

**PROBLEMAS HISTÓRICOS Y DIFICULTADES DE APRENDIZAJE EN LA
INTERPRETACIÓN NEWTONIANA DE FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS
CONSIDERADOS ELEMENTALES**

(Historical problems and learning difficulties in the Newtonian interpretation of supposedly elementary electrostatic phenomena)

C. Furió

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales
Universidad de Valencia
Valencia, España

J. Guisasola

J.L. Zubimendi

Departamento de Física Aplicada I
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial
Universidad del País Vasco
San Sebastián, España

Resumen

En este trabajo se comenzará realizando una breve revisión histórica de la Electroestática. A continuación se planteará la utilización de este conocimiento histórico en el análisis de posibles dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de esta teoría. Para ello, se recogerán las pruebas o diseños empíricos principalmente empleados en la evolución histórica y que son conocidos como fenómenos o hechos "naturales", y se analizarán qué explicaciones dan los estudiantes actuales a estos hechos. Los resultados obtenidos parecen indicar que la mayoría de las interpretaciones de los estudiantes a los fenómenos electrostáticos indicados presentan ideas sobre la naturaleza eléctrica de la materia que difieren de la teoría Newtoniana y recuerdan a modelos explicativos pre-newtonianos.

Palabras-clave: electrostática; dificultades de aprendizaje; problemas históricos.

Abstract

This paper starts with a a brief historical review of electrostatics. Then, the use of this historical knowledge is proposed in order to analyse students' difficulties in learning this theory. This is done using proofs and empirical designs, employed mainly in the historical evolution, which are known as "natural" phenomena or facts, and examining what explanations are given by the students to these facts. Research findings seem to suggest that most of students' interpretations of electrostatics phenomena present ideas about the electrical nature of matter that differ from the Newtonian theory and remind us of pre-Newtonian explicative models.

Key-words: electrostatics; learning difficulties; historical problems.

1. Introducción

Como se ha señalado repetidamente, una de las mayores dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de la Física reside en el aprendizaje significativo de los conceptos (Mc. Dermott 1984, Driver 1989, Viennot 1996). Ello ha hecho que este aprendizaje sea una fuente constante de preocupación entre el profesorado y se haya convertido en una de las áreas prioritarias de investigación en la Enseñanza de la Física (Carrascosa y Gil 1992, Wandersee et al 1994). En particular, las dificultades de aprendizaje de las principales nociones de electricidad tales como potencial eléctrico o intensidad de corriente eléctrica están siendo investigadas extensamente en el nivel de la enseñanza secundaria. Sin embargo, estos trabajos se han centrado más en el dominio de

la electrocinética y, en particular, en los circuitos eléctricos de corriente continua (Duit, 1993). Las dificultades de enseñanza-aprendizaje encontradas en el campo de la electrocinética han llevado a plantearse diversas cuestiones en el campo de la electrostática. Así, recientemente han aparecido trabajos que investigan el problema de relacionar los conceptos estudiados en electrostática con su utilización posterior en electrodinámica (Eylon y Ganiel, 1990; Benshegir & Closset, 1996). Asimismo, otros trabajos de investigación consideran las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje y utilización del concepto de campo eléctrico en Electrostática (Furió y Guisasola 1998, Rainson et al. 1994, Tornkvist et al. 1993, Viennot y Rainson 1992).

Sin embargo, pocos estudios didácticos han sido realizados sobre las dificultades de los estudiantes para interpretar fenómenos electrostáticos básicos como, por ejemplo, la electrización por frotamiento, la atracción de trocitos de papel por un cuerpo cargado .etc. Las interpretaciones de estos fenómenos están relacionadas con conceptos básicos de electricidad como la naturaleza eléctrica de la materia y la inducción eléctrica. En efecto, las explicaciones dadas a la electrización de un dieléctrico por frotamiento se basan en aceptar previamente la existencia de cargas positivas y negativas en los cuerpos frotados y el transvase de cargas de uno a otro. Asimismo, la atracción a distancia de pequeños trozos de papel por el cuerpo cargado es explicada por la acción resultante de las fuerzas que ejerce la carga neta del cuerpo frotado sobre las cargas positivas y negativas separadas de los papelitos (inducción eléctrica).

Una clara comprensión de los conceptos mencionados es esencial si se quiere iniciar a los estudiantes en una visión científica de los fenómenos electrostáticos y de la electricidad. En este sentido, entendemos por visión científica la expuesta por la teoría clásica del electromagnetismo definida de acuerdo con las leyes de Maxwell, que es el marco teórico en el que se explican estos fenómenos para un nivel de Bachillerato y primeros cursos de universidad (Chabay & Sherwood, 1995). El establecimiento de este marco teórico nos lleva a considerar el comportamiento de la materia frente a las interacciones eléctricas como uno de los prerrequisitos básicos en el estudio del electromagnetismo. Así pues, el estudio de las dificultades de los estudiantes ante los fenómenos electrostáticos básicos puede indicar las razones de posibles concepciones alternativas y dificultades en otros campos del electromagnetismo.

En el trabajo que nos ocupa hemos acotado el marco teórico descrito en el párrafo anterior a la interacción eléctrica interpretada desde un punto de vista newtoniano de 'acción a distancia' y no hemos entrado a considerar interpretaciones dentro de una teoría de campo eléctrico. Así pues, nos referiremos a las incomprendiones y dificultades de los estudiantes para comprender las interacciones eléctricas en un marco newtoniano y no en un marco teórico basado en el concepto de campo.

A la hora de describir las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de conceptos básicos de una teoría científica hemos considerado que las personas construimos representaciones mentales para ayudarnos a comprender el funcionamiento de un sistema físico en circunstancias muy diversas (Giannetto et al. 1992, Pintó et al. 1996, Moreira 1996, Reiner 1997). Entendemos por representación mental la estructura de concepciones y formas de pensamiento utilizadas para describir la experiencia y que permite predecir el comportamiento de los sistemas en futuras relaciones (Gentner y Stevens 1983). Estas representaciones mentales incluyen diferentes categorías explicativas de la realidad en un mismo individuo dependiendo del contexto y del contenido de que se trate (Marton 1981, Linder 1993).

El hecho de que las personas puedan tener diferentes formas de ver y representar una misma realidad ya fue utilizado por Bachelard en 1940 para definir lo que él llama 'perfil epistemológico'. En su libro "Philosophy of no" (1968) muestra cómo una sola posición filosófica es insuficiente para describir las diferentes maneras de razonar cuando tratamos de explicar un concepto, y

describe detalladamente los posibles componentes o estadios del perfil epistemológico del concepto de masa, que pueden coexistir en la mente de una persona. Estos estadios epistemológicos vienen caracterizados por un orden jerárquico de forma que cada estadio sucesivo es de mayor poder explicativo que el anterior. En recientes trabajos de investigación E.F. Mortimer (1996) muestra que los argumentos de Bachelard han sido compartidos por otros filósofos y que las diferencias entre estos estadios no son sólo epistemológicas sino también ontológicas y se habla de perfiles conceptuales. Así mismo, la selección de uno de estos significados al intentar resolver una tarea va a venir inducida en la persona por sus creencias epistemológicas y ontológicas que condicionará fuertemente el análisis y contextualización del contenido de la tarea (Caravita y Hallden, 1994; Chi et al., 1994).

De acuerdo con lo anterior es posible que un estudio crítico de la historia y epistemología de la Ciencia (la historia vista como fuente de problemas resueltos que han supuesto avances en el conocimiento científico) nos pueda ilustrar a los profesores e investigadores sobre la presencia de saltos cualitativos entre perfiles conceptuales que se han presentado en la construcción de los conocimientos científicos (Saltiel y Viennot 1985, Gagliardi 1988, Nersessian 1989, Matthews 1990, Hodson 1992, Wandersee 1992, Furió y Guisasaola 1993, Duschl 1994, Solbes y Traver 1996, Seroglou et al. 1998). En este sentido, la no consideración por parte de la enseñanza de estas "discontinuidades" entre perfiles conceptuales, puede llevar a que los estudiantes utilicen sólo aquellos que son más significativos para ellos no alcanzando el perfil epistemológico que se quiere enseñar.

