopped at both Ends by the Corks, or when left open, but could perceive no sensible Difference; but upon holding a Down-Feather over against the upper End of the Tube, I found that it would go to the Cork, being attracted and repelled by it, as by the Tube when it had been excited by rubbing. I then held the Feather over against the flat End of the Cork, which attracted and repelled many Times together; *at which I was much surprized, and concluded that there was certainly an attractive Vertue communicated to the Cork by the excited Tube.*

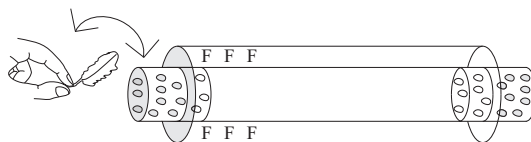


Figura B.1: Primera hipótesis sobre cómo Gray pudo haber hecho su observación crucial.

u otro objeto). Cuando el corcho se electrizaba o polarizaba con el tubo de vidrio frotado, atraía el plumón. Después de tocar el corcho, el plumón adquiría cierta carga y era repelido por el corcho debido al mecanismo ACR. El plumón podía entonces descargarse en otro conductor cercano. Tras esta descarga, volvía a ser atraído por el corcho electrizado o polarizado, y este proceso podía repetirse varias veces. Es decir, algo análogo a lo que vimos en el experimento 4.15. Como vimos en la sección 4.6, en 1720, el propio Gray había utilizado un péndulo eléctrico con un plumón atado a un hilo de seda.¹⁸

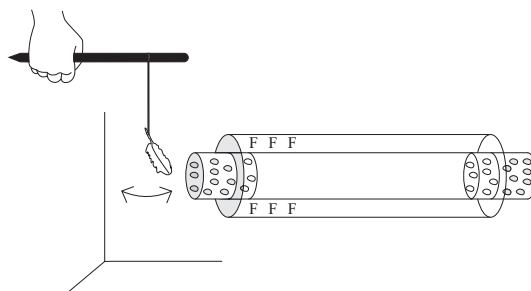


Figura B.2: Segunda forma posible en la que Gray podría haber realizado su crucial observación. En este caso, el plumón estaría sujeto a un hilo de seda, un aislante.

(c) La tercera posibilidad es que el experimento actual fuera similar al realizado por Gray en 1708 y que describimos en la sección 4.2. En otras palabras, el plumón podría haber sido lanzado al aire por encima del corcho. Entonces habría sido atraído por el corcho en el extremo del vaso frotado, habría sido electrizado por el mecanismo ACR y luego repelido por el corcho. Si el plumón se hubiera acercado a otro conductor cercano (como la mano de Gray, una pared u otro conductor), habría sido atraído por ese conductor. Se habría descargado al entrar en contacto con ese conductor y luego habría sido atraído de nuevo por el corcho electrizado o polarizado. Este proceso podría haberse repetido varias veces, figura B.3.

Esta tercera posibilidad nos parece la más probable. El verbo «sostener» ya había sido utilizado por Gray en su segundo experimento de 1708 descrito en la sección 4.1, p. 58. En este caso, después de soltar el plumón de los dedos y atraerlo hacia el tubo de vidrio frotado, si se mantenía a poca distancia de un objeto, oscilaría entre este objeto y el vidrio. Creemos que este experimento de 1729 era similar al descrito en la

¹⁸[Gra20].

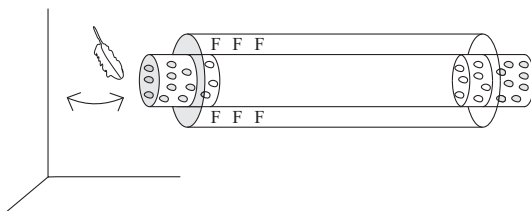


Figura B.3: Tercera forma posible en la que Gray podría haber realizado su crucial observación. El plumón oscilaría en el aire entre el corcho y otro cuerpo cercano.

figura 4.11. La diferencia es que ahora el plumón oscilaba entre el corcho y un cuerpo cercano, estando el corcho conectado al tubo de vidrio frotado, aunque el corcho en sí no se hubiera frotado.

Tampoco se sabe si el tubo de vidrio frotado estaba en posición vertical u horizontal. Incluso en el caso de un tubo horizontal, se puede hablar de su «extremo superior» para referirse a la parte cercana al extremo frotado que estaba más alejada de la superficie de la Tierra, mientras que el extremo inferior sería la parte cercana al extremo frotado que estaba más cerca de la superficie de la Tierra. También es posible que en una parte del experimento el tubo estuviera en posición vertical, mientras que en otra parte estuviera en posición horizontal.

Aunque se trataba de un descubrimiento fortuito (en palabras del propio Gray) «que me sorprendió mucho» (“at which I was much surprized”), Gray esperaba en realidad que la electricidad pudiera transmitirse a otros cuerpos. Ya había realizado experimentos en los que observó que la luz emitida por cuerpos frotados se dirigía hacia otros cuerpos que no habían sido frotados, tan pronto como estos se acercaban a los cuerpos frotados. Justo antes de describir el experimento anterior con el plumón y el corcho, Gray escribió lo siguiente en su artículo de 1731:^{19,20}

Entonces decidí procurarme un tubo grande de vidrio flint, para ver si podía hacer algún descubrimiento más con él, recordando una sospecha que había tenido hacía algunos años, de que, dado que el tubo transmitía luz a los cuerpos cuando se frotaba en la oscuridad, ¿no sería posible que al mismo tiempo les transmitiera electricidad? aunque hasta ahora nunca había probado el experimento, ya que no imaginaba que el tubo pudiera tener una influencia tan grande y maravillosa como para hacer que se atrajeran con tanta fuerza, o que la atracción se extendiera a distancias tan prodigiosas, como se verá en la continuación de este discurso.

La importancia de este descubrimiento reside en el hecho de que el corcho se comporta como un conductor, tal y como vimos en las subsecciones 6.3.1 y 6.3.2. Por eso

¹⁹[Gra31a, pp. 19–20].

²⁰I then resolved to procure me a large Flint-Glass Tube, to see if I could make any farther Discovery with it, having called to Mind a Suspicion which some Years ago I had, that as the Tube communicated a Light to Bodies, when it was rubbed in the Dark, whether it might not at the same Time communicate an Electricity to them, though I never till now tried the Experiment, not imagining the Tube could have so great and wonderful an Influence, as to cause them to attract with so much Force, or that the Attraction would be carried to such prodigious Distances, as will be found in the Sequel of this Discourse.

no es posible cargarlo por fricción sosteniéndolo en la mano. De hecho, cualquier carga que pudiera adquirir por fricción sería descargada inmediatamente por nuestro cuerpo. Por eso, hasta entonces, nadie había conseguido que el corcho, los metales, etc. atrajeran cuerpos ligeros después de haber sido frotados, como ocurría fácilmente con el ámbar o el vidrio flint. Fue el detalle del plumón atraído por el corcho lo que llamó la atención de Gray. Esta observación le indicó que, de alguna manera, podía transmitir la virtud eléctrica al corcho, que estaba clasificado como un material no eléctrico. Este fue el primer descubrimiento fundamental de Gray en este artículo: comunicar la electricidad a otro cuerpo (como el corcho) no frotado.

La interpretación moderna o la descripción microscópica de la «virtud atractiva» que Gray logró transmitir al corcho es que se polarizó, como en el experimento 7.9. Esto se ilustra en la figura B.4.

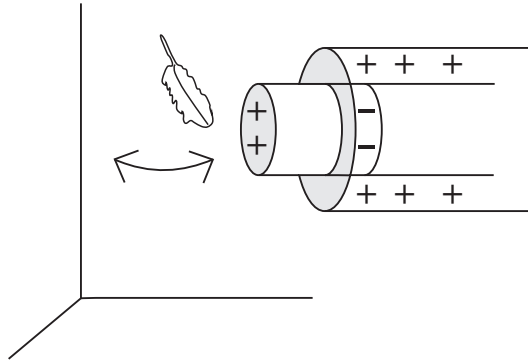


Figura B.4: Polarización del corcho conductor debido al vidrio frotado. El plumón conductor fue atraído por las cargas distribuidas en la superficie externa del corcho.

En otras palabras, el tubo de vidrio aislante se cargó por fricción. El corcho conductor fijado al vidrio frotado se polarizó. Su superficie interna adquirió una carga de signo opuesto al del tubo frotado. Su superficie externa adquirió una carga del mismo signo que la del tubo frotado. El plumón conductor cercano fue atraído por estas cargas repartidas por la superficie externa del corcho.

B.3 La exploración del descubrimiento y la revelación de la electricidad oculta de los metales

Tras este descubrimiento fortuito, Gray continuó con sus experimentos.²¹ Comenzó a determinar sistemáticamente a qué cuerpos podía comunicar la «electricidad» o la «virtud atractiva». También quería saber hasta dónde podía transmitir estas propiedades. Fijó una bola de marfil de 3.3 cm de diámetro, con un agujero en el centro, a un palito de madera de 10 cm de largo. El otro extremo de este palito estaba fijado al

²¹[Gra31a].

corcho conectado al tubo de vidrio. Cuando frotó el tubo, observó que la bola atraía y repelía el plumón con más fuerza que el corcho, figura B.5. Aumentó la longitud del palito a 20 cm, luego a 60 cm, y la atracción se mantuvo. Sustituyó el palito de madera por alambres de hierro y latón, observando los mismos efectos.

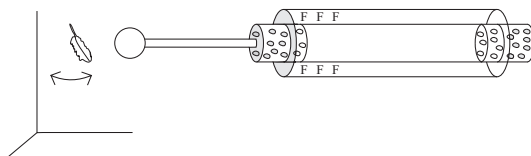


Figura B.5: El comienzo de los experimentos sistemáticos de Gray.

Aumentó la longitud de los alambres hasta 90 cm, pero entonces se encontró con numerosas vibraciones. Estas eran causadas por el roce del tubo, lo que dificultaba la observación de las atracciones. Entonces colgó la bola de un cordón de empaque suspendida de un lazo en el tubo. El cordón de empaque era un cordón resistente que se utilizaba de empaque paquetes.²² Cuando frotaba el tubo, la bola atraía y repelía una hoja de latón colocada debajo. Lo mismo ocurría con una bola de corcho y una bola de hierro de 570 g conectadas al cordón, figura B.6 (a). La figura B.6 (b) es una representación cualitativa de las cargas en el tubo aislante, así como de la polarización del cordón y de la bola conectada a él. El cordón y la bola son conductores.

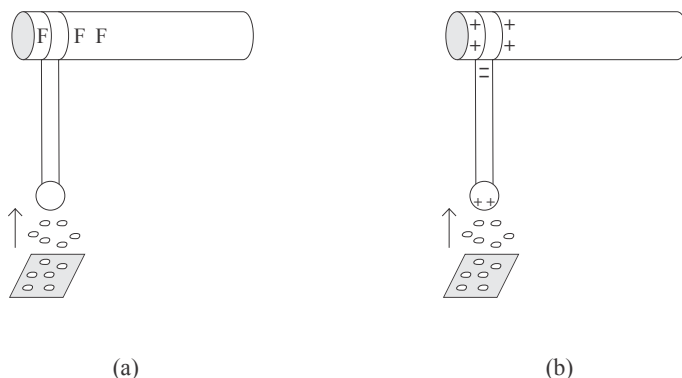


Figura B.6: (a) Cuando Gray frotó el tubo de vidrio, observó la atracción de la hoja de latón ligera por los cuerpos fijados al extremo inferior de un cordón conectada al tubo. El cuerpo atractivo podía incluso ser metálico. (b) Representación cualitativa de las cargas sobre el vidrio, así como la polarización del cordón y de la bola conectada.

Siguiendo estos procedimientos, pudo transmitir la electricidad del tubo frotado a varios objetos conectados a él mediante hilos o cordones, como monedas, una pala de fuego, una tetera de cobre vacía o llena de agua, una jarra de plata de una pinta, etc.

²²[Hei99, p. 246, Nota].

Según sus propias palabras,^{23,24} todos estos objetos

estaban fuertemente electrizados, atrayendo la hoja de latón a varias pulgadas [varios centímetros] de altura.