Una breve revisión de la historia de la Electroestática durante los siglos XVII Y XVIII muestra que una teoría explicativa científica de los fenómenos eléctricos elementales como las atracciones y repulsiones entre cuerpos cargados, la electrización por frotamiento o la inducción eléctrica vino a culminar un proceso de investigación dirigido a superar los problemas de los diferentes modelos explicativos formulados desde comienzos del siglo XVII . Es preciso resaltar que los diferentes saltos cualitativos que supuso el paso de modelos explicativos pre-newtonianos (modelo de 'efluvios', teoría del 'fluido eléctrico') a una teoría newtoniana de acción eléctrica a distancia de acuerdo con la ley de Coulomb, fueron debidos fundamentalmente al cambio ontológico y epistemológico que se dio a finales del siglo XVIII. El primer salto cualitativo llevaría a imaginar la interacción entre cuerpos cargados como una 'interacción a distancia', mientras que el segundo llevaría a establecer medidas cuantitativas y a definir el concepto de carga eléctrica. En definitiva este proceso de investigación supuso la incorporación de la Electricidad al marco newtoniano definido para la Mecánica en el siglo XVII.

Un proceso parecido puede imaginarse que ocurre en la enseñanza a nivel de Bachillerato cuando se inicia a los estudiantes en el aprendizaje de la teoría electrostática en un marco teórico newtoniano. El aprendizaje del modelo coulombiano para el estudio cuantitativo de las interacciones eléctricas no será una cuestión elemental y evidente, y será necesario contrastar las ventajas del modelo en diferentes fenómenos electrostáticos.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se comenzará realizando una breve revisión histórica para el caso concreto de la Electroestática hasta el surgimiento de la teoría coulombiana de acción a distancia. A continuación se planteará la utilización de este conocimiento histórico en el análisis de posibles dificultades de los estudiantes en el aprendizaje de esta teoría. Para ello, se recogerán las pruebas o diseños empíricos principalmente empleados en la evolución histórica y que son conocidos como fenómenos o hechos "naturales", y se analizarán qué explicaciones dan los estudiantes actuales a estos hechos. De esta forma se podrá obtener información sobre el perfil conceptual que emplean los estudiantes en estas explicaciones y ello permitirá establecer más claramente un diagnóstico de las principales dificultades conceptuales, epistemológicas y ontológicas que tienen. Todo esto puede orientar al profesor sobre posibles dificultades, aunque será

necesario tener en cuenta que seguramente, aparecerán también otro tipo de dificultades debidas a formas de razonamiento y actuación de los alumnos en las interacciones educativas.

2. ¿Qué obstáculos epistemológicos se presentaron en la Historia al tratar de explicar los fenómenos electrostáticos?

2.1. Los "efluvios eléctricos" de Gilbert.

Durante la Edad Media prevaleció la antigua hipótesis de los primitivos filósofos griegos que explicaban los fenómenos eléctricos mediante teorías animistas donde se otorga vida y conciencia a todo tipo de materia, animada o inanimada. Consecuencia de este animismo es la explicación -frecuente aún hoy en día- de la atracción o repulsión física entre objetos como manifestaciones externas del amor u odio, respectivamente, que se profesan.

Fue William Gilbert (1544-1603) quien, recogiendo en parte las ideas de J. Cardan publicadas en "De subtilitate" (1550), estableció una diferenciación clara entre el efecto "ambar" y el magnetismo en su libro "De Magnete, Magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure" (1600). Para ello inventó un instrumento eléctrico el "versorio" (indicador de madera pivotado de modo que pueda girar). Con este sensible instrumento, la lista de sustancias y objetos que podía electrizar por frotamiento aumentó considerablemente. De este modo, realizó la primera clasificación entre materiales "eléctricos" y "no eléctricos" (por ejemplo los metales). Gilbert indicaba la forma procedimental de realizar la clasificación según presentaran o no la propiedad 'eléctrica', es decir, atraer objetos ligeros al ser frotados. Esta forma de trabajar implicaba un cambio metodológico importante respecto de la época anterior, ya que fundamentaba esta clasificación en un criterio empírico (Taton, 1988).

Gilbert explicaba que estos fenómenos eran debidos a algo de "naturaleza material" que al frotar era liberado en los cuerpos "eléctricos" como el vidrio o el ambar. En apoyo de esta idea, buscó evidencias en otros dominios. Como él era médico, trato de establecer una analogía con la teoría de los "humores" vigente para diagnosticar enfermedades en la ciencia médica.

El modelo del "efluvio" de Gilbert fue utilizado con algunas variaciones por otros científicos de la época como K. Digby, F. Hauksbee (1676-1717) y W.J. Gravesande (1688-1742) para explicar la atracción eléctrica entre cuerpos cargados, la carga por frotamiento y la clasificación de los cuerpos en 'eléctricos' y 'no eléctricos' según se cargaran al ser frotados o no, las descargas eléctricas en gases rarificados o las 'luminiscencias' inducidas. En este sentido la electrización por frotamiento era explicada en base a que el cuerpo frotado tiene 'humor eléctrico' que la fricción del frotamiento hace salir formando una atmósfera alrededor de él (Gilbert 1600). Asimismo, la atracción de pequeños cuerpos por los cuerpos cargados por frotamiento era debido a que el 'efluvio' tiene tendencia a volver al cuerpo al que pertenece y arrastra a los pequeños cuerpos próximos (Gilbert 1600) o a que el 'efluvio' se condensa al enfriarse y arrastra a los pequeños cuerpos próximos (K. Digby). O bien a que los efluvios forman remolinos y vibraciones alrededor de los cuerpos cargados y atraen a los pequeños cuerpos, esta última explicación era similar a la teoría de los vórtices de Descartes (Whittaker 1987).

Este modelo explicativo del 'efluvio eléctrico' aunque proporcionó en su tiempo una base para posteriores investigaciones, falló a la hora de dar explicaciones verosímiles a nuevos fenómenos eléctricos como la repulsión eléctrica detectada por Nicolo Cabeo (1585-1650) unos años después de la muerte de Gilbert y la transmisión eléctrica mostrada por S. Gray en la segunda década del siglo XVIII.

2.2. *El modelo explicativo del fluido y atmósfera eléctricos*

En 1729 Stephen Gray (1666-1736) mostró que la 'virtud eléctrica' de un tubo de vidrio frotado podía ser transmitida a algunos cuerpos, dándoles a ellos la misma propiedad de atraer o repeler cuerpos ligeros. Esta "virtud eléctrica" puede ser llevada a cuerpos que se encuentran a muchos metros del tubo de vidrio. Este descubrimiento tuvo una gran importancia, ya que los investigadores anteriores no conocían otra forma de producir electrificaciones aparte del frotamiento de los cuerpos afectados (Heilbron 1979).

A raíz de estos nuevos descubrimientos se realiza una nueva clasificación de los materiales en "conductores" (que eran precisamente los denominados "no eléctricos"), ya que observa cómo éstos dejan moverse libremente al fluido eléctrico, a diferencia de los "eléctricos" que comprueba que son 'aislantes'.

Así pues, en el primer tercio del siglo XVIII, había dos clasificaciones de los materiales en base a dos criterios diferentes. Los "eléctricos" y "no eléctricos" según se electricen o no al ser frotados, y los "conductores" y "no conductores" según se electricen por contacto o no.

Después del descubrimiento de Gray no fue posible aceptar que los efluvios (emanaciones) estaban inseparablemente unidos a los cuerpos de los cuales habían emanado por frotamiento, y llegó a ser necesario admitir que las emanaciones tenían una existencia independiente, pudiendo ser transferidas de un cuerpo a otro. Por consiguiente, estos efluvios fueron reconocidos bajo el nombre de "fluido eléctrico" como una de las sustancias que constituían el mundo. En la construcción de esta teoría jugó un importante papel la analogía con la teoría del calórico, vigente en la época.

A partir de los fenómenos de carga por frotamiento y de transmisión eléctrica a mediados del siglo XVIII se produce una gran cantidad de experimentaciones para diseñar y perfeccionar máquinas generadoras de electricidad por frotamiento. En particular hay que resaltar la 'botella de Leiden' como un dispositivo para almacenar gran cantidad de electricidad. Al mismo tiempo los científicos de la época trataban de aplicar el nuevo modelo explicativo de "fluido eléctrico" a las atracciones y repulsiones eléctricas, así como a fenómenos de carga por frotamiento, de carga por inducción y de transmisión eléctrica.

Charles François Du Fay (1698-1739) utiliza las teorías de sus contemporáneos para explicar el fenómeno de electrización por influencia o inducción eléctrica y el de carga por contacto. Así, interpreta el comportamiento de láminas de oro cuando están próximas a un tubo de vidrio electrizado, suponiendo que al principio el vórtice del tubo envolvía a la lámina de oro y por tanto lo atraía hacia él. Pero cuando ocurre el contacto, la lámina de oro adquiere la virtud eléctrica, y de esa manera quedaría rodeado de un vórtice propio. Los dos vórtices tratan de extenderse en sentido contrario, repeliendo uno al otro, y el vórtice del tubo siendo el más fuerte aleja a la lámina de oro. Diversas experiencias como la descrita llevaron a Du Fay a la hipótesis de la existencia de dos tipos de electricidad, "vítrea" y "resinosa"

Así mismo, Du Fay extiende la virtud eléctrica incluso a los cuerpos que no eran considerados como "eléctricos", ya que pueden adquirir cualquiera de las dos electricidades y sus efectos son similares a los de los cuerpos con los que han contactado. Por tanto, se empieza a extender la idea general de que todos los cuerpos pueden poseer el fluido eléctrico.

En una carta escrita a Collison el 11 de Julio de 1747, Benjamin Franklin (1706-1790) describe unos experimentos con un tubo de vidrio, y explica que la electricidad no se crea por el frotamiento del vidrio, sino solamente el fluido asociado a una electricidad positiva se transfiere al cristal desde el agente frotado, de tal modo que este agente pierde tanto como gana el vidrio, y la cantidad total de electricidad en cualquier sistema aislado es invariante. Esta conclusión es un

precedente del que posteriormente sería el principio de conservación de la carga eléctrica (Franklin, 1769).

De esta forma se comprende la asociación de los signos + y - al exceso y defecto de electricidad del cuerpo respectivamente. Franklin en el comienzo de sus experimentos no conocía los descubrimientos de Du Fay, pero sus conjeturas sobre el fluido eléctrico son similares a las de la electricidad vítrea (positiva) de Du Fay. La electricidad resinosa (negativa) de este autor sería en el modelo de Franklin, simplemente la deficiencia de una cantidad de electricidad vítrea que se suponía que poseían de forma natural todos los cuerpos ponderables. El modelo de Franklin tiene la ventaja de que no necesita suponer que la electricidad vítrea y resinosa se neutralizan en el estado natural de los cuerpos, tal y como se creía.

La principal diferencia entre la hipótesis del fluido único y la de los dos fluidos es que, en esta última, ambos fluidos se mueven junto a las partículas del conductor sólido; mientras en la teoría del fluido único, el fluido eléctrico es móvil, pero las partículas del conductor son fijas. La disputa, sin embargo, solamente podía ser zanjada por la determinación del movimiento real de electricidad en las descargas; y esto estaba más allá del alcance de los experimentos de la época.

Las aportaciones de Du Fay y Franklin, entre otros, venían a confirmar un modelo que describía a la electricidad como uno o dos fluidos eléctrico compuesto por partículas extremadamente sutiles. Partículas que penetraban en la materia común con tanta facilidad y libertad como para no notar ninguna resistencia perceptible. Así pues, el fenómeno eléctrico incluye dos tipos de materia: la común y la eléctrica. En el caso del modelo de 'un fluido eléctrico', las partículas de materia común se atraen entre sí y las de electricidad se repelen entre sí. Este modelo supone que los cuerpos electrizados poseen una atmósfera eléctrica a su alrededor. Cuando dos cuerpos electrizados con exceso de fluido se aproximan entre sí, sus atmósferas eléctricas chocan y se repelen entre sí.

La inducción eléctrica producida por un cuerpo cargado sobre las láminas de un electroscopio era explicada como que la atmósfera del cuerpo cargado repele el fluido eléctrico que ya posee el electroscopio (aunque el electroscopio está neutro ya que no tiene fluido en exceso) y hace que se desplace hacia las láminas acumulándose en ellas. Así las láminas tienen atmósferas eléctricas que se repelen entre sí.

Desgraciadamente, este modelo no explicaba porqué dos cuerpos con defecto de fluido (cargados negativamente) se repelen entre sí y tenía problemas para explicar algunos fenómenos de electrización por inducción. En este sentido, Franklin tuvo que considerar que si no existía el fluido eléctrico correspondiente a la carga positiva no había 'atmósfera eléctrica' y por tanto, suponía que los cuerpos cargados negativamente tenían un 'déficit de atmósfera eléctrica', que era la causante de la repulsión entre los cuerpos cargados negativamente.

2.3. Teoría newtoniana de la naturaleza eléctrica de la materia

Fue un seguidor de Franklin, F. Aepinus, quien desarrolló y modificó el modelo del 'fluido y atmósfera eléctricos' (Conant et al. 1962). Aepinus se interesó por los experimentos de J. Canton y B. Franklin sobre la carga por inducción y la botella de Leiden. Aepinus decidió que existía una similitud entre los fenómenos de inducción y la botella de Leiden. El tubo de vidrio frotado y el cuerpo neutro sobre el que se produce la inducción juegan el papel de dos armaduras y el aire reemplaza al vidrio de la botella. Aepinus utilizó dos láminas de metal separadas por aire, y consiguió una descarga tan potente como la obtenida en la botella de Leiden. Estos experimentos contradecían la interpretación de Franklin de que la electricidad se acumulaba en el vidrio de la botella. Aepinus observó que tanto el vidrio como el aire eran impermeables a la electricidad, lo que

le hace suponer que los no conductores son impermeables a la electricidad. Esto le lleva a establecer que el fluido eléctrico no existe más allá del cuerpo cargado.

Aunque Aepinus encontraba que el concepto de 'atmósfera eléctrica' no se sostenía por más tiempo, le costó tres años desarrollar su propia teoría. En 1759 publicó su libro, "Tentamen Theoria Electricitatis et Magnetismi" (Propuesta de una teoría de la Electricidad y el Magnetismo), en la cual se rechazaba la teoría de la atmósfera eléctrica. Su aproximación explicativa era claramente newtoniana. Él hablaba de fuerzas y aceptaba la repulsión eléctrica menos-menos como un hecho empírico. Aepinus explicaba los fenómenos de inducción asumiendo que las partículas del fluido eléctrico (considerado como positivo) pueden moverse en un conductor bajo la influencia de un cuerpo cargado. Las atracciones y repulsiones disminuyen con la distancia de acuerdo con una ley universal desconocida para él. Para explicar por qué un cuerpo cargado atrae a otro neutro (por ejemplo un trocito de papel de aluminio) él sugería que si el cuerpo estaba cargado positivamente, el fluido eléctrico en el papel se movía hacia la parte más lejana. Así, el extremo más lejano queda cargado 'positivamente' y el más cercano 'negativamente'. Entonces, el extremo más cercano es atraído hacia el cuerpo cargado y el más lejano repelido, pero como la fuerza depende de la distancia, la fuerza neta es de atracción hacia el cuerpo cargado. En contra de la explicación dada por otros científicos anteriores en términos de la 'atmósfera eléctrica', el fenómeno era explicado por Aepinus como una consecuencia natural de la acción a distancia, teniendo en cuenta la movilidad del fluido eléctrico en los conductores.

Profundizando en la teoría de la acción a distancia, Joseph Priestley (1733-1804) mostró que cuando un recipiente hueco metálico esférico es electrizado, no hay carga en su superficie interior y no hay "fuerza eléctrica" en el aire del interior del recipiente. Así mismo, llegó a la correcta conclusión de que este comportamiento era análogo a lo que ocurría en la ley de Gravitación universal y por tanto, que la fuerza eléctrica debía variar con la distancia existente entre las cargas. Conclusión que fue comunicada en 1775 y de la cual recogemos un pasaje de su razonamiento (Priestley, 1775):

"¿No puede inferirse de este experimento que la atracción eléctrica está sujeta a la misma ley de la gravitación, y está de acuerdo por tanto con el inverso del cuadrado de la distancia; ya que es fácilmente demostrable que si la tierra tuviera la forma de una concha hueca, un cuerpo en su interior no podría ser atraído a una cara más que a la otra?"

En 1785 aparece la primera memoria de Charles Agustin Coulomb (1736-1806) a la que seguirán otras hasta 1788. En ellas Coulomb relaciona por primera vez la "masa eléctrica" (es decir, la carga eléctrica) en valores absolutos con magnitudes mecánicas fundamentales, de forma que puede ser sometida a cálculos. Coulomb no aceptó la teoría del fluido único de Franklin y Aepinus, sino que prefirió una hipótesis rival que había sido propuesta por Robert Simmer en 1759, como un desarrollo de las ideas publicadas por Du Fay en 1733. Esta hipótesis establecía la existencia de dos fluidos eléctricos, de forma que cuando un cuerpo está cargado positivamente posee más parte de uno de los fluidos eléctricos y cuando está cargado negativamente tiene más cantidad del otro fluido.