Por fin alguien había conseguido que los metales atrajeran objetos ligeros. ¡Nadie había sido capaz de conseguir este efecto en 2 000 años desde el descubrimiento de la electricidad! Como dijo Heilbron,^{25,26}

[...] y Gray finalmente logró despertar su electricidad oculta.

B.4 Gray descubre los conductores y los aislantes

Continuó sus investigaciones y, gracias a esta técnica, electrizó (o más bien polarizó) pedernal, magnetita, varias sustancias vegetales, etc. La hoja de latón podía atraerse hasta una altura de 10 cm. Tras estos experimentos, volvió a trabajar con palitos horizontales fijados al tubo de vidrio. Colocó cañas de pescar de 80 cm de largo en el tubo. Estas cañas también transmitían la electricidad, tanto si eran huecas como si eran macizas. Con la ayuda de palitos y cañas de pescar, provistos de una bola de corcho en su extremo, pudo observar el efecto incluso a una distancia de 5.5 m. En mayo de 1729, continuó sus experimentos y tuvo éxito con un poste de madera de 7.3 m de largo conectado al tubo de vidrio. Incluso a esa gran distancia, una bola de corcho fijada al extremo del poste atraía una hoja de latón cuando se frotaba el tubo. Prolongó este experimento hasta los 9.7 m, incluido el tubo. Pero, una vez más, las vibraciones provocadas por el roce del tubo perturbaron el experimento. Por lo tanto, decidió utilizar una bola de corcho o marfil conectada al extremo inferior de un cordón de empaque atado al tubo. Cuando Gray frotaba el tubo, podía hacer que la bola atrajera la hoja de latón incluso con un cordón de 8 m de largo, con Gray de pie en el balcón. A continuación, combinó una larga caña horizontal de madera atada al tubo con un hilo vertical conectado al otro extremo de la caña, con una bola de marfil en el extremo inferior del hilo, como una enorme caña de pescar. Al principio, trabajó con una caña de madera de 5.5 m de largo y un hilo de 10.3 m de largo. Al frotar el tubo de vidrio, observaba cómo la bola de marfil atraía una hoja de latón situada debajo.

A continuación, intentó aumentar la longitud horizontal utilizando únicamente cordón. Para ello, hizo un lazo en cada extremo de un cordón vertical, cuyo extremo superior colgaba de un clavo clavado en una viga. El segundo cordón pasaba por el lazo inferior del cordón vertical y se ataba al tubo de vidrio. El otro extremo de este segundo cordón se ataba a una bola de marfil. Si seguimos este segundo cordón desde la bola de marfil hasta el tubo de vidrio, veremos que es vertical entre la bola y el extremo inferior del primero cordón, y horizontal entre este lazo y el tubo. Debajo de la bola de marfil, colocaba una hoja de latón. En este caso, al frotar el tubo de vidrio, Gray no podía observar la más mínima atracción de la hoja de latón por la bola de marfil, figura B.7 (a).

²³ [Gra31a, p. 22].

²⁴ were strongly Electrical, attracting the Leaf-Brass to the Hight of several Inches.

²⁵ [Hei99, p. 246].

²⁶ [...] and so Gray succeeded at last in awakening their hidden electricity.

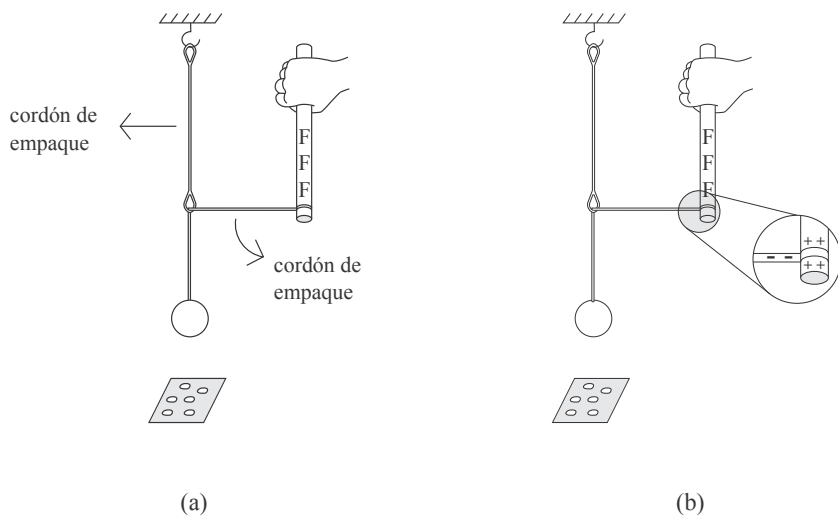


Figura B.7: (a) Cuando se frota el tubo de vidrio, la bola de marfil no atrae la hoja de latón. En esta situación, el cordón de empaque conectado al tubo y a la bola también está conectado a otro cordón fijado al techo. (b) Representación cualitativa de las cargas en el caso (a).

A continuación, señaló:^{27,28}

A partir de esto, llegué a la conclusión de que cuando la virtud eléctrica llegaba [desde el tubo de vidrio frotado] al lazo que estaba suspendido en la viga, subía por esta hasta la viga, de modo que nada, o al menos muy poco, llegaba a la bola, lo que se verificó posteriormente, como se verá en los experimentos que se mencionarán más adelante.

Ahora presentamos la interpretación moderna de este experimento. El tubo de vidrio frotado polariza inicialmente el cordón conductor que se va a enrollar. Pero en este caso, el cordón conectado al tubo también está conectado a la Tierra por otro cordón conductor. Esto último cordón conecta a la Tierra el cordón conectado al vidrio, de forma análoga a lo observado en la figura 7.30. En otras palabras, el extremo del cordón en contacto con el vidrio adquiere una carga de signo opuesto al del vidrio. Las otras cargas que se encontraban en el extremo de la bola en la figura B.6 (b) ahora se distribuyen por la superficie de la Tierra debido a la conexión a tierra. La figura B.7 (b) presenta una descripción cualitativa de este experimento en términos de cargas distribuidas sobre el vidrio y el cordón. En este caso, no hay carga neta en la bola y esta ni siquiera está polarizada. Por estas razones, la bola no atrae las hojas metálicas situadas debajo.

²⁷[Gra31a, p. 25].

²⁸Upon this I concluded, that when the Electrick Vertue came [from the rubbed glass tube] to the Loop that was suspended on the Beam, it went up the same to the Beam; so that none, or very little of it at least, came down to the Ball, which was afterwards verified, as will appear by the Experiments that will be mentioned hereafter.

En julio de 1729, Gray decidió mostrar estos experimentos a su amigo Granville Wheler (1701–1770). Gray disponía de un tubo de vidrio sólido de 28 cm de largo y 2 cm de diámetro. Ataron el cordón de empaque al tubo, con una bola en el extremo inferior del cordón. Debajo de la bola colocaron la hoja de latón. Desde una ventana, podían hacer que la bola atrajera la hoja de latón frotando el tubo de vidrio con cordones de entre 4.9 y 10.4 m de largo.

Gray continuó con la descripción de los experimentos y luego presentó su mayor descubrimiento:^{29,30}

Como aquí no teníamos alturas mayores, el Sr. *Wheler* deseaba probar si podíamos transportar la virtud eléctrica horizontalmente. Entonces le conté el intento que había hecho con ese diseño, pero sin éxito, y le expliqué el método y los materiales utilizados, tal y como se mencionó anteriormente. A continuación, propuso una línea de seda para sostener la línea [de comunicación], por la que pasaría la virtud eléctrica. Le dije que podría funcionar mejor debido a su pequeño tamaño [es decir, Gray creía que esto podría funcionar mejor que en su experimento original debido al pequeño grosor del hilo de seda en comparación con el mayor grosor del cordón de empaque]; de modo que habría menos vertue [eléctrica] transportada desde la línea de comunicación, con lo cual, junto con el método adecuado que ideó el Sr. *Wheler*, y con el gran esfuerzo que él mismo realizó, y la ayuda de sus sirvientes, tuvimos un éxito mucho mayor de lo que esperábamos.

El primer experimento se realizó en la galería alfombrada el 2 de *julio* de 1729, alrededor de las diez de la mañana. A unos cuatro pies [1.2 m] del extremo de la galería había una línea transversal que estaba fijada por sus extremos a cada lado de la galería con dos clavos; la parte central de la línea era de seda, y el resto, en cada extremo, de cordón de empaque; a continuación, la línea de la que colgaba la bola de marfil, y por la que se transmitiría la virtud eléctrica desde el tubo, de ochenta pies y medio [24.5 m] de longitud, se colocó sobre la línea transversal de seda, de modo que la bola colgaba unos nueve pies [2.7 m] por debajo de ella: A continuación, el otro extremo de la línea [de comunicación] se suspendió mediante un lazo en la caña de vidrio, y la hoja de latón se colocó debajo de la bola sobre un trozo de papel blanco; cuando se frotó el tubo, la bola atrajo la hoja de latón y la mantuvo suspendida sobre ella durante algún tiempo.

²⁹ [Gra31a, pp. 26–27].

³⁰ As we had no greater Hights here, Mr. *Wheler* was desirous to try whether we could not carry the Electrick Vertue horizontally. I then told him of the Attempt I had made with that Design, but without success, telling him the Method and Materials made use of, as mentioned above. He then proposed a Silk Line to support the Line [of communication], by which the Electrick Vertue was to pass. I told him it might do better upon the Account of its Smallness [that is, Gray believed this could work better than in his original experiment due to the small thickness of the silk thread in comparison with the greater thickness of the packthread]; so that there would be less [electric] Vertue carried from the Line of Communication, with which, together with the apt Method Mr. *Wheler* contrived, and with the great Pains he took himself, and the Assistance of his Servants, we succeeded far beyond our Expectation.

The first Experiment was made in the matted Gallery *July* 2, 1729, about Ten in the Morning. About four Feet [1.2 m] from the End of the Gallery there was a cross Line that was fixed by its Ends to each Side of the Gallery by two Nails; the middle Part of the Line was silk, the rest at each End Packthread; then the Line to which the Ivory Ball was hung, and by which the Electrick Vertue was to be conveyed to it from the Tube, being eighty Feet and a half [24.5 m] in Length, was laid on the cross Silk Line, so as that the Ball hung about nine Feet [2.7 m] below it: Then the other End of the Line [of communication] was by a Loop suspended on the Glass Cane, and the Leaf-Brass held under the Ball on a Piece of white Paper; when the Tube being rubbed, the Ball attracted the Leaf-Brass, and kept it suspended on it for some Time.

En la figura B.8 (a) se muestra una representación de este experimento. Un hilo está conectado a un tubo de vidrio y a una bola de marfil en el otro extremo. Debajo de la bola hay hojas de latón. Este hilo tiene una parte horizontal y otra vertical. En la unión de estas dos partes, se sostiene sobre un hilo de seda tensado. Cuando Gray frotó el vidrio, observó que la bola atraía la hoja de latón situada debajo. Esta atracción no se produjo en la situación ilustrada en la figura B.7. En esta última situación, el cordón de empaque conectado al vidrio estaba suspendido de otra cordón de empaque fijado al techo.

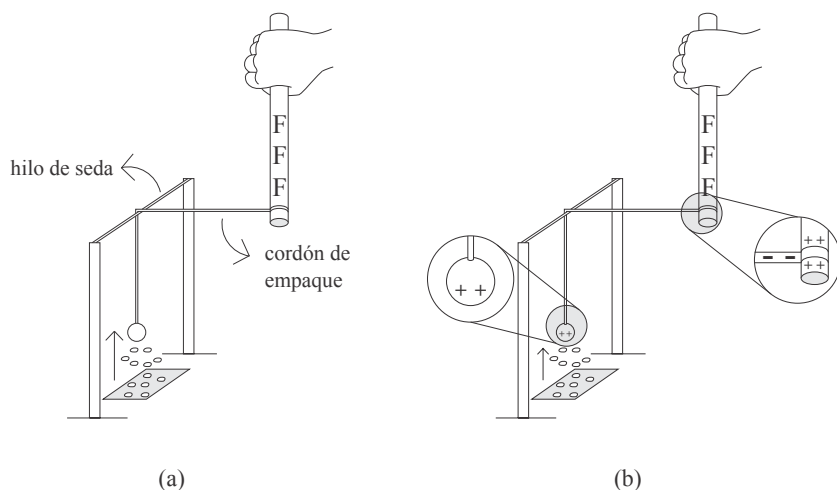


Figura B.8: (a) Gray observó una atracción en la hoja de latón cuando frotó el tubo de vidrio. En esta situación, el cordón de empaque atado al tubo de vidrio frotado estaba sostenido por un hilo de seda. (b) Representación cualitativa de las cargas en el caso (a).

La figura B.8 (b) presenta una representación cualitativa de las cargas en este experimento. En este caso, el cordón de empaque está sostenido por un aislante, es decir, el hilo de seda. Aquí no hay conexión a tierra. La situación es similar a la de la figura B.6 (b).

Aquí tenemos el descubrimiento fundamental de los conductores y los aislantes. Los conductores son el corcho, la bola de marfil, la madera, el cordón de empaque, los alambres metálicos, etc. El aislante es el hilo de seda. Gray podía comunicar la virtud eléctrica a los conductores mediante el contacto con un tubo de vidrio frotado. El hilo de seda, por el contrario, no permitía el paso y la disipación de la virtud eléctrica hacia la tierra. En este artículo, Gray describe otro aislante, a saber, los hilos de pescar de crin de caballo.³¹ En otros artículos del mismo año, Gray menciona otros aislantes, concretamente un bloque de resina y vidrio calentado.³² Solía fabricar bloques de resina para sostener los cuerpos a los que quería transmitir la electricidad. En un artículo de 1735, también describía bloques de cera de abeja, azufre y goma

³¹[Gra31a, p. 36].

³²[Gra31b, p. 228] y [Gra31d, pp. 399 y 406].

laca.³³ Utilizaba todos estos materiales como aislantes o, en sus propias palabras, como «cuerpos eléctricos».

Antes de continuar con estas citas, es importante recordar el problema de las nomenclaturas antiguas y nuevas abordado en la sección 8.1. De hecho, las sustancias que Gilbert clasificaba como «eléctricas» se denominan hoy en día «aislantes». Las sustancias que se clasificaban como «no eléctricas» ahora se denominan «conductoras».

Una representación de este experimento aparece en la figura B.9.³⁴



Figura B.9: Gray frota con las manos desnudas su tubo de vidrio flint de un metro de largo. Un cordón de empaque conectado al tubo está sostenido por un hilo de seda. Una bola de marfil conectada al otro extremo del cordón atrae la hoja de latón situada debajo.

Esta ilustración muestra a Gray y su amigo Wheler. Gray sostiene y frota su tubo de vidrio de un metro de largo. En el otro extremo del tubo hay atada un cordón de empaque, de lo que cuelga una bola de marfil. La bola está cerca del suelo, con pequeños trozos de metal debajo. El cordón atada al tubo de vidrio está sostenido por otras líneas cruzadas. Cuando estas líneas cruzadas son conductoras, la bola no atrae los trozos de metal. Por el contrario, cuando estas líneas cruzadas están hechas de un material aislante como la seda, la bola atrae los trozos de metal que se encuentran debajo cuando Gray frota el tubo de vidrio.

En la figura B.10 se reproduce una antigua representación de este crucial experimento realizado por Gray.³⁵

³³[Gra35a, pp. 18 y 20].

³⁴[Fig67, volumen. 1, figura 227, p. 441], [Fig85, p. 321], [Bor d] y [FM91, p. 88].

³⁵[Nol53].

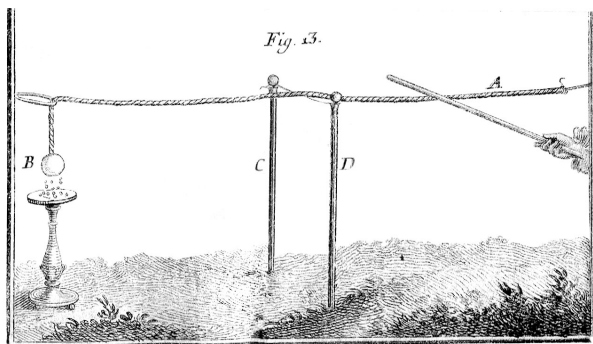


Figura B.10: Una bola de marfil atrae una hoja de latón cuando un tubo de vidrio frotado toca un cordón de empaque horizontal, o cuando el tubo se acerca a él, siempre que el cordón esté sostenido por hilos de seda.

Una interesante representación del experimento de Gray aparece en la obra de Doppelmayer, figura B.11.³⁶

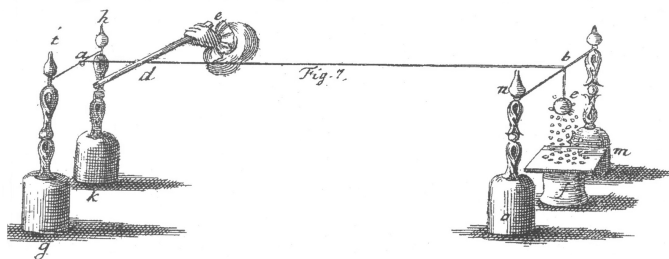


Figura B.11: Un tubo de vidrio frotado toca un cordón horizontal y la bola atrae los cuerpos ligeros. El cordón está sostenido por cordones aislantes.

Se trata del segundo descubrimiento fundamental descrito por Gray en este artículo, a saber, la existencia de conductores y aislantes.

B.5 El descubrimiento de que lo que hace que un cuerpo se comporte como conductor o aislante depende de sus propiedades intrínsecas

Tras estas experiencias, Gray y Wheler lograron transmitir la virtud eléctrica a una distancia de 45 m en horizontal realizando giros en la línea de transporte, es decir, el cordón de empaque. A continuación, alcanzaron los 34 m a lo largo de una línea horizontal recta, así como los 4 m en vertical. Otro día, alcanzaron los 89 m con un

³⁶[Dop74].

cordón horizontal que realizaba algunas curvas, siempre sostenido por hilos de seda. Cuando intentaron aumentar aún más esta longitud total, la línea de seda se rompió. No pudo soportar el peso del cordón de empaque y las vibraciones provocadas por la fricción del tubo de vidrio.

Luego vino el tercer descubrimiento fundamental de Gray, descrito en este artículo (nuestra cursiva):^{37,38}

Tras esto, habiendo traído conmigo alambre de latón y de hierro, en lugar de seda colocamos un pequeño alambre de hierro; pero este era demasiado débil para soportar el peso de la línea [de comunicación]. Entonces tomamos alambre de latón de un tamaño [grosor] algo mayor que el del hierro. Este soportó nuestra línea de comunicación; pero, aunque el tubo [de vidrio] estaba bien frotado, no se produjo el más mínimo movimiento o atracción [de la hoja de latón] por parte de la bola, ni siquiera con el tubo grande [de vidrio de 1 m de largo], que utilizamos cuando comprobamos que el pequeño bastón sólido [de vidrio de 28 cm de largo] era ineficaz: *Por lo que ahora estábamos convencidos de que el éxito que habíamos tenido antes dependía de que las líneas que sostenían la línea de comunicación fueran de seda, y no de que fueran pequeñas [delgadas], como antes de la prueba yo imaginaba que podría ser;* aquí ocurrió el mismo efecto que cuando la línea que debe transmitir la virtud eléctrica está sostenida por cordón de empaque; *es decir,* que cuando los efluvios [eléctricos] llegan al alambre o al cordón que sostiene la línea [de comunicación], pasan a través de ellos hacia la madera, a la que están fijados ambos extremos, y así no avanzan más en la línea que debe transportarlos hasta la bola de marfil.

Gray ya había descubierto cómo transmitir la electricidad a la madera, los metales y otras sustancias. También había descubierto que un hilo de seda impedía la pérdida de electricidad a través de él. Sin embargo, inicialmente creía que esta propiedad aislante se debía al escaso grosor del hilo de seda, en comparación con el mayor grosor de un cordón de empaque. Con el experimento actual, sin embargo, descubrió que dos hilos finos cruzados de casi el mismo grosor, uno de metal y otro de seda, mostraban un comportamiento completamente diferente. Mientras que el alambre metálico (o el cordón de empaque) permitía el paso de la virtud eléctrica hacia el suelo, el hilo de seda no permitía el paso de la electricidad a través de él. Esto significaba que, en sus experimentos, era esencialmente el tipo de material lo que definía o caracterizaba su propiedad. Contrariamente a lo que había pensado inicialmente, el tamaño o el grosor de los materiales no era tan importante en sus experimentos para determinar

³⁷[Gra31a, pp. 28–29].

³⁸Upon this, having brought with me both Brass and Iron Wire, instead of the Silk we put up small Iron Wire; but this was too weak to bear the Weight of the [communication] Line. We then took Brass Wire of a somewhat larger Size [thickness] than that of Iron. This supported our Line of Communication; but though the [glass] Tube was well rubbed, yet there was not the least Motion or Attraction [of the brass leaf] given by the Ball, neither with the great Tube [of glass 1 m long], which we made use of when we found the small solid Cane [of glass 28 cm long] to be ineffectual: *By which we were now convinced, that the Success we had before, depended upon the Lines that supported the Line of Communication, being Silk, and not upon their being small [thin], as before Trial I imagined it might be;* the same Effect happened here as it did when the Line that is to convey the Electrick Vertue is supported by Packthread; viz. that when the [electric] Effluvia come to the Wire or Packthread that supports the [communication] Line, it passes by them to the Timber, to which each End of them is fixed, and so goes no farther forward in the Line that is to carry it to the Ivory Ball.

si se comportarían como conductores o aislantes. Este fue su tercer descubrimiento fundamental.

B.6 El descubrimiento de que la electrización por comunicación se produce a distancia

Continuaron con sus experimentos, transmitiendo electricidad hasta 203 m, con el cordón de empaque realizando ocho idas y vueltas sostenido por hilos de seda. Una representación de este experimento aparece en las figuras B.12 y B.13.³⁹

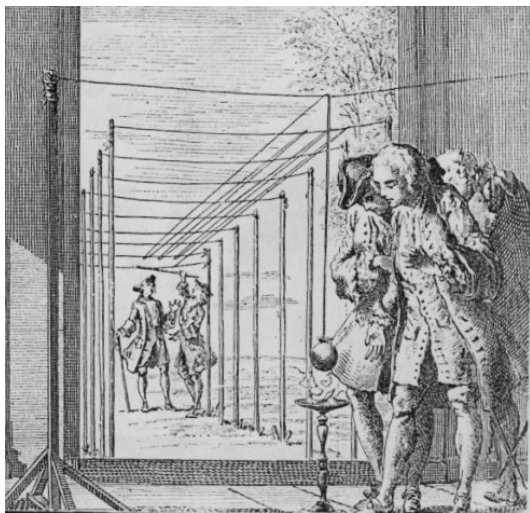


Figura B.12: Una representación del experimento de Gray.

En línea recta, prolongaron el experimento hasta 198 m y luego hasta 233 m. En los siguientes experimentos, variaron los cuerpos suspendidos en el extremo libre del hilo. En lugar de una bola de marfil, utilizaron un gran mapa del mundo de 8 m², un paraguas y una piedra magnética a la que se había colgado una llave metálica por uno de sus brazos. Todos estos materiales atrajeron la hoja de latón cuando frotaron el tubo de vidrio. Tras este experimento, colgaron tres cuerpos en diferentes puntos a lo largo de la línea de comunicación. Todos atrajeron simultáneamente la hoja de latón cuando se frotó el vidrio. También colgaron un pollito vivo por las patas y observaron que su pecho se volvía muy atractivo.

Al final del artículo, presentó otros experimentos que demostraban que podía transmitir la virtud eléctrica hasta una distancia de 270 m.

A continuación vino el cuarto descubrimiento importante descrito por Gray en este artículo. Demostró que podía transmitir la virtud eléctrica a lo largo de la línea

³⁹[GS89], [BW12], y [Dop74].