Podemos ver en el siguiente párrafo de una de sus memorias como desarrolla Coulomb (1784) estas ideas y las relaciona con su ley:

"Cualquiera que sea la causa de la Electricidad, podemos explicar todos los fenómenos suponiendo que hay dos fluidos eléctricos, las partes del mismo fluido repeliéndose según el cuadrado del inverso de la distancia y atrayendo las partes del otro fluido de acuerdo con la misma ley del inverso del cuadrado".

Con la ley de Franklin de la conservación de la carga y la ley de Coulomb de la atracción de los cuerpos cargados, la electricidad fue elevada a la misma posición que la mecánica. Desde las aportaciones de Aepinus, el propósito de los científicos fue establecer la electricidad en base a la ley de acción a distancia, parecido a lo que había llevado al triunfo a la Mecánica Celeste. Cuando la ley fue establecida decisivamente por Coulomb, su simplicidad y belleza dio lugar a un sentimiento general de completa confianza en ella, como la mejor concepción realizable de los fenómenos electrostáticos. El resultado fue la atención casi exclusivamente enfocada en las teorías de acción a distancia hasta mucho después en que Faraday recondujo la teoría eléctrica hacia explicaciones más complejas y fructíferas basadas en la teoría de campo. Esta teoría recuerda la de la “atmósfera eléctrica” aunque desde presupuestos ontológicos y epistemológicos totalmente diferentes.

La teoría electrostática al terminar el siglo XVIII avanzó hacia un estado de medio desarrollo que podemos resumir de la siguiente manera:

1. Se aceptaba de forma general que los fenómenos eléctricos de atracción y repulsión entre cuerpos cargados eran debidos a uno o dos fluidos eléctricos (según la teoría de Franklin o de Simmer) que están contenidos en todos los cuerpos materiales. La aceptación de la naturaleza eléctrica de la materia dejó sin sentido la clasificación inicial de los cuerpos en ‘eléctrico’ y ‘no eléctricos’.
2. La interacción eléctrica se ejerce a distancia y de acuerdo con la ley de Coulomb del inverso del cuadrado de la distancia (análoga a la ley newtoniana que gobierna las interacciones gravitatorias). El desequilibrio de fluido(s) produce la carga eléctrica en los cuerpos.
3. Lo anterior implica una separación radical en el comportamiento de los cuerpos materiales que son clasificados en conductores que no parecen ejercer una influencia sobre el fluido eléctrico pero que permiten que se mueva libremente en su interior, y los aislantes que se oponen al paso del fluido eléctrico en su interior, de manera que pueden evitar que el fluido acumulado en los conductores se transfiera a otros cuerpos.

Esta última característica de la teoría explica las dificultades para interpretar los fenómenos de polarización de los dieléctricos que fueron posteriormente explicados más en profundidad con la teoría de campo eléctrico.

3. Resumen de la evolución de las explicaciones para interpretar los fenómenos electrostáticos básicos y perfiles conceptuales

Como acabamos de ver los modelos pre-newtoniano y newtoniano para interpretar los fenómenos electrostáticos básicos pueden considerarse de diferente estatus ontológico y epistemológico. Es decir pueden considerarse como dos perfiles conceptuales diferentes a la hora de resolver problemas científicos. Es necesario resaltar el carácter evolutivo en la formación de conceptos y teorías (Toulmin 1972). En este sentido, es necesario distinguir entre dos cuestiones diferentes, por un lado, la discontinuidad entre los modelos científicos (p.e. prenewtoniano y newtoniano) y por otro, la construcción evolutiva del saber donde hay coexistencia entre modelos y también modelos ‘mezcla’.

Así en el siglo XVII y comienzos del XVIII eran aceptados diversos modelos explicativos que tuvieron el mérito de establecer diferentes clasificaciones de los materiales de acuerdo con su comportamiento ante fenómenos eléctricos como la carga por frotamiento y la transferencia de carga. Así mismo, este perfil conceptual pre-newtoniano explicaba de forma satisfactoria estos fenómenos.

Sin embargo, las explicaciones del perfil pre-newtoniano eran fundamentalmente de carácter cualitativo y tenían dificultades para interpretar fenómenos de repulsión eléctrica y carga por inducción. Por tanto fueron necesarios los esfuerzos combinados de F. Aepinus, J. Priestley y A. Coulomb, entre otros, para explicar estos fenómenos dentro de un marco newtoniano de fuerzas eléctricas de “acción a distancia”. Este perfil newtoniano que se consolidó a finales del siglo XVIII explicaba los fenómenos eléctricos de la época y suponía una ruptura con las explicaciones de ‘efluvios eléctricos’ o ‘atmósfera eléctrica’ del perfil anterior.

A continuación hemos resumido en los cuadros 1 y 2 lo que podrían ser los dos perfiles conceptuales pre-newtoniano y newtoniano respectivamente para interpretar los fenómenos electrostáticos básicos.

Cuadro 1

Características generales del perfil conceptual pre-newtoniano

- ? Los materiales se dividen en “eléctricos” y “no eléctricos” según manifiesten la ‘propiedad eléctrica’ (electrizarse) al frotarlos. Estos materiales ‘eléctricos’ tienen un ‘fluido eléctrico’ en su interior que se manifiesta a su alrededor en forma de ‘halo’, ‘efluvio’ o ‘atmósfera eléctrica’ cuando se electrizan por frotamiento.
- ? Esta clasificación es superada al observarse que los metales (materiales ‘no eléctricos’) pueden electrizarse por frotamiento al aislarlos. A partir de aquí el perfil acepta que la electricidad es considerada como un fluido que poseen los cuerpos.
- ? Cuando se pone en contacto un cuerpo cargado mediante un hilo conductor con otro que no lo está, parte del ‘fluido eléctrico’ del cuerpo cargado pasa al otro cargándolo. Se centra así la atención en la clasificación de los materiales en ‘conductores’ y ‘aislantes’ según se transmita a través de ellos el ‘fluido eléctrico’ o no.
- ? La inducción eléctrica se explica a través de la atmósfera eléctrica del cuerpo cargado que ‘actúa’ sobre el cuerpo neutro.

Cuadro 2

Características generales del perfil conceptual newtoniano

- ? La electricidad es una propiedad general de la materia y está formada por partículas cargadas. Si se considera que las partículas cargadas de electricidad son positivas, el ‘exceso’ y la ‘falta’ de cantidad de carga en un cuerpo se expresa por los signos + y -. Así se habla de cuerpos cargados negativamente y positivamente, y se establece el criterio empírico de que cuerpos cargados con el mismo signo se repelen y de distinto signo se atraen.

- ? La electricidad puede moverse a través de un conductor, de forma que un cuerpo ya cargado puede cargar otro por contacto.
- ? La carga por frotamiento se debe a que existe un intercambio de cargas entre los cuerpos frotados produciéndose un 'exceso' de cargas en un cuerpo y un 'defecto' de cargas en el otro, no variando la cantidad total de carga implicada.
- ? La acción eléctrica se realiza a distancia y de acuerdo con la ley de Coulomb. Esta ley permite definir de forma cuantitativa el concepto de carga eléctrica. Se explican los fenómenos de inducción eléctrica mediante la acción a distancia entre las cargas.

4. Qué dificultades muestran los estudiantes en la interpretación de fenómenos electrostáticos básicos?

La revisión histórica realizada hasta aquí nos ha permitido observar la existencia de problemas y dificultades que tuvo que afrontar la comunidad científica y cuya resolución permitió ir construyendo la teoría eléctrica. En este sentido, se puede asumir a título de hipótesis que estas dificultades ontológicas y epistemológicas podrían constituir dificultades de aprendizaje en Electroestática a estudiantes de Secundaria y de Universidad. Así pues, encontramos razonable suponer que si presentamos a los estudiantes algunos de estos problemas históricos, el análisis de sus explicaciones permitirá establecer cómo interpretan los estudiantes estos hechos y averiguar no sólo si aparecen dificultades de aprendizaje sino también comparar en qué medida su pensamiento se aproxima a los perfiles conceptuales históricos definidos. En general se acepta como hipótesis que los estudiantes de Secundaria y de Universidad tendrán serias dificultades para aplicar el perfil newtoniano en la interpretación de alguno de estos problemas y en concreto, ante fenómenos de inducción eléctrica y polarización de la materia.

5. Diseño experimental.

Para estudiar las dificultades de aprendizaje de los estudiantes hemos recogido algunos de los fenómenos "naturales" (fenómenos de electrización por frotamiento y fenómenos de inducción) cuyas interpretaciones supusieron verdaderos desafíos en la construcción de la Electricidad como ciencia y cuya superación hizo que se llegara a aceptar la naturaleza eléctrica de la materia y el concepto de carga. Estos hechos empíricos son ampliamente conocidos por los estudiantes al ser impartidos en cualquier curso de introducción a la Electricidad. Así pues, estos fenómenos "naturales" o pruebas empíricas han sido incluidos en forma de items en la confección de un cuestionario para que sean respondidos por los estudiantes.

En un trabajo anterior (Guisasola y Furió 1994) se analizaron las explicaciones que daban estudiantes de 15 años aún no iniciados en el estudio formal de la electricidad, sobre estos fenómenos de electrización por frotamiento y fenómenos de atracción, repulsión y electrización por inducción. Allí se constató en una muestra pequeña (30 alumnos) que las interpretaciones de los estudiantes sobre la causalidad de estos fenómenos presentaban una baja coherencia global, pero mayoritariamente se expresaban ideas sobre la naturaleza eléctrica de la materia basadas en un modelo de fluido eléctrico. Este modelo considera a la electricidad como un fluido compuesto de partículas cargadas que se mueve a través de la materia con mayor o menor facilidad dependiendo de la naturaleza de la misma, y las interacciones eléctricas se producen por contacto no explicándose la inducción eléctrica. Este modelo explicativo puede situarse dentro del perfil

conceptual pre-newtoniano definido en el cuadro I. Sin embargo, es preciso resaltar que las explicaciones de los estudiantes ofrecen matices diferentes debido a que el contexto cultural es distinto y el paralelismo con el desarrollo histórico no se da de una manera mecánica.

Después de una revisión de los primeros resultados obtenidos en el estudio limitado que hemos mencionado, en el trabajo que aquí presentamos hemos realizado una investigación más sistemática orientada hacia estudiantes de último curso de secundaria (17-18 años) y estudiantes de universidad (1 y 3 curso de Ciencias Físicas). En el diseño elaborado se han incluido como instrumentos entrevistas individuales y un cuestionario. La segunda prueba, el cuestionario, consta de 5 preguntas de tipo abierto con énfasis en las explicaciones, para analizar cómo interpretan diferentes fenómenos electrostáticos. El cuestionario se ha pasado a un total de 306 alumnos distribuidos en cuatro grupos (Tabla 1).

Muestra	Número	Edad	Nivel
G1	61	17	3° de BUP
G2	60	18	C.O.U.
G3	60	19	1° de Físicas
G4	64	21	3° de Físicas

Tabla 1. *Datos de la muestra utilizada*

Los estudiantes de Secundaria fueron elegidos de forma aleatoria en centros privados de reconocido prestigio. Los profesores de estos centros son considerados buenos profesionales y utilizan un método de enseñanza habitual basado fundamentalmente por la transmisión verbal de los conocimientos. Así mismo, los estudiantes de los grupos G1 y G2 son alumnos que ha optado por la asignatura de Física de manera libre igual que los de Universidad. En el caso de los estudiantes de Universidad, en el primer curso se eligió de forma aleatoria una de las dos clases que componen el total del curso en una Universidad Española, mientras que para el grupo G4 la muestra está constituida por todos los estudiantes de 3° curso.

La primera prueba ha consistido en entrevistar ante varios fenómenos triboeléctricos a un total de 28 estudiantes. Esta muestra está compuesta de 7 estudiantes de cada uno de los cursos, que fueron elegidos de forma aleatoria después de que se impartiera el programa de Electroestática. Las entrevistas ante fenómeno (White y Gunstone 1992) tienen como objetivo ver cómo explican los estudiantes cuatro experiencias de triboelectrización e inducción sencillas (Ferreira 1987), y contrastar si estas explicaciones se aproximan o no a la teoría de la naturaleza eléctrica de la materia actualmente aceptada. También se analiza si aparecen similitudes entre las ideas explicativas de los estudiantes y las diferentes teorías de la electricidad surgidas a lo largo de la Historia de la electricidad. Las entrevistas han tenido una duración media de 30 minutos y han sido grabadas en cinta magnetofónica para su posterior transcripción y análisis. La estructura de la entrevista consta de tres partes, en primer lugar se pregunta al entrevistado antes de realizar la experiencia, sobre lo que piensa que sucederá, estimulándole a que emita una conjetura lo mas fundamentada posible. En segundo lugar, se realiza la experiencia o se ve un vídeo de la misma y el entrevistado observa lo que sucede. Por último, el entrevistado explica lo ocurrido confirmando la hipótesis emitida o bien trata de dar una nueva explicación.

El cuestionario fue pasado por el mismo investigador a todos los grupos cuando los estudiantes acababan de terminar los temas de electrostática y corriente continua correspondientes a sus respectivos programas. En el caso de los estudiantes del grupo G4, se realizó la encuesta después de realizar el examen cuatrimestral de la asignatura de electromagnetismo. Los alumnos cumplimentaron el cuestionario en situación de examen (sin poderse comunicar entre ellos) durante una clase cuya duración era de 55 minutos. Es de reseñar que, en general, los estudiantes (incluso

los de los niveles más bajos) no tuvieron ninguna dificultad de comprensión respecto al enunciado de las preguntas.

6. Resultados obtenidos y discusión

Para facilitar la presentación y discusión de los resultados obtenidos se expondrán en diferentes apartados y se incluirán resultados tanto cualitativos extraídos de las entrevistas que ilustran las interpretaciones realizadas, como cuantitativos a partir de los cuestionarios.

6.1. Explicaciones de los estudiantes sobre algunos fenómenos de electrización por frotamiento.

Los dos primeros hechos experimentales que se presentan en las entrevistas se refieren a la carga por frotamiento de una pajita de plástico y a la no electrización de una barra metálica al ser frotada. Para la realización de la entrevista se ha seguido la secuencia de Predicción-Observación-Explicación indicada en el apartado 5. El análisis de las entrevistas estructuradas nos permite clasificar las respuestas en dos categorías. La categoría A, denominada "eléctricos", que incluye los estudiantes que aceptan la existencia de cargas en la materia y, la categoría B, denominada "creacionistas", que explican que la carga se crea en el momento que se frota o se hace trabajo sobre el cuerpo. Esta última categoría sería similar a la de los modelos sobre la electricidad anteriores al siglo XVIII incluidos en el perfil pre-newtoniano, como se puede comprobar en los ejemplos siguientes:

1. Ejemplo de explicación clasificada en la categoría "creacionista" (Nuria, grupo G0)

Entrevistador (E): ¿Cómo crees que se ha cargado la pajita de plástico frotado?

Alumna (A): Bueno, antes no hay cargas pero como el rozamiento crea calor, pues debido al calor aparecen cargas en la pajita. Pero no sé de que signo serán.

E : ¿antes de frotar la pajita de plástico tenía cargas?

A : no, antes el cuerpo está descargado, es debido al rozamiento que aparecen las cargas.

2. Ejemplo de explicación clasificada en la categoría de "eléctricos" (Alberto, grupo G1)

Entrevistador: al frotar la pajita ¿Cómo se ha cargado?

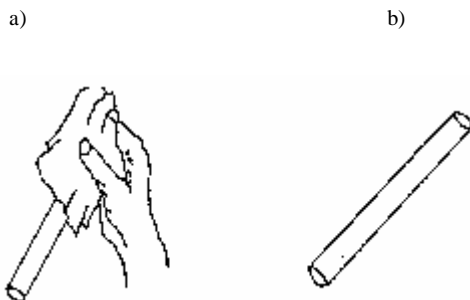
Alumno : antes de frotar tiene el mismo número de cargas positivas y negativas, pero después se descompensan debido al frotamiento. Es decir, la pajita queda cargada.

Más explícito es otro de los estudiantes del mismo nivel cuando argumenta :

Alumno : Si no está cargada la pajita es que ni sobran ni faltan cargas positivas y negativas. Al frotar perdería electrones y se queda cargada.

A partir de las dos categorías de respuesta establecidas de forma general en las entrevistas se han analizado las explicaciones de los estudiantes a los items 1 y 2 del cuestionario que coinciden con los fenómenos mencionados.