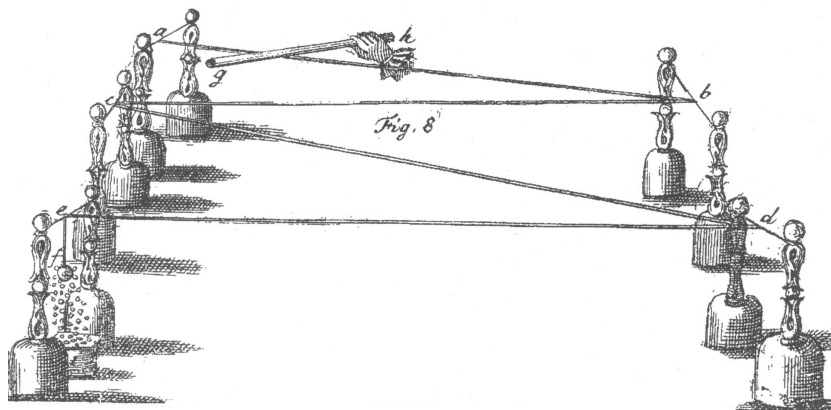


Figura B.13: Una bola que atrae los cuerpos ligeros cuando está sostenida por cordones aislantes. El vidrio frotado se acerca al otro extremo del cordón conductor.

de comunicación simplemente acercando un tubo de vidrio frotado por uno de sus extremos, sin contacto entre el tubo de vidrio y el cordón de empaque:^{40, 41}

En casa del Sr. Godfrey realicé los siguientes experimentos, que demuestran que la virtud eléctrica puede transmitirse desde el tubo sin tocar la línea de comunicación, con solo mantenerlo cerca de ella.

El primero de estos experimentos se realizó el 5 de agosto de 1729. [...]

Tomé un trozo de cordón hecho de cabello, como los que se utilizan para secar la ropa, de unos once pies [3.3 m] de longitud, que, mediante un lazo en su extremo superior, se suspendió de un clavo clavado en una de las vigas del desván, y que tenía en su extremo inferior un peso de plomo de catorce libras [6.4 kg] colgado de él mediante un anillo de hierro: a continuación, se colocó la hoja de latón debajo del peso y se frotó el tubo, y al mantenerlo cerca del cordón sin tocarla, el peso de plomo atrajo y repelió la hoja de latón varias veces seguidas, hasta una altura de al menos tres, si no cuatro pulgadas [10 cm]. Si el tubo se mantenía a tres o cuatro pies [1.2 m] por encima del peso, se producía una atracción; pero si se mantenía más alto, de modo que estuviera cerca de la viga donde se colgaba el peso por el hilo, no se producía ninguna atracción.

En la figura B.14 (a) se muestra una representación de este experimento.

⁴⁰ [Gra31a, pp. 33–34].

⁴¹ *At Mr. Godfrey's I made the following Experiments; showing that the Electrick Vertue may be carried from the Tube, without touching the Line of Communication, by only being held near it.*

The first of these Experiments was made the 5th of August, 1729. [...]

I took a Piece of a Hair-Line, such as Linnen-Cloaths are dried on, of about eleven Feet [3.3 m] in Length; which, by a Loop at the upper End of it, was suspended on a Nail, that was drove into one of the Rafters in the Garret, and had at its lower End a leaden Weight of fourteen Pounds [6.4 kg] hung to it by an Iron Ring; then the Leaf-Brass was laid under the Weight, and the Tube rubbed, and being held near the Line without touching it, the Lead-Weight attracted and repelled the Leaf-Brass for several times together, to the Hight of at least three, if not four Inches [10 cm]. If the Tube was held three or four Feet [1.2 m] above the Weight, there would be an Attraction; but if it were held higher up, so as to be near the Rafter where the Weight was hung by the Hair-Line, there would be no Attraction.

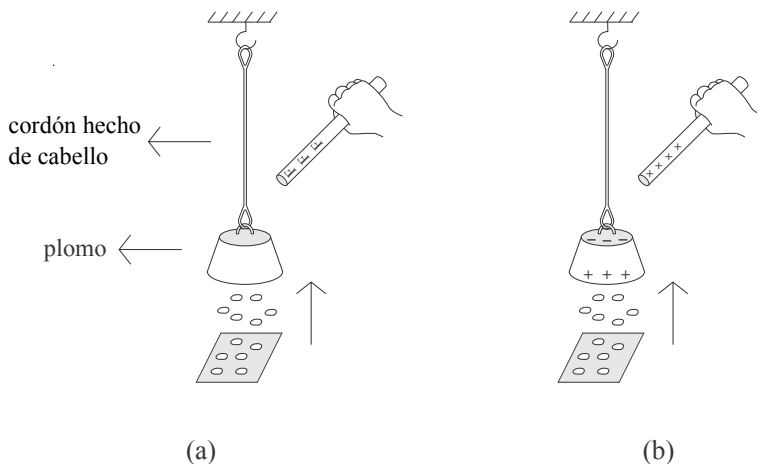


Figura B.14: (a) Gray logró que el peso metálico atrajera los cuerpos ligeros simplemente acercando el vidrio frotado al peso, sin tocarlo. (b) Representación cualitativa de las cargas en el caso (a).

Nuestra comprensión actual de este experimento es que el tubo de vidrio frotado polariza eléctricamente el peso de plomo. La parte del peso más cercana al vidrio se electriza con una carga de signo opuesto al del vidrio, mientras que la parte más alejada del plomo se electriza con una carga del mismo signo que la del vidrio. La hoja de latón es entonces atraída esencialmente por la parte inferior del plomo polarizado. En cierto sentido, esto es análogo al experimento 7.9.

Una representación cualitativa de las cargas en este experimento aparece en la figura B.14 (b).

Gray también utilizó cordones hechos de cabello para suspender cuerpos en otros experimentos. No se sabe exactamente de qué estaban hechos. En cualquier caso, funcionaban como aislantes. En otro famoso experimento descrito en este artículo de 1731, Gray suspendió a un niño de 21 kg en posición horizontal,⁴²

utilizando dos cordones hechos de cabello, como los que se utilizan para secar la ropa.

A continuación, acercó un tubo de vidrio frotado a los pies del niño, sin tocarlos, y observó que la cara del niño atraía una hoja de latón colocada debajo de él.

Du Fay repitió el experimento con el niño en 1733. Cuando utilizó cordones normales, no obtuvo ninguna atracción. Sin embargo, cuando sustituyó los cordones normales por cordones de seda, obtuvo las mismas atracciones que Gray. Los cordones normales suelen ser conductores. Esto demuestra que los cordones hechos de cabello de Gray son aislantes, ya que solo cuando utilizamos aislantes los experimentos con el niño tienen éxito.

⁴²by two hair-lines, such as cloaths are dried on.

En un artículo de 1735, Gray realizó experimentos similares. Comenzó mencionando que^{43,44}

Como no tenía a mi alcance ningún cordón de seda lo suficientemente resistente como para soportar el peso del niño, le hice ponerse de pie sobre algunos de los cuerpos eléctricos.

En otras palabras, el niño estaba de pie sobre aislantes, como se dice hoy en día. En la página siguiente de este artículo, Gray describe otro experimento que realizó en casa del Sr. Wheler:⁴⁵

Poco después de mi llegada a su casa, el Sr. *Wheler* se procuró hilos de seda lo suficientemente resistentes como para soportar el peso de su ayuda de cámara, un muchacho bastante fornido; luego, tras suspenderlo de esos hilos, [...].⁴⁶

En la continuación de este artículo, Gray describe otros experimentos en los que transmite la virtud eléctrica a los conductores simplemente acercando el tubo de vidrio frotado cerca de los conductores, sin tocarlos. Utilizando aros de madera de 66 cm y 91 cm de diámetro, suspendidos por cordones aislantes, observa que el efluio eléctrico puede transportarse a lo largo de la circunferencia de estos aros. También era capaz de pasar de un aro a otro en contacto con el primer aro, figura B.15.⁴⁷ También podía transmitir la virtud eléctrica a muchas frutas y verduras.

Gray incluso logró que una burbuja de jabón atrajera cuerpos ligeros.^{48,49}

El 23 de marzo [de 1730], disolví jabón en agua del *Támesis* y luego suspendí una pipa de tabaco con un cordón hecho de cabello, de modo que quedara colgando casi en horizontal, con la boca del cuenco hacia abajo; luego, tras sumergirla en el líquido jabonoso y soplar una burbuja, con la hoja de latón colocada en un soporte debajo de ella, al frotar el tubo [de vidrio], el latón fue atraído por la burbuja cuando el tubo se mantuvo cerca del hilo. A continuación, repetí el experimento con otra burbuja, sosteniendo el tubo cerca del extremo pequeño de la pipa, y la atracción fue ahora mucho mayor, ya que la hoja de latón fue atraída hasta una altura de casi dos pulgadas [5 cm].

⁴³ [Gra35a, p. 17].

⁴⁴ As I had not any silk Lines by me strong enough to bear the Boy, I caused him to stand on some of the Electric Bodies.

⁴⁵ Mr. *Wheler*, soon after my coming to him, procured silk Lines strong enough to bear the Weight of his Footboy, a good stout Lad; then having suspended him upon the Lines, [...].

⁴⁶ En la versión inglesa del libro aparece la siguiente frase: «Por todo ello, es muy probable que los *cordones hechos de cabello* de Gray fueran de seda». («From all this it is very probable that Gray's *hair lines* were made of silk.») Sin embargo, la palabra *hairline* significaba originalmente un cordón hecho de cabello, no de seda. [Nota del traductor.]

⁴⁷ [Dop74] y [Hei99, p. 249].

⁴⁸ [Gra31a, pp. 38–39].

⁴⁹ *March* the 23d [of 1730], I dissolved Soap in the *Thames*-Water, then I suspended a Tobacco-Pipe by a Hair-Line, so as that it hung nearly horizontal, with the Mouth of the Bowl downwards; then having dipped it in the Soap-Liquor, and blown a Bubble, the Leaf-Brass laid on a Stand under it, the [glass] Tube being rubbed, the Brass was attracted by the Bubble, when the Tube was held near the Hair-Line. Then I repeated the Experiment with another Bubble, holding the Tube near the little End of the Pipe, and the Attraction was now much greater, the Leaf-Brass being attracted to the Hight of near two Inches [5 cm].

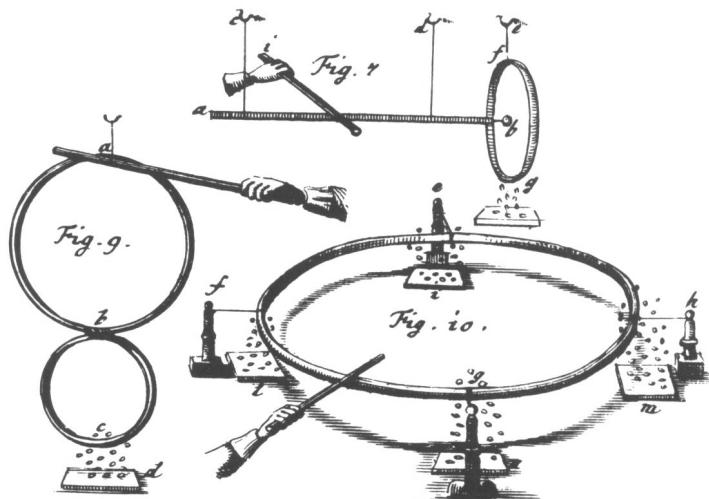


Figura B.15: Representación de los experimentos de Gray con aros de madera sostenidos por cordones aislantes.

Este experimento, representado en la figura B.16 (a), ilustra una vez más que el agua dulce se comporta como un conductor. Gray ya había transmitido la capacidad de atraer cuerpos ligeros a muchos conductores, como metales, madera, etc.

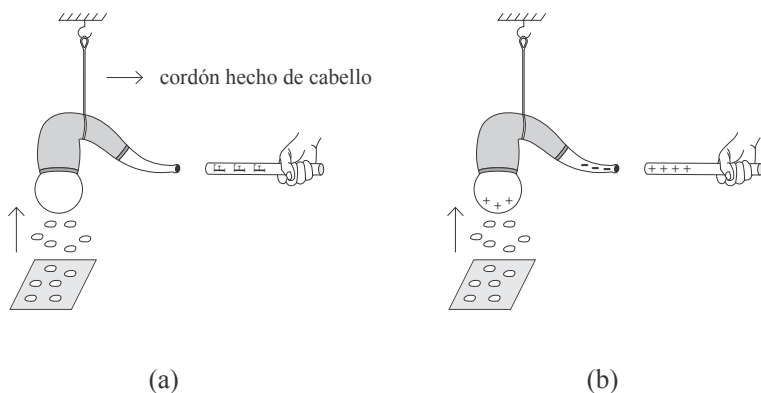


Figura B.16: (a) Una burbuja de jabón que atrae hojas de latón cuando se acerca el tubo de vidrio frotado al tubo suspendido por un hilo capilar, un aislante. (b) Representación cualitativa de las cargas en el caso (a).