Item 1_ Se frota con un paño de lana una barra de plástico, quedando la barra electrizada. Explica esta electrización y dibuja (en la figura b) cómo te imaginas que estaría distribuida la carga en la barra electrizada.

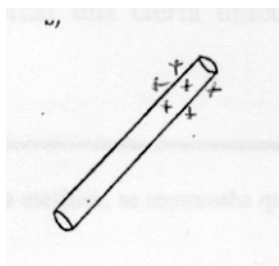


Categoría de respuesta para el ítem 1	Porcentaje de respuesta (%)			
	G1 N=61	G2 N=60	G3 N=60	G4 N=64
'Eléctricos' (A)*	60	66	77	77
'Intercambio de cargas' (A.1)	36	42	52	57
'Separación de cargas' (A.2)	24	24	25	20
'Creacionistas' B	10	13	6	8
Incodificables	18	-	7	-
No contesta	12	21	10	15

* Respuesta correcta.

Tabla 2. Porcentaje de respuestas obtenidas en las explicaciones de la electrización de una barra de plástico por frotamiento.

Las explicaciones de los estudiantes sobre la electrización por frotamiento de una barra de plástico que se presenta en el ítem 1, son convergentes con las dos categorías de respuesta que se han establecido en las entrevistas. De acuerdo con los resultados (ver tabla 2), se puede decir que los estudiantes asumen mayoritariamente (entre un 50% y un 77%) que la materia antes de frotar es eléctrica, aunque un porcentaje pequeño de respuestas incorrectas se mantiene a lo largo de la instrucción y persiste en los cursos universitarios (6% en 1º curso y 8% en 3º curso). Dentro de la categoría A ("eléctricos") se detectan dos tipos de explicaciones, la primera de ellas (A.1, correcta) indica que se produce un intercambio de cargas entre los cuerpos frotados. Un ejemplo de los dibujos realizados en el apartado b) dentro de esta categoría sería:



En la segunda (A.2) se explica que la electrización es debida a que en la barra de plástico se produce una separación local de las cargas positivas y negativas. En nuestra opinión, la posible causa del error cometido en esta segunda explicación puede estar en que reducen el sistema físico a la barra frotada sin tener en cuenta al objeto con el que se frota y de ahí que sólo piensen en la separación de las cargas positivas y negativas del plástico. Es preocupante que esta explicación se mantenga a lo largo de la instrucción en torno al 25% del total de las respuestas y manifiesta una cierta dificultad a la hora de aceptar la naturaleza eléctrica de la materia. Un ejemplo de los dibujos realizados en el apartado b) dentro de esta categoría sería:



Item 2_ Al frotar con un paño de lana una barra metálica, se comprueba que ésta no queda electrizada. ¿Cómo se explica que no se electrice la barra?.

Categoría de respuesta para el ítem 2	Porcentaje de respuestas (%)			
	G1 N=61	G2 N=60	G3 N=60	G4 N=64
‘Trasvase de cargas’ (A)*	23	23	23	21
‘No hay trasvase de cargas’ (B)	47	49	56	47
‘Debido al metal’ B.1	31	43	38	44
‘Debido al paño’ B.2	-	6	12	-
‘Frotar más’ B.3	16	-	6	3
Incodificables	19	15	10	11
No contesta	11	13	11	21

* Respuesta correcta

Tabla 3. Porcentaje de respuestas obtenidas al explicar la no electrización de una barra frotada.

En cuanto a las explicaciones de los estudiantes respecto a la no electrización por frotamiento de una barra metálica, que se presenta en el ítem 2, se pueden clasificar en dos grandes categorías (ver tabla 3). En la categoría (A) los estudiantes argumentan de forma correcta que aunque se produce un trasvase, al ser el metal un buen conductor las cargas se desplazan a través de la barra hacia lo que la sostiene sin que ésta se electrice. En la valoración de las respuestas se han considerado también como correctas aquellas que razonando como se ha indicado antes hablaban de "separación de cargas". Sin embargo una mayoría no tiene en cuenta el carácter conductor de la barra y argumenta (categoría B) que no se produce el trasvase o separación de cargas por diferentes razones como las características de la barra que impedirían su electrización (categoría B.1., mayoritaria), las características del paño con que se frota (categoría B.2.) o porque no se frota suficiente (categoría B.3.).

Las respuestas correspondientes a la categoría B.3 se ubicarían dentro de las explicaciones que hemos llamado en el ítem 1 "creacionistas" y su porcentaje es similar al que aparecía entonces, manteniéndose la equivalencia de los porcentajes y la coherencia de estas respuestas. Podemos ver un ejemplo de la coincidencia de este tipo de respuestas en dos pasajes de la entrevista realizada a Eduardo (grupo G2):

Entrevistador (E): ¿Cómo crees que se ha cargado la pajita de plástico frotado?
Alumno (A): Al frotar se da calor a la pajita de plástico y entonces aparecen las cargas, creo que son negativas porque son electrones.
E : ¿antes de frotar la pajita de plástico tenía cargas?
A : no, es el rozamiento al dar energía el que carga la pajita.
E: Es decir, ¿antes no hay cargas y después de frotar aparecen las cargas en la pajita ?
A: sí, de acuerdo.

Entrevistador (E): ¿Por qué crees que no se ha cargado la barra metálica?
Alumno (A): No sé, puede que no hayamos frotado suficiente. Sí, para que aparezcan las cargas es necesario dar una cantidad mínima de calor. Habrá que frotar más fuerte.

Las dificultades de los estudiantes en el ítem 2 aumentan respecto a la del anterior, ya que para contestar correctamente se necesitan argumentos que se articulen en dos etapas dentro de un marco newtoniano: a) admitir el intercambio o separación de cargas; b) tener en cuenta que al no estar la barra de metal aislada (aunque no se indica a propósito en el enunciado del ítem) se produce una conducción de cargas. Los bajos resultados obtenidos (alrededor de un 22% en estudiantes universitarios) puede explicarse más en base a la utilización de un *causalismo simple* (dificultad metodológica) que por obstáculos epistemológicos. Esta forma de razonamiento es característica de la metodología de sentido común (Gil y Carrascosa 1985) en la cual, se buscan argumentos simples, directos y rápidos que expliquen el fenómeno. Veamos a continuación un ejemplo de esta forma de razonar:

“La barra de metal no se electriza debido a que no hay trasvase de cargas. Para que un cuerpo se electrice es necesario que se cargue y en este caso no hay paso de cargas a la barra.....No hay paso de cargas porque las características de la barra de metal lo impiden”(alumno de G2)

El estudiante simplifica acriticamente la situación y la reduce a una sola causa (no hay paso de cargas) que produce el efecto de ‘no electrizar la barra de metal’. Para justificar que ‘no hay paso de cargas’ vuelve a elegir una sola variable de las que intervienen en el problema ‘la naturaleza metálica de la barra’. Es decir, el estudiante realiza un razonamiento lineal causal (Viennot 1992) que va disminuyendo la complejidad del problema a base de construir implicaciones simples del tipo ‘una causa produce un efecto’ (sin ramificaciones en la secuenciación) que avanza secuencialmente hasta la solución final. La búsqueda de coherencia puntual es típica del

pensamiento ordinario a diferencia del pensamiento científico más riguroso, cuyos razonamientos buscan la validación de las respuestas viendo si son coherentes globalmente con el cuerpo teórico.

Item 3 _ Con un bolígrafo cargado se toca una bolita metálica. Al cabo de unos instantes se observa que el bolígrafo y la bolita se repelen . Explica cómo puede producirse esta repulsión.

En este ítem, que sólo se presentó en la encuesta, la gran mayoría de los estudiantes de cada una de las muestras (alrededor de un 80%) explica de forma correcta el fenómeno de electrización por contacto presentado en el ítem 3. Esto puede ser debido a que la respuesta correcta puede ser fácilmente explicada en base a un perfil tanto pre-newtoniano como newtoniano, donde al pasar carga de la barra a la bolita, ésta queda cargada con el mismo signo y, por tanto, se repelen.

6.2. Las dificultades en la interpretación de fenómenos de inducción y polarización como síntoma de la persistencia en los estudiantes del modelo de fluido eléctrico.

El tercer hecho experimental presentado en las entrevista consistía en un péndulo electrostático formado por una bolita de papel de aluminio y una pajita cargado por frotamiento. Los estudiantes debían predecir, en primer lugar, qué sucedería al acercar la pajita frotada al péndulo electrostático y después realizar la experiencia. Una vez visto lo que sucedía debían reafirmarse en su explicación inicial o buscar otra diferente. El análisis de las respuestas nos permite realizar una primera clasificación de las mismas en tres categorías. La categoría de respuesta A agrupa a aquellas respuestas que explican correctamente este fenómeno.

Ejemplo de explicación clasificada en la categoría A. (Doris G3)

Entrevistador : ¿Por qué crees que le atrae la pajita frotada a la esferita de aluminio?

Alumna :La pajita podría inducir, o sea, la pajita podría inducir un movimiento de cargas en la esferita de aluminio del péndulo, entonces, las cargas se podría mover...podría haber una carga neta relativa.

E :¿Y entonces cómo se daría la atracción?.

A : Pues podría ocurrir, si las cargas de un signo están en un lado y las de otro signo en otro, unas están más cerca, por lo tanto, esas cargas, al estar las de distinto signo más próximas las fuerzas son mayores, entonces vence la atracción.

La categoría B es una primera concepción alternativa similar al perfil pre-newtoniano, donde se habla implícitamente del efecto "halo" o "atmósfera eléctrica" producido por los cuerpos cargados para explicar la atracción que ejercen sobre cuerpos ligeros situados en su proximidad. Podemos ver un ejemplo de este tipo de explicaciones en un pasaje de las entrevistas realizadas (Nuria, grupo G0):

Entrevistador : ¿Por qué atrae la pajita a la esferita de aluminio?

Alumno : La pajita está cargada, ya no tiene el mismo número de electrones que de protones. La esferita de aluminio detector no está cargado. Entonces la pajita atraerá a cuerpos metálicos pequeños.

E : Si utilizásemos un trocito de papel también pasaría lo mismo, recuerda el caso del bolígrafo frotado y los pedacitos de papel que habéis hecho en clase.

A : La pajita atraerá a cualquier cuerpo pequeño de alrededor, aunque a unos más que a otros.

La categoría C representa un segundo modelo alternativo donde se justifica la atracción de los cuerpos cargados en base a la existencia de cuerpos cargados de signo opuesto. Sin embargo, no tienen en cuenta en las explicaciones la acción a distancia (Coulomb), considerando que el fluido eléctrico está en el cuerpo cargado y que de alguna forma también tiene que estar en los trozos de papel. Veamos un ejemplo de este tipo de ideas explicativas (Joseba, grupo G3):

Alumno : La atracción siempre se produce por cargas de diferente signo pero, como me has indicado, aquí la esferita de aluminio no tiene carga. Francamente no sé, no sé, lo he experimentado miles de veces, además es la típica explicación que te dan siempre.

Entrevistador : ¿Y qué explicación te dan?

A : El que uno tiene carga de un signo y el otro de distinto y se atraen.

E : Pero ya hemos tocado la esferita de aluminio y comprobado que está sin carga.

A : Sí. Tal vez sea que el papel de aluminio se carga de alguna forma, y luego se produce la atracción.

Veamos las respuesta al ítem 4 de la encuesta que es similar al fenómeno presentado

Ítem 4 _ Un bolígrafo frotado es capaz de atraer a un trocito de papel próximo a él. Explica cómo se produce esta interacción.

Categoría de respuesta para el ítem 4	Porcentaje de respuesta (%)			
	G1 N=61	G2 N=60	G3 N=60	G4 N=64
‘Acción a distancia. Coulomb’ (A.1)*	13	27	30	31
‘Teoría de campo’ (A.2)*	-	-	3	5
‘Pre-newtoniana’	67	60	48	36
‘atmósfera eléctrica’ B	38	38	23	17
‘Fluido eléctrico’ C	29	22	25	19
Incodificables	13	-	-	-
No contesta	7	13	19	28

* Respuesta correcta

Tabla 4. Porcentaje de respuestas obtenidas al explicar la atracción de trocitos de papel por un cuerpo cargado.

Quando los estudiantes tratan de analizar fenómenos de inducción o de influencia local como el que se presenta en el ítem 4, se constata cómo vuelve a elevarse el nivel de dificultad de la pregunta pues solamente contestan correctamente el 36% en el grupo de 3° de Físicas. También se constata una diversificación de los argumentos, algunos de los cuales recuerdan interpretaciones anteriores a las del perfil coulombiano como se puede ver en la tabla 4.

En efecto, la categoría de respuesta A que explica correctamente este fenómeno se ha subdividido en dos, según se haga basándose en el modelo coulombiano de acción a distancia (A1) o en la idea de campo (A2). Puede comprobarse cómo este último tipo de explicaciones es minoritario inclusive en el nivel más elevado (un 5% en 3° de Físicas).

La explicación correcta del fenómeno de acuerdo con el perfil newtoniano-coulombiano va aumentando lentamente con la instrucción, aunque una de las explicaciones (utilización del modelo de campo eléctrico) obtiene porcentajes muy pequeños. En nuestra opinión, el porcentaje de respuestas correctas es muy bajo (sobre el 20% en secundaria y el 30% en estudiantes universitarios de ciencias físicas) teniendo en cuenta que el fenómeno de inducción está contemplado en todos los programas de electrostática desde secundaria. Así mismo, queremos subrayar que la incidencia de la instrucción es mínima, siendo particularmente reseñable la baja utilización del modelo de campo eléctrico en alumnos con varios años de instrucción en la materia.

El último fenómeno presentado trata de la atracción de una bolita de poliuretano por una barra de madera que se polariza debido a la presencia de una hoja de plástico cargada (ver ítem 5). En este caso el estudiante después de emitir sus hipótesis sobre la posible atracción o no, observa lo que sucede a través de un vídeo. Las explicaciones de los estudiantes se han clasificado en dos categorías. La categoría A de respuesta se basa en un modelo coulombiano (inducción eléctrica y transmisión de su efecto) o en un modelo de campo (la acción eléctrica se propaga polarizando el dieléctrico constituido por la barra de madera). La categoría B se basa en un pensamiento espontáneo del alumno que consiste en indicar que solamente es posible la atracción si la carga se puede transmitir por la barra de madera y, al ser ésta aislante, no será posible atraer a la bolita. Esta respuesta es ampliamente mayoritaria, manteniéndose a lo largo de los cursos, y se puede considerar como una representación mental de fluido eléctrico. A continuación se exponen algunos ejemplos de cada categoría:

1. *Ejemplo de explicación clasificada en la categoría A ‘acción a distancia’ (Josune, grupo G4)*

Entrevistador (E): ¿Qué crees que le pasará a la bolita de poliuretano?

Alumna (A): Bueno, creo que nada ya que se encuentra muy alejada de la hoja de plástico cargada. Además lo que hay en medio es madera, que es un aislante.

E : Ya has visto en el video que existe atracción. ¿Puedes explicar el fenómeno?

A : Bueno, no sé. Espera...., bueno creo que la madera es influida por la hoja de plástico cargada. Si, creo que se polariza la barra de madera y aparecerán cargas en los extremos. Así el extremo de la barra que está próximo a la bolita le atrae por inducción.

2. *Ejemplo de explicación clasificada en la categoría B (Javier, grupo G3)*

Entrevistador (E): ¿Qué crees que le pasará a la bolita de poliuretano?

Alumno : No le pasará nada ya que la barra de madera es aislante y no conduce la electricidad.

E : Ya has visto en el video que existe atracción. ¿Puedes explicar el fenómeno?

A: No sé, es extraño. La barra de madera no deja pasar las cargas del plástico. No sé, quizás la fuerza eléctrica de la hoja es muy fuerte y puede atravesar la madera. No sé.

Item 5_ Se aproxima una hoja de plástico cargada al extremo de una barra larga de madera sin tocarla, como se ve en la figura. En el otro extremo de la barra hay una bolita de poliuretano. Explica si será atraída o no la bolita.

Si No No lo sé

Porcentaje de respuestas (%)				
Categoría de respuesta para el item 5	G1 N=61	G2 N=60	G3 N=60	G4 N=64
'Existe atracción' A*	10	4	27	20
'Acción a distancia' A.1	8	2	19	14
'Teoría de campo' A.2	2	2	8	6
'No se ejerce influencia' B	74	90	52	66
'La madera no conduce' B.1	67	70	44	53
No lo sé	16	6	21	14

Tabla 5. Porcentaje de respuestas obtenidas al explicar la atracción de la bolita de poliuretano.