La figura B.16 (b) ofrece una representación cualitativa de las cargas.

B.7 La experiencia con el niño suspendido

En esta obra publicada en 1731, Gray describe varios experimentos en los que suspendía a un niño en posición horizontal con hilos, probablemente de seda. Por ejemplo, con la cara del niño mirando hacia abajo, Gray sostuvo el tubo de vidrio frotado cerca de sus pies, sin tocarlos, y observó que unas hojas de latón eran atraídas hacia la cara del niño, elevándose hasta 30 cm. En la figura B.17 se puede ver una representación antigua de este experimento.⁵⁰

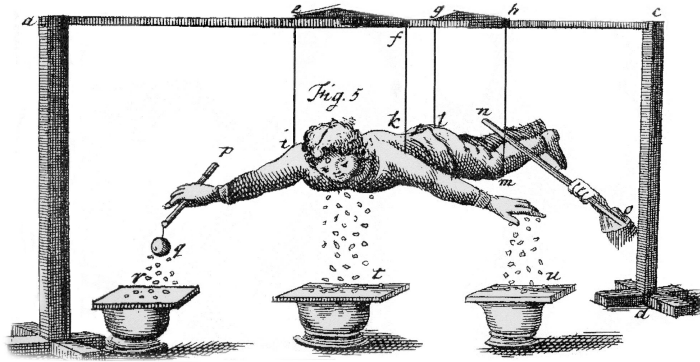


Figura B.17: Un niño está suspendido de unos cordones aislantes. Se acerca un tubo de vidrio frotado a sus piernas. Las manos y la cara del niño atraen los cuerpos ligeros.

Este experimento se hizo muy famoso. Nollet lo utilizó en el frontispicio de su obra *Essai sur l'Électricité des Corps* (figure B.18).⁵¹

Algunas de estas experiencias realizadas por Gray fueron repetidas y profundizadas por Du Fay. Por ejemplo, en su tercera memoria, presenta un experimento que se ilustra aquí en la figura B.19.⁵²

Du Fay describió este experimento de la siguiente manera (cursiva nuestra):^{53, 54}

⁵⁰[Dop74].

⁵¹[Nol53].

⁵²[DF33d, pp. 248–249] y [RR57, p. 584].

⁵³[DF33d, pp. 248–249].

⁵⁴J'ai pris deux morceaux d'un cordon de fil [conducteur], gros comme le doigt, dont le premier SA, avoit 6 pieds [1.8 m] de long, & l'autre CB, en avoit 8 [pieds de long, c'est-à-dire, 2.4 m], je les ai assujettis chacun par un bout à deux brides de soye DE, & FG, qui les coupoient à angles droits, & qui étoient disposées de sorte qu'approchant ou éloignant parallèlement ces brides l'une de l'autre, les deux bouts des deux cordons s'éloignoient ou s'approchoient l'un de l'autre, de manière qu'on pouvoit les fixer à la distance qu'on souhaitoit. Au bout B du cordon de 8 pieds étoit suspendue une boule de bois, & le bout le plus éloigné du cordon de 6 pieds étoit fixé à une troisième bride de soye en S pour la soutenir en l'air; présentant ensuite le tube frotté au bout S du cordon SA, après avoir éloigné les deux cordons d'un pouce [2.5 cm] l'un de l'autre, l'électricité étoit aussi sensible dans la boule que si le cordon eût été continu [observant que la balle attirait les petites feuilles métalliques placées près d'elle], à [une distance de] 3 pouces [7.5cm] elle l'étoit encore beaucoup, à 6 pouces [15 cm] un peu moins, & à 1 pied [30 cm] beaucoup moins, & à peu-près comme à la distance de 1256 pieds



Figura B.18: Representación del famoso experimento de Gray en el libro de Nollet, [Nol53]. En esta ilustración, se observa que el tubo de vidrio no necesita entrar en contacto con el niño.

Tomé dos trozos de un cordón de hilo [conductor], del grosor de un dedo, el primero de los cuales *SA*, tenía 6 pies [1.8 m] de largo, & el otro *CB*, tenía 8 [pies de largo, es decir, 2.4 m], los sujeté por un extremo a dos bridas de seda *DE*, & *FG*, que los cortaban en ángulo recto, & que estaban dispuestas de tal manera que, al acercar o alejar estas bridas entre sí de forma paralela, los dos extremos de los dos cordones se alejaran o se acercaran entre sí, de manera que se pudieran fijar a la distancia que se deseara. En el extremo *B* del cordón de 8 pies estaba suspendida una bola de madera, & el extremo más alejado del cordón de 6 pies estaba fijado a una tercera brida de seda en *S* para sostenerla en el aire; presentando a continuación el tubo frotado en el extremo *S* del cordón *SA*, después de haber

de corde continuë [377 m, comme Du Fay l'avait déjà expérimenté auparavant]; la matière électrique coule donc librement dans l'air, sans être fixée par aucun corps. Cette expérience prouve combien il est nécessaire que la corde [conducteuse] dont on se sert pour transmettre au loin l'électricité, soit *isolée*, ou ne soit soutenue que de corps les moins propres qu'il est possible à se charger eux-mêmes de l'électricité.

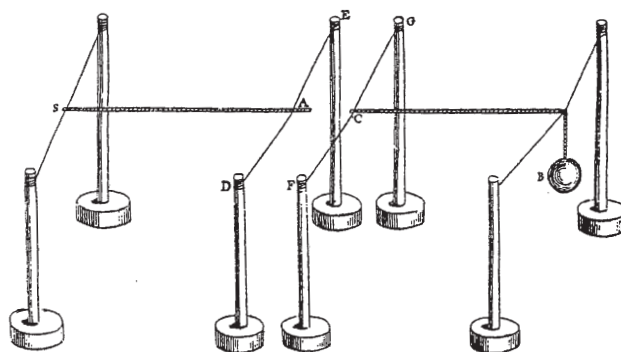


Figura B.19: Ilustración del experimento de Du Fay, similar a algunos experimentos anteriores realizados por Gray.

alejado los dos cordones una pulgada [2.5 cm] el uno del otro, la electricidad era tan sensible en la bola como si el cordón hubiera sido continuo [observando que la bola atraía las pequeñas hojas metálicas colocadas cerca de ella], a [una distancia de] 3 pulgadas [7.5 cm] todavía lo era mucho, a 6 pulgadas [15 cm] un poco menos, & a 1 pie [30 cm] mucho menos, & aproximadamente como a una distancia de 1256 pies de cordón continuo [377 m, como Du Fay ya había experimentado anteriormente]; por lo tanto, la materia eléctrica fluye libremente en el aire, sin estar fijada por ningún cuerpo. Este experimento demuestra lo necesario que es que el cordón [conductor] que se utiliza para transmitir la electricidad a distancia esté *aislada* o solo esté sostenida por los cuerpos menos propensos a cargarse de electricidad.

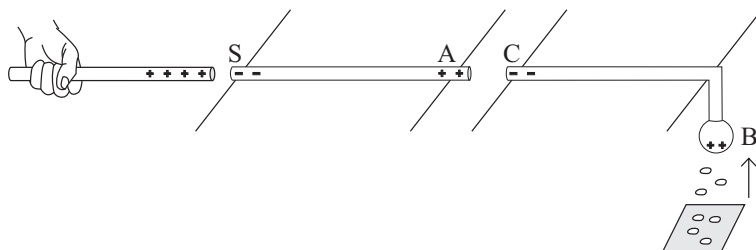


Figura B.20: Ilustración de la polarización en el experimento de Du Fay, figura B.19. Los conductores SA y CB se sostienen sobre hilos de seda aislantes.

La descripción moderna de este experimento no se basa en una sustancia eléctrica que circula libremente en el aire, como imaginaba Du Fay. En su lugar, se considera que el fenómeno principal de este experimento es la polarización eléctrica de los conductores, como se muestra en la figura B.20. En otras palabras, el tubo de vidrio frotado polariza eléctricamente el cordón conductor SA cuando se acerca a él. Las cargas en el extremo A de esto cordón polarizan eléctricamente otro conductor CB. Este

conductor *CB* está compuesto por un segundo cordón conectado a una bola de madera. Las dos polarizaciones tienen lugar a pesar del espacio de aire entre *A* y *C*, que varía entre 2.5 cm y 30 cm. Las cargas acumuladas en el extremo inferior de la bola de madera, que tienen el mismo signo que las cargas del tubo de vidrio frotado, atraen los cuerpos ligeros cercanos.

B.8 El descubrimiento de que las cargas libres se distribuyen por la superficie de los conductores

En la continuación de su artículo de 1731, Gray describe otro descubrimiento fundamental, a saber (el énfasis en cursiva es nuestro):^{55, 56}

Algún tiempo después, en casa del Sr. Wheler, realizamos el siguiente experimento con el fin de comprobar si la atracción eléctrica es proporcional a la cantidad de materia presente en los cuerpos.

Se fabricaron dos cubos de roble, de aproximadamente seis pulgadas por seis pulgadas [15 cm × 15 cm], uno macizo y otro hueco: estos se suspendieron mediante dos hilos finos, casi de la misma manera que en el experimento mencionado anteriormente; la distancia entre los cubos era, según estimaciones, de aproximadamente catorce o quince pies [4.6 m]; con la línea de comunicación atada a cada hilo y la hoja de latón colocada debajo de los cubos, se frotó el tubo [de vidrio] y se mantuvo sobre el centro de la línea [de comunicación], lo más cerca posible, a distancias iguales de los cubos, cuando ambos atrajeron y repelieron la hoja de latón al mismo tiempo y a la misma altura; *de modo que parecía no haber más atracción en el cubo sólido que en el hueco; sin embargo, me inclino a pensar que los efluvios eléctricos atraviesan todas las partes interiores del cubo sólido, aunque solo la superficie ejerza atracción*; pues de varios experimentos se desprende que, si cualquier otro cuerpo toca al que ejerce atracción, esta cesa hasta que se retira dicho cuerpo y el otro vuelve a ser excitado por el tubo.

En la figura B.21 se muestra una representación de este experimento.

Este experimento describe dos descubrimientos extremadamente importantes. El primero es que, en electrostática, las cargas libres, o las cargas excedentes en los conductores (como los cubos de madera conductores en este experimento), se distribuyen

⁵⁵[Gra31a, p. 35].

⁵⁶*Some time after, at Mr. Wheler's, we made the following Experiment, in order to try whether the Electrick Attraction be proportional to the Quantity of Matter in Bodies.*

There were made two Cubes of Oak, of about six Inches Square [15 cm × 15 cm], the one solid, the other hollow: These were suspended by two Hair-Lines, nearly after the same Manner as in the Experiment above-mentioned; the Distance of the Cubes from each other, was by Estimation, about fourteen or fifteen Feet [4.6 m]; the Line of Communication being tied to each Hair-Line, and the Leaf-Brass placed under the Cubes, the [glass] Tube was rubbed and held over the Middle of the [communication] Line, and as near as could be guessed, at equal Distances from the Cubes, when both of them attracted and repelled the Leaf-Brass at the same Time, and to the same Hight; so that there seemed to be no more Attraction in the solid than in the hollow Cube; yet I am apt to think that the Electrick Effluvia pass through all the interior Parts of the solid Cube, though no Part but the Surface attracts; for from several Experiments it appears, that if any other Body touches that which attracts, its Attraction ceases till that Body be removed, and the other be again excited by the Tube.

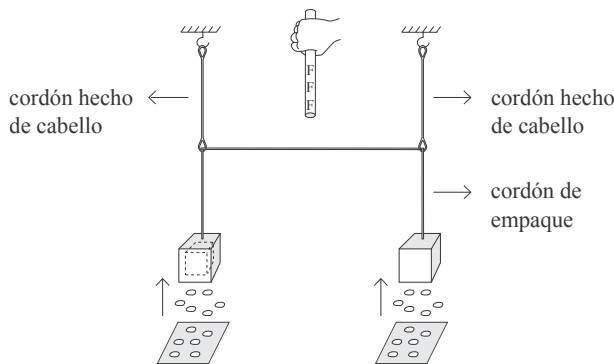


Figura B.21: Un cubo hueco y un cubo lleno se atraen con la misma fuerza.

por la superficie de los conductores, y no por su volumen. Esta propiedad fundamental de los conductores en equilibrio electrostático se atribuye a veces a Michael Faraday (1791–1867). Este experimento demuestra que Gray ya conocía este hecho.⁵⁷

El segundo descubrimiento, expresado en la última frase citada anteriormente, es el hecho de que un conductor electrizado se descarga cuando toca otro conductor conectado a tierra, es decir, cuando el conductor electrizado se conecta a tierra. Gray parece referirse aquí a sus experimentos de 1708. Véanse las secciones 4.2 y 4.5.

B.9 El descubrimiento del efecto punta

Al principio, Gray colocó la hoja de latón sobre un soporte, que era una tabla redonda de 30 cm de diámetro, cubierta con papel blanco, colocada sobre una base de 30 cm de altura. En la continuación de su histórico artículo, Gray describió incluso otro descubrimiento muy importante, a saber:^{58,59}

En estos experimentos, además del gran soporte mencionado anteriormente, utilicé dos pequeños que, dado que me resultaron muy útiles, no sería descabellado describirlos. La parte superior tenía un diámetro de tres pulgadas [7.5 cm]; estaban sostenidos por una columna de aproximadamente un pie [30 cm] de altura, con una base de unas cuatro pulgadas y media [11.4 cm]: Estaban torneados en *lignum vitae* [guayacán, un tipo de madera], y sus partes superiores e inferiores estaban diseñadas para atornillarse, lo que facilitaba su transporte. En las partes superiores se pegó papel blanco. Cuando se coloca la hoja de latón sobre cualquiera de estos soportes, observo que se eleva a una altura mucho mayor que cuando

⁵⁷[CM79, p. 396] y [Hei99, pp. 248–249].

⁵⁸[Gra31a, p. 42].

⁵⁹In these Experiments, besides the large Stand above-mentioned, I made use of two small ones, which, as I found them very useful, it may not be improper to describe them. The Tops of them were three Inches [7.5 cm] Diameter; they were supported by a Column of about a Foot [30 cm] in Hight, their Bases of about four Inches and a half [11.4 cm]: They were turned of *Lignum vitae* [a type of wood], their Tops and Bases made to skrew on for Convenience of Carriage. Upon the Tops were pasted white Paper. When the Leaf-Brass is laid on any of these Stands, I find it is attracted to a much greater Hight than when laid on a Table, and at least three Times higher than when laid on the Floor of a Room.

se coloca sobre una mesa, y al menos tres veces más alta que cuando se coloca sobre el suelo de una habitación.

En la figura B.22 se muestra una representación de este experimento.

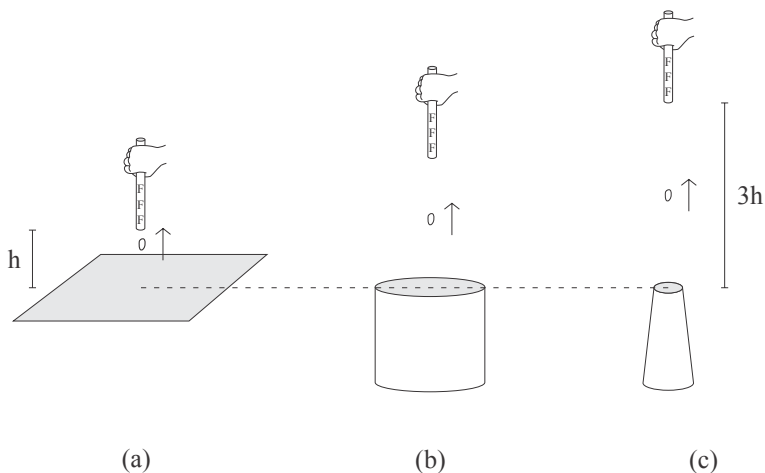


Figura B.22: (a) Una pequeña hoja de latón es atraída a una altura h con respecto a su posición inicial en el suelo. (b) Se eleva más cuando se coloca sobre una mesa o sobre un cilindro conductor de 30 cm de diámetro. (c) Cuando se encuentra sobre un conductor cónico, es atraída tres veces más alto que cuando está en el suelo.

Se trata de una de las primeras descripciones conocidas del efecto punta. En otras palabras, la fuerza eléctrica es más fuerte alrededor de las zonas puntiagudas y afiladas de los conductores que alrededor de las superficies planas.

En la sección 4.10, analizamos el comportamiento de las flechas fijadas a un péndulo eléctrico. Apuntaban hacia la pajita frotada antes de entrar en contacto con ella. Tras el contacto, apuntaban en la dirección opuesta a la pajita. Este comportamiento está relacionado con el efecto punta descubierto por Gray.

B.10 Conclusiones

Sin duda, se trata de uno de los artículos más importantes de toda la historia de la electricidad. El número de descubrimientos fundamentales realizados por un simple tintorero jubilado que nunca estudió en la universidad es realmente impresionante. En aquella época, tenía 63 años. Consideramos que la principal contribución de Gray es su descubrimiento de los conductores y los aislantes. Describió algunas de sus propiedades principales. Esto permitió controlar los fenómenos eléctricos, allanando el camino para una serie de nuevos descubrimientos que Gray y otros científicos realizaron poco después. En sus otros artículos, Gray describió muchos descubrimientos nuevos extremadamente importantes en el campo de la electricidad, pero no los abordaremos aquí.

Du Fay siguió de cerca el trabajo de Gray y se vio muy influenciado por sus artículos. Los descubrimientos de Du Fay sobre la repulsión eléctrica, el mecanismo *ACR* y los dos tipos de electricidad se produjeron después de que decidiera reproducir y explorar los numerosos descubrimientos realizados anteriormente por Gray. Por ejemplo, en uno de sus trabajos más importantes, Du Fay afirmó lo siguiente:^{60,61}

Ruego a Su Excelencia que comunique [esta carta] a la *Royal Society*, y en particular al Sr. *Gray*, quien trabaja en este tema con tanta dedicación y éxito, y a quien reconozco mi deuda por los descubrimientos que hice, así como por los que posiblemente yo haga en el futuro; ya que fue a partir de sus escritos que tomé la resolución de dedicarme a este tipo de experimentos.

Comenzamos este libro con una descripción del efecto del ámbar, un fenómeno conocido al menos desde la época de Platón, en el siglo IV a. C. Lo concluimos con una descripción del trabajo de un tintorero jubilado cuyos descubrimientos nos permitieron dar un gran paso adelante en nuestra comprensión de la naturaleza y en el campo técnico de la electricidad. ¡Los caminos que tomó la ciencia para desarrollarse son realmente fascinantes!

⁶⁰ [DF34a, pp. 265–266] y [BC07, p. 643].

⁶¹ I beseech your Grace to communicate it [this letter] to the *Royal Society*, and in particular to Mr. *Gray*, who works on this Subject with so much Application and Success, and to whom I acknowledge my self indebted for the Discoveries I have made, as well as for those I may possibly make hereafter; since 'tis from his Writings that I took the Resolution of applying my self to this kind of Experiments.

Bibliografía

- [AB23] A. K. T. Assis y L. L. Bucciarelli. *Coulomb's Memoirs on Torsion, Electricity, and Magnetism Translated into English*. Apeiron, Montreal, 2023. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [AC11] A. K. T. Assis y J. P. M. d. C. Chaib. *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do Significado e da Evolução da Força de Ampère, Juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. Editora da Unicamp, Campinas, 2011.
- [AC15] A. K. T. Assis y J. P. M. C. Chaib. *Ampère's Electrodynamics — Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamical Phenomena, Uniquely Deduced from Experience*. Apeiron, Montreal, 2015. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Aep79] F. U. T. Aepinus. *Aepinus's Essay on the Theory of Electricity and Magnetism*. Princeton University Press, Princeton, 1979. Traducción por P. J. Connor. Monografía introductoria y notas de R. W. Home.
- [AH07] A. K. T. Assis y J. A. Hernandez. *The Electric Force of a Current: Weber and the Surface Charges of Resistive Conductors Carrying Steady Currents*. Apeiron, Montreal, 2007. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [AH09] A. K. T. Assis y J. A. Hernandez. *A Força Elétrica de uma Corrente: Weber e as Cargas Superficiais de Condutores Resistivos com Correntes Constantes*, volumen 73 de *Coleção Acadêmica*. Edusp y Edufal, São Paulo y Maceió, 2009.
- [Amp22] A.-M. Ampère. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74, 1822.
- [Ari94] Aristóteles. *Metafísica* Introducción, traducción y notas de Tomás Calvo Martínez. Editorial Gredos, Madrid, 1994.
- [Ari03] Aristóteles. *Acerca del alma*. Editorial Gredos, Madrid, 1978. Quinta reimpressão, 2003.

- [Ari15] Aristóteles. *Meteorológicos* In *Acerca del cielo, Meteorológicos*. Introducción, traducción y notas de Miguel Candel. Editorial Gredos, Madrid, 1996, tercera edición, 2015, pp.133–249.
- [Ass08a] A. K. T. Assis. *Archimedes, the Center of Gravity, and the First Law of Mechanics*. Apeiron, Montreal, primera edición, 2008. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass08b] A. K. T. Assis. *Arquimedes, o Centro de Gravidade e a Lei da Alavanca*. Apeiron, Montreal, 2008. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass10a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*. Apeiron, Montreal, 2010. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass10b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass15] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*. Apeiron, Montreal, 2015. Traducido por A. Baraov a partir de la versión inglesa. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass17] A. K. T. Assis. *I Fondamenti Sperimentali e Storici dell'Elettricità*. Associazione per l'Insegnamento della Fisica, Parma, 2017. La Fisica nella Scuola, Anno L, n. 2 Supplemento, Quaderno 26. Traducido por P. Cerreta, A. Cerreta y R. Cerreta. Editado por P. Cerreta, R. Serafini y R. Urigu. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass18a] A. K. T. Assis. *The Experimental and Historical Foundations of Electricity*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2018. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass18b] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2018. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass19] A. K. T. Assis. *Экспериментальные и Исторические Основы Электричества*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2019. Traducido por A. Baraov a partir de la versión inglesa. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21a] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 1: *Gauss and Weber's Absolute System of Units*. Apeiron, Montreal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21b] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 2: *Weber's Fundamental Force and the Unification of the Laws of Coulomb, Ampère and Faraday*. Apeiron, Montreal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Ass21c] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 3: *Measurement of Weber's Constant c , Diamagnetism, the Telegraph Equation and the Propagation of Electric Waves at Light Velocity*. Apeiron, Montreal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass21d] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 4: *Conservation of Energy, Weber's Planetary Model of the Atom and the Unification of Electromagnetism and Gravitation*. Apeiron, Montreal, 2021. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass22] A. K. T. Assis. *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo*. Apeiron, Montreal, 2022. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass24] A. K. T. Assis (editor). *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English*, volumen 5: *Unipolar Induction, Galvanometry, Biographical Studies, and Weber's Electrodynamics Versus Different Field Theories*. Apeiron, Montreal, 2024. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25a] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 1: *Biografia, Magnetismo, Indução Unipolar, e o Sistema Absoluto de Unidades de Gauss e Weber*. Apeiron, Montreal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25b] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 2: *A Força de Weber e a Unificação das Leis de Coulomb, Ampère e Faraday*. Apeiron, Montreal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25c] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 3: *Medição da Constante c de Weber, Diamagnetismo, a Equação do Telégrafo, e a Propagação de Ondas Elétricas na Velocidade da Luz*. Apeiron, Montreal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass25d] A. K. T. Assis. *Obras de Weber sobre Eletrodinâmica Traduzidas e Comentadas*, volumen 4: *Conservação da Energia, o Modelo Planetário de Weber para o Átomo, a Unificação do Eletromagnetismo com a Gravitação, e a Eletrodinâmica de Weber Contra as Teorias de Campo*. Apeiron, Montreal, 2025. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Ass26a] A. K. T. Assis. *Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité*, volumen 1. Apeiron, Montreal, 2026. Traducido por John Plaice. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.

- [Ass26b] A. K. T. Assis. *Les Fondements Expérimentaux et Historiques de l'Électricité*, volumen 2. Apeiron, Montreal, 2026. Traducido por John Plaice. <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [BC07] S. L. B. Boss y J. J. Caluzi. Os conceitos de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa segundo Du Fay. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:635–644, 2007.
- [BC10] S. L. B. Boss y J. J. Caluzi. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666–1736). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32:1602–1609, 2010.
- [Ben87] A. Bennet. Description of a new electrometer. *Philosophical Transactions*, 77:26–34, 1787.
- [Ben98] P. Benjamin. *A History of Electricity (The Intellectual Rise in Electricity) from Antiquity to the Days of Benjamin Franklin*. Wiley, New York, 1898.
- [Blo82] C. Blondel. *A.-M. Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820–1827)*. Bibliothèque Nationale, Paris, 1982.
- [Bor d] G. Borvon. Pourquoi deux espèces d'électricité? Pourquoi deux sens du courant électrique? L'histoire de l'électricité nous aide à comprendre. [s.f.] <https://www.ampere.cnrs.fr>.
- [Boy00] R. Boyle. Experiments and notes about the mechanical origine or production of electricity. In M. Hunter y E. B. Davis, editores, *The Works of Robert Boyle*, volumen 8, pp. 509–523. Pickering & Chatto, London, 2000. Obra publicada originalmente en 1675.
- [BW] C. Blondel y B. Wolff. Un tournant dans l'histoire de l'électricité: la mathématisation. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [BW12] C. Blondel y B. Wolff. Teinturiers et tubes de verre: Gray et Du Fay. 2012. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [BW20] C. Blondel y B. Wolff. Que dit l'article ELECTRICITE de l'Encyclopédie? 2020. <https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique>.
- [CA08] J. Camillo y A. K. T. Assis. Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin. *A Física na Escola*, 9:29–32, 2008. Video que muestra la chispa producida en este montaje: <https://www.ifi.unicamp.br/~assis> et <https://www.youtube.com/watch?v=X7WPSQMtiU0>.
- [Can53a] J. Canton. Electrical experiments, with an attempt to account for their several phaenomena; together with observations on thunder-clouds. *Philosophical Transactions*, 48:350–358, 1753.

- [Can53b] J. Canton. A letter to the Right Honourable the Earl of Macclesfield, President of the Royal Society, concerning some new electrical experiments. *Philosophical Transactions*, 48:780–785, 1753.
- [CC00] D. H. Clark y S. P. H. Clark. *Newton's Tyranny: The Suppressed Scientific Discoveries of Stephen Gray and John Flamsteed*. Freeman, New York, 2000.
- [Cha09] J. P. M. d. C. Chaib. *Análise do Significado e da Evolução do Conceito de Força de Ampère, juntamente com a Tradução Comentada de Sua Principal Obra sobre Eletrodinâmica*. PhD, Universidad de Campinas — UNICAMP, Campinas, Brasil, 2009. Supervisor: A. K. T. Assis. repositorio.unicamp.br/Acervo/Detalhe/435449 et <https://www.ifi.unicamp.br/~assis>.
- [Chi54] R. A. Chipman. An unpublished letter of Stephen Gray on electrical experiments, 1707–1708. *Isis*, 45:33–40, 1954.
- [CM79] D. H. Clark y L. Murdin. The enigma of Stephen Gray astronomer and scientist (1666–1736). *Vistas in Astronomy*, 23:351–404, 1979.
- [Des41a] J. T. Desaguliers. Experiments made before the Royal Society, Feb. 2. 1737–1738. *Philosophical Transactions*, 41(454):193–199, 1739–1741.
- [Des41b] J. T. Desaguliers. Several Electrical Experiments, made at various Times, before the Royal Society. *Philosophical Transactions*, 41(460):661–667, 1739–1741.
- [Des41c] J. T. Desaguliers. Some Thoughts and Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 41(454):186–193, 1739–1741.
- [DF33a] C. F. d. C. Du Fay. Premier mémoire sur l'électricité. Histoire de l'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 23–35. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33b] C. F. d. C. Du Fay. Quatrième mémoire sur l'électricité. De l'Attraction & Répulsion des Corps Électriques. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 457–476. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33c] C. F. d. C. Du Fay. Second mémoire sur l'électricité. Quels sont les Corps qui sont susceptibles d'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 73–84. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.
- [DF33d] C. F. d. C. Du Fay. Troisième mémoire sur l'électricité. Des Corps qui sont le plus vivement attirés par les matières électriques, et de ceux qui sont les plus propres à transmettre l'Électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 233–254. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1733.

- [DF34a] C. F. d. C. Du Fay. A letter from Mons. Du Fay, F. R. S. and of the Royal Academy of Sciences at Paris, to His Grace Charles Duke of Richmond and Lenox, concerning Electricity. Translated from the French by T. S. MD. *Philosophical Transactions*, 38(431):258–266, 1733–1734.
- [DF34b] C. F. d. C. Du Fay. Cinquième mémoire sur l'électricité. Où l'on rend compte des nouvelles découvertes sur cette matière, faites depuis peu par M. Gray; Et où l'on examine quelles sont les circonstances qui peuvent apporter quelque changement à l'Électricité pour l'augmentation ou la diminution de sa force, comme la température de l'air, le vuide, l'air comprimé, &c. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 341–361. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1734.
- [DF34c] C. F. d. C. Du Fay. Sixième mémoire sur l'électricité. Où l'on examine quel rapport il y a entre l'Électricité, & la faculté de rendre de la Lumière, qui est commune à la plûpart des corps électriques, & ce qu'on peut inférer de ce rapport. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 503–526. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1734.
- [DF37a] C. F. d. C. Du Fay. Huitième mémoire sur l'électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 307–325. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1737.
- [DF37b] C. F. d. C. Du Fay. Septième mémoire sur l'électricité. Contenant quelques Additions aux Mémoires précédents. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 86–100. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1737.
- [Dop74] J. G. Doppelmayr. *Neu-entdeckte Phaenomena von bewunderswürdigen Wirkungen der Natur*. Nürnberg, 1774.
- [Fer78] N. C. Ferreira. Proposta de Laboratório para a Escola Brasileira — Um Ensaio sobre a Instrumentalização no Ensino Médio de Física. Maestria, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1978.
- [Fer01a] N. C. Ferreira. Acende aqui, apaga ali. *Ciência Hoje na Escola*, 12:65–67, 2001.
- [Fer01b] N. C. Ferreira. Faça como Gilbert: construa uma bússola de declinação. *Ciência Hoje na Escola*, 12:21–22, 2001.
- [Fer01c] N. C. Ferreira. Magnetismo e eletricidade. *Ciência Hoje na Escola*, 12:14–17, 2001.
- [Fer01d] N. C. Ferreira. O versorium. *Ciência Hoje na Escola*, 12:18–20, 2001.
- [Fer06] N. Ferreira. *Equilíbrio*. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino, Instituto de Física, USP., São Paulo, Brasil, 2006.

- [Fer da] N. C. Ferreira. Construa sua própria bússola! [s.f.] <http://chc.org.br/acervo/construa-sua-propria-bussola>.
- [Fer db] N. Ferreira, [s. d.]. *Eletrostática*, volumen 1. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.f.]
- [Fer dc] N. Ferreira, [s. d.]. *Eletrostática*, volumen 2. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.f.]
- [Fer dd] N. Ferreira. *Mecânica*. Instituto de Física, USP, São Paulo. Projeto RIPE — Rede de Instrumentação para o Ensino. [s.f.]
- [Fig67] L. Figuier. *Les Merveilles de la Science ou Description Populaire des Inventions Modernes*, volumen 1. Jouvett et Cie., Paris, 1867.
- [Fig85] L. G. Figuier. *Les Merveilles de l'Électricité*. Association pour l'Histoire de l'Électricité en France, Paris, 1985. Textes choisis présentés par Fabienne Cardot.
- [FM91] N. Ferreira y J.-P. Maury. *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* Ophrys, Paris, 1991.
- [Fra55] G. Fracastoro. *De sympathia & antipathia rerum*. In: *Opera omnia in unum proxime post ilius mortem collecta*. Apud Iuntas, Venice, 1555.
- [Gas91] A. Gaspar. Motor de ímã móvel. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 8:188–193, 1991.
- [Gas96] A. Gaspar. *História da Eletricidade*. Ática, São Paulo, 1996.
- [Gas03] A. Gaspar. *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental*. Ática, São Paulo, 2003.
- [GG90] I. Grattan-Guinness. *Convolutions in French Mathematics, 1800–1840*, volumen 2. Birkhäuser, Basel, 1990.
- [GG91] I. Grattan-Guinness. Lines of mathematical thought in the electrodynamics of Ampère. *Physis*, 28:115–129, 1991.
- [Gil00a] W. Gilbert. *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure; physiologia nova*. London, 1600.
- [Gil00b] W. Gilbert. *On the Magnet, Magnetick Bodies also, and on the Great Magnet the Earth; a New Physiology, Demonstrated by Many Arguments & Experiments*. Chiswick Press, London, 1900. Traducido por S. P. Thompson.
- [Gil78] W. Gilbert. *On the Loadstone and Magnetic Bodies and on the Great Magnet the Earth*, volumen 28, pp. 1–121 de *Great Books of the Western World*. Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1978. Traducido por P. F. Mottelay.
- [Gli33] M. Gliozzi. L'elettrologia nel secolo XVII. *Periodico di Matematiche*, 13:1–14, 1933.

- [Gra20] S. Gray. An Account of some new Electrical Experiments. *Philosophical Transactions*, 31(366):104–107, 1720–1.
- [Gra31a] S. Gray. A Letter to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. containing several Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(417):18–44, 1731–2.
- [Gra31b] S. Gray. A Letter concerning the Electricity of Water, from Mr. Stephen Gray to Cromwell Mortimer, M. D. Secr. R. S. *Philosophical Transactions*, 37(422):227–230, 260, 1731–2.
- [Gra31c] S. Gray. A Letter from Mr. Stephen Gray to Dr. Mortimer, Secr. R. S. containing a farther Account of his Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(423):285–291, 1731–2.
- [Gra31d] S. Gray. Two Letters from Mr. Stephen Gray, F. R. S. to C. Mortimer, M. D. Secr. R. S. concerning farther Accounts of his Experiments concerning Electricity. *Philosophical Transactions*, 37(426):397–407, 1731–2.
- [Gra35a] S. Gray. Experiments and Observations upon the Light that is produced by communicating Electrical Attraction to animal or inanimate Bodies, together with some of its most surprising effects; communicated in a Letter from Mr. Stephen Gray to Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. *Philosophical Transactions*, 39(436):16–24, 1735–6.
- [Gra35b] S. Gray. A Letter from Stephen Gray, F. R. S. to Cromwell Mortimer, Secr. R. S. containing some Experiments relating to Electricity. *Philosophical Transactions*, 39(439):166–170, 1735–6.
- [Gra35c] S. Gray. Mr. Stephen Gray, F. R. S. his last Letter to Granville Wheler, Esq; F.R.S. concerning the Revolutions which small pendulous Bodies will, by Electricity, make round larger ones from West to East as the planets do round the Sun. *Philosophical Transactions*, 39(441):220, 1735–6.
- [Gra35d] S. Gray. An Account of some Electrical Experiments intended to be communicated to the Royal Society by Mr. Stephen Gray, F.R.S. taken from his Mouth by Cromwell Mortimer, M. D. R. S. Secr. on Feb. 14, 1735–6. Being the day before he died. *Philosophical Transactions*, 39(444):400–403, 1735–6.
- [GS89] G. Gaudenzi y R. Satolli. *Jean-Paul Marat: Scienziato e Rivoluzionario*. Mur-sia, Milano, 1989.
- [Gue94] O. v. Guericke. *The New (So-Called) Magdeburg Experiments of Otto von Guericke*, volumen 137 de *Archives Internationales d'Histoire des Idées*. Klu-
wer, Dordrecht, 1994. Traducción y prefacio de M. G. F. Ames.
- [Gui05] A. P. Guimarães. *From Lodestone to Supermagnets*. Wiley, Berlin, 2005.

- [Hau06] F. Hauksbee. An account of an experiment made before the Royal Society at Gresham-Colledge, touching the extraordinary elistricity of glass, produceable on a smart attrition of it; with a continuation of experiments on the same subject, and other phenomena. *Philosophical Transactions*, 25(308):2327–2335, 1706–1707.
- [Hau08] F. Hauksbee. An account of the repetition of an experiment touching motion given bodies included in a glass, by the approach of a finger near its outside: With other experiments on the effluvia of glass. *Philosophical Transactions*, 26(315):82–86, 1708–1709.
- [Hau09] F. Hauksbee. *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects, containing an Account of Several Surprising Phenomena touching Light and Electricity, producible on the Attrition of Bodies. With many other Remarkable Appearances, not before observ'd*. R. Brugis, London, 1709.
- [Hea67] N. H. d. V. Heathcote. The early meaning of electricity: Some Pseudodoxia Epidemica — I. *Annals of Science*, 23:261–275, 1967.
- [Hei79] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th & 18th Centuries*. University of California Press, Berkeley, 1979.
- [Hei81a] J. L. Heilbron. Aepinus, Franz Ulrich Theodosius. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 1, pp. 66–68. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81b] J. L. Heilbron. Dufay (Du Fay), Charles-François de Cisternay. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 4, pp. 214–217. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81c] J. L. Heilbron. Gray, Stephen. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 5, pp. 515–517. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81d] J. L. Heilbron. Hauksbee, Francis. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 6, pp. 169–175. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei81e] J. L. Heilbron. Nollet, Jean-Antoine. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 10, pp. 145–148. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Hei82] J. L. Heilbron. *Elements of Early Modern Physics*. University of California Press, Berkeley, 1982.
- [Hei99] J. L. Heilbron. *Electricity in the 17th and 18th Centuries — A Study in Early Modern Physics*. Dover, New York, 1999.
- [Hem80] L'abbé Hemmer. Sur l'électricité des métaux. *Journal de Physique*, 16:50–52, 1780.

- [Hom67] R. W. Home. Francis Hauksbee's theory of electricity. *Archive for the History of Exact Sciences*, 4:203–217, 1967. Reimpreso en R. W. Home, *Electricity and Experimental Physics in 18th-Century Europe* (Variorum, Hampshire, 1992), Chapter III.
- [Hom81] R. W. Home. *The Effluvial Theory of Electricity*. Arno Press, New York, 1981.
- [Jac99] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, third edition, 1999.
- [Kel81] S. Kelly. Gilbert, William. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 5, pp. 396–401. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Kra81] F. Krafft. Guericke, (Gericke), Otto von. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 5, pp. 574–576. Charles Scribner's Sons, New York, 1981.
- [Lae92] Diógenes Laercio. *Vidas, opiniones y sentencias de los filósofos más ilustres*. Traductor: José Ortiz y Sanz. Imprenta Real, Madrid, 1792.
- [Llo80] J. T. Lloyd. Lord Kelvin demonstrated. *The Physics Teacher*, 18:16–24, 1980.
- [Llo07] J. T. Lloyd. Lorde Kelvin demonstrado. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29:499–508, 2007. Traducción por A. K. T. Assis de J. T. Lloyd, “Lord Kelvin demonstrated,” *The Physics Teacher*, volumen 18, pp. 16–24 (1980).
- [Max81] J. C. Maxwell. *An Elementary Treatise on Electricity*. Clarendon Press, Oxford, 1881.
- [Med02] A. Medeiros. As origens históricas do eletroscópio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 24:353–361, 2002.
- [Mel98] M. A. Melehy. Thermal momentum in thermodynamics, part 2. Interfacial electrification: a new consequence of the first and second laws. *Physics Essays*, 11:430–433, 1998.
- [Net] L. F. Netto. Feira de ciências.
- [New47] I. Newton. *Óptica o tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. Eugenio Díaz del Castillo. Introducción de Manuel Balaguer. Emecé Editores, Buenos Aires, 1947.
- [New16] I. Newton. *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Traducción: Eloy Rada García. ePub, base r1.2, casc 29.05.16.
- [New90c] I. Newton. *Principia — Principios Matemáticos de Filosofía Natural*. Nova Stella/Edusp, São Paulo, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos. Traducción por T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring y M. H. C. Célia.

- [New96] I. Newton. *Óptica*. Edusp, São Paulo, 1996. Traducción, introducción y notas por A. K. T. Assis.
- [New08] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Edusp, São Paulo, 2008. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Traducción al portugués por A. K. T. Assis.
- [New10] I. Newton. *Principia — Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. Folha de São Paulo, São Paulo, 2010. Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Coleção Folha de São Paulo: Livros que Mudaram o Mundo, volumen 9. Traducción al portugués por A. K. T. Assis.
- [Nol47] L'Abbé Nollet. Éclaircissemens sur plusieurs faits concernant l'électricité. *Mémoires de Mathématique et de Physique*, pp. 102–131. In *Histoire de l'Académie Royale des Sciences*, Imprimerie Royale, Paris, 1747.
- [Nol53] J. A. Nollet. *Essai sur l'Électricité des Corps*. Frères Guerin, Paris, 3ème edition, 1753.
- [Nol67] J. A. Nollet. *Lettres sur l'électricité, dans lesquelles on trouvera les principaux phénomènes qui ont été découverts depuis 1760, avec des discussions sur les conséquences qu'on en peut tirer*. Durand, Neveu, Libraire, Paris, 1767. Tercera parte.
- [Ørs98a] H. C. Ørsted. New electro-magnetic experiments. In K. Jelved, A. D. Jackson, y O. Knudsen, editores, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pp. 421–424. Princeton University Press, Princeton, 1998. Artículo publicado originalmente en alemán en 1820.
- [Ørs98b] H. C. Ørsted. Observations on electro-magnetism. In K. Jelved, A. D. Jackson, y O. Knudsen, editores, *Selected Scientific Works of Hans Christian Ørsted*, pp. 430–445. Princeton University Press, Princeton, 1998. Reimpreso de Thomson, *Annals of Philosophy*, volumen 2, pp. 321–337 (1821).
- [Pla71] Platón. *Protágoras ó los sofistas*. In *Obras completas*. Puestas en lengua castellana por primera vez por D. Patricio de Azcárate. Medina y Navarro Editores, Madrid, 1871, Tomo 2, pp. 1–92. <https://www.filosofia.org/cla/pla/azf02009.htm>
- [Pla72] Platón. *Timeo ó de la naturaleza*. In *Obras completas*. Puestas en lengua castellana por primera vez por D. Patricio de Azcárate. Medina y Navarro Editores, Madrid, 1872, Tomo 6, pp. 129–264. <https://www.filosofia.org/cla/pla/azf06131.htm>
- [Pri72] J. Priestley. An account of a new electrometer, contrived by Mr. William Henly, and of several electrical experiments made by him, in a letter from Dr. Priestley, F.R.S. to Dr. Franklin, F.R.S. *Philosophical Transactions*, 62:359–364, 1772.

- [Pri66] J. Priestley. *The History and Present State of Electricity*, volumen 1. Johnson Reprint Corporation, New York, 1966. The Sources of Science, Number 18. Reimpresión de la tercera edición. London, 1775.
- [Que] A. C. M. d. Queiroz. Electrostatic machines. <https://www.coe.ufrj.br/~acmq>.
- [RR53] D. Roller y D. H. D. Roller. The prenatal history of electrical science. *American Journal of Physics*, 21:343–356, 1953.
- [RR57] D. Roller y D. H. D. Roller. The Development of the Concept of Electric Charge. In J. B. Conant, editor, *Harvard Case Studies in Experimental Science*, capítulo 8, pp. 541–639. Harvard University Press, Cambridge, 1957.
- [Sas02] W. M. Saslow. *Electricity, Magnetism, and Light*. Academic Press, New York, 2002.
- [The56] Theophrastus. *Theophrastus on Stones*. The Ohio State University, Columbus, 1956. Introducción, texto griego, traducción al inglés y comentarios de E. R. Caley y J. F. C. Richards.
- [Tho] W. Thomson. On a self-acting apparatus for multiplying and maintaining electric charges, with applications to illustrate the voltaic theory. *Proceedings of the Royal Society of London*, 16:67–72, 1867–1868.
- [Wal36] W. C. Walker. The detection and estimation of electric charges in the eighteenth century. *Annals of Science*, 1:66–100, 1936.
- [Wil59] B. Wilson. Experiments on the tourmalin. *Philosophical Transactions*, 51:308–339, 1759.
- [WB11] B. Wolff y C. Blondel. Quelques questions encore posées aujourd’hui par l’histoire de l’électrostatique. *BUP*, 105(934):705–717, 2011.
- [Zan81] B. Zanobio. Fracastoro, Girolamo. In C. C. Gillispie, editor, *Dictionary of Scientific Biography*, volumen 5, pp. 104–107. Charles Scribner’s Sons, New York, 1981.

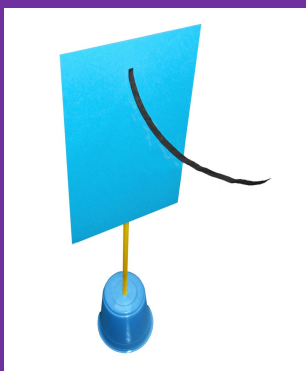
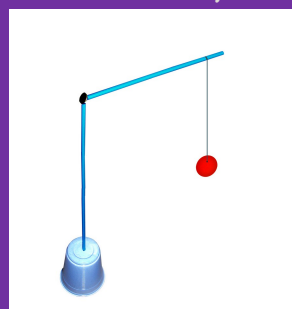
Los fundamentos experimentales e históricos de la electricidad aborda los aspectos más fundamentales de la física. La obra describe los principales experimentos y descubrimientos de la historia de la electricidad. Comienza con el efecto del ámbar, que se asemeja al experimento común que consiste en atraer pequeños trozos de papel con un pedazo de plástico frotado contra el cabello. Explica cómo construir varios instrumentos: el versorio, el péndulo eléctrico, el electroscoPIO y los colectores de carga. Aborda la atracción y la repulsión eléctricas, las cargas positivas y negativas, así como el mecanismo ACR (atracción, conducción de la electricidad y repulsión).



Analiza los conceptos de conductores y aislantes, así como las principales diferencias de comportamiento entre estos dos tipos de sustancias. Todos los experimentos se describen con claridad y se llevan a cabo con materiales sencillos y de bajo costo. Estos experimentos permiten llegar a conceptos, definiciones y leyes claras que describen estos fenómenos. Se presentan los aspectos históricos, acompañados de citas pertinentes de los principales científicos. La obra ofrece un análisis exhaustivo de los trabajos de Stephen Gray (1666-1736), el gran científico británico que descubrió los conductores y los aislantes, así como algunas de sus principales propiedades. Al final de la obra se incluye una bibliografía extensa.

Acerca del autor

André Koch Torres Assis nació en Brasil en 1962. Obtuvo su doctorado en física en 1987. Trabaja en el Instituto de Física de la Universidad de Campinas (UNICAMP) desde 1989. Ocupó puestos de posdoctorado en el Laboratorio de Culham (Autoridad Británica de Energía Atómica, Oxfordshire, Inglaterra, de 1988 a 1989), en la Universidad Northeastern (Boston, Estados Unidos, de 1991 a 1992), en la Universidad de Hamburgo (Alemania, de 2001 a 2002 y también en 2009), en la Universidad Técnica de Dresde (Alemania, 2014) y en la Universidad de Augsburg (Alemania, 2023).



Sus cuatro estancias en Alemania fueron financiadas por becas de investigación Humboldt otorgadas por la Fundación Alexander von Humboldt de Alemania. Ha publicado más de 30 obras sobre la electrodinámica de Weber; los cálculos de inductancia y fuerza en circuitos eléctricos; los principales trabajos de Wilhelm Weber sobre la electrodinámica traducidos al inglés; Arquímedes, el centro de gravedad y la ley de la palanca; el modelo planetario del átomo de Weber; el método de Arquímedes; la fuerza eléctrica de una corriente; la electrodinámica de Ampère; las memorias de Coulomb sobre la torsión, la electricidad y el magnetismo traducidas al inglés; y la mecánica relacional y la aplicación del principio de Mach a la fuerza gravitacional de Weber. Página de inicio: <https://www.if.unicamp.br/~assis>

ISBN 978-1-9879805-1-6