En la interpretación si hay o no fuerzas sobre la bolita del péndulo presentada en el item 5 es necesario tener en cuenta la polarización del medio (la barra de madera). Esto aumenta el nivel de dificultad respecto del fenómeno de inducción que se ha analizado en el item anterior y por tanto el porcentaje de respuestas correctas es mucho más bajo (tabla 5).

Aunque hay un salto cualitativo de aproximadamente un 15% en el porcentaje de respuestas correctas entre la enseñanza media (G1 y G2) y universitaria (G3 y G4), sólo una cuarta parte de los estudiantes universitarios interpreta correctamente el fenómeno. En nuestra opinión, muchas de las dificultades de la mayoría de los estudiantes no son solamente de tipo conceptual sino también procedimental o estratégico. En este caso particular la fijación funcional de una representación mental aprendida como la de la clasificación de los materiales en conductores y aislantes, es la que impide ver formas alternativas de explicación. Esta es una de las dificultades mencionadas por la psicología cognitiva en la resolución de problemas ordinarios (Anderson 1990).

Conclusiones

Los resultados obtenidos parecen indicar que la mayoría de los estudiantes asumen la naturaleza eléctrica de la materia dentro de un perfil newtoniano (ítem 1) de acuerdo con la instrucción recibida en el aula, aunque existe un porcentaje minoritario y constante a lo largo de la instrucción que aboga por la "creación de cargas" en los fenómenos de carga por frotamiento. No obstante, si nos fijamos en las explicaciones dadas por los estudiantes a los otros fenómenos electrostáticos (ítem 2,4 y 5) la mayoría de las interpretaciones presentan ideas sobre la naturaleza eléctrica de la materia basadas en un modelo de fluido eléctrico que presenta alguna de las características del perfil pre-newtoniano.

Si el estudiante acepta la existencia de carga en la materia y tiene una representación de fluido eléctrico, es fácil que interprete el fenómeno de electrización por contacto (ítem 3) mediante un modelo de trasvase de fluido. Esto explicaría que el número de respuestas correctas sea muy elevado en comparación con los demás. Sin embargo, surgen dificultades a la hora de interpretar fenómenos de no electrización de un metal por frotamiento (ítem 2) y fenómenos de inducción en un cuerpo ligero (ítem 4) ya que la presencia de aire (aislante) impide el trasvase de fluido y la mayoría de las respuestas no aplican el modelo newtoniano de acción a distancia para explicar el fenómeno. Asimismo, el perfil pre-newtoniano de fluido eléctrico es claramente insuficiente para interpretar aquellas situaciones donde la explicación requiera considerar el papel desempeñado por el medio (ítem 5) ya que no tienen en cuenta su polarización debida a la acción a distancia del cuerpo cargado.

De acuerdo con lo anterior, parece que muchos estudiantes manejan un modelo interpretativo que utiliza el perfil newtoniano en las situaciones de mayor familiarización académica (ítem 1), pero que a medida que la dificultad conceptual y procedimental de los ítems aumenta los estudiantes vuelven a un perfil pre-newtoniano más 'intuitivo' de carga como fluido, que tiene un status muy alto entre la población estudiantil. Es necesario resaltar que este modelo alternativo de los estudiantes que considera a la electricidad como un fluido y que no aplica la teoría de acción a distancia del perfil newtoniano para explicar determinados fenómenos eléctricos es coincidente con los resultados de otras investigaciones que tratan sobre las explicaciones dadas por los estudiantes al movimiento de las cargas entre dos esferas cargadas (Guruswamy et al. 1997) o las dificultades que tienen con el concepto de acción a distancia (Bar et al. 1997).

Así mismo, los resultados parecen confirmar que existe cierta similitud entre los problemas históricos del modelo pre-newtoniano de fluido eléctrico a la hora de explicar algunos fenómenos eléctricos y las dificultades de aprendizaje de los estudiantes. No obstante y como también indica la investigación sobre concepciones alternativa (Wandersee et al. 1994), las preconcepciones de los estudiantes pueden interaccionar con el conocimiento científico que trata de enseñar el profesor en clase, y pueden resultar adaptaciones imprevistas que se traducen en modelos de explicación *sui generis* que obviamente no se han constatado en el desarrollo histórico (por ejemplo la categoría A.2 del ítem 1 relativa a la separación local de cargas en el objeto frotado). Así mismo, los

estudiantes cuando explican los fenómenos de inducción eléctrica no utilizan los términos de 'halo' o 'atmósfera eléctrica' ni la coherencia explicativa de los modelos pre-newtonianos pero el sentido de sus explicaciones (ver ítem 4) presentan las mismas características. Por otra parte, se ha constatado que las dificultades conceptuales indicadas anteriormente van acompañadas de dificultades procedimentales (razonamientos de "sentido común", causalidad simple, fijación funcional) dado que no se ha familiarizado a los estudiantes con aspectos esenciales de la metodología científica.

Si a las dificultades conceptuales y metodológicas señaladas añadimos los efectos de una enseñanza basada en una visión acumulativa lineal de la Electroestática, caracterizada por una exposición aproblemática de los conceptos del cuerpo teórico actual sin tener en cuenta los saltos cualitativos y las crisis que tuvieron lugar en el desarrollo de la teoría eléctrica (Guisasola 1997) pueden explicar las dificultades que tienen los estudiantes en estas teorías. Todo ello nos lleva a afirmar que los fenómenos electrostáticos básicos no presentan explicaciones "naturales" ni sencillas de dar y que, en contra de la opinión general del profesorado (Furió y Guisasola, 1997), no constituyen fenómenos elementales que se pueden impartir de forma rápida sin detenerse a analizarlos de acuerdo con una teoría que como hemos visto costó el esfuerzo combinado de prestigiosos científicos durante dos siglos. Así pues, será necesario idear estrategias de enseñanza (Gil et al. 1991) que puedan facilitar un cambio conceptual, epistemológico y metodológico.

Bibliografía

- ANDERSON, J.R., 1990, *Cognitive Psychology and its implications* . (W.H. Freeman and company. New York).
- BACHELARD, G., 1968, *The philosophy of no* (The Orion Press: New York).
- BAR, V., ZINN, B. & RUBIN, E., 1997, Children' ideas about action at a distance, *International Journal of Science Education* 19 (10), 1137-1157.
- BENSHEGIR A. & CLOSSET J.L., 1996, The electrostatics-electrokinetics transition. Historical and educational difficulties, *International Journal of Science Education*, 18 (2), 179-191.
- CARRASCOSA, J. y GIL, D., 1992, Concepciones alternativas en mecánica, *Enseñanza de las Ciencias* 10 (3), 314-328.
- CARAVITA, S. & HALLDEN, O., 1994, Reframing and modeling the processes of conceptual change, *Learning and Instruction* 4, 89-111.
- CONANT J.B., NASH L.K., ROLLER D. & ROLLER D.H.D., 1962, The development of the concept of electric charge, *Harvard Case Histories in Experimental Science*. Edited by James Bryant Conant. Harvard University Press. Cambridge. Massachusetts.
- COULOMB, CH.A. (1884), *Collection de Memoires relatifs a la Physique*. Societé Français de Physique vol. I. Paris.
- CHABAY, R. & SHERWOOD, B. 1995. *Electric & Magnetic interactions* . John Wiley & sons, Inc. New York.
- CHI, M.T.H., SLOTTA, D.J. & DE LEEUW, N, 1994, From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts, *Learning and Instruction*, 4, 27-44.

- DRIVER, R., 1989, Students' conceptions and the learning of science, *International Journal in Science Education* 11 (5), 481-490.
- DUIT, R., 1993, Research on student's conceptions-developments and trends. Paper presented at the "Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics". Cornell. Ithaca.
- DUSCHL, R.A., 1994, Research on the history and philosophy of science, in D.L. Gabel (eds.) *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (pp. 443-465)
- EYLON B. & GANIEL U., 1990, Macro-micro relationships: the missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning, *International Journal Science Education*, vol 12, nº 1, 79-94.
- FERREIRA, N., 1987, Activités en électrostatique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, nº 713 pp. 477-490.
- FRANKLIN, B. (1769). *Experiment and observations on Electricity*. David Henry. London.
- FURIO C. y GUIASOLA J., 1993, ¿Puede ayudar la Historia de la Ciencia a entender por qué los estudiantes no comprenden los conceptos de carga y potencial eléctricos?, *Revista Española de Física*, vol 7, nº3, 46-50.
- FURIO, C. y GUIASOLA, J., 1997, Deficiencias epistemológicas en la enseñanza habitual de los conceptos de campo y potencial eléctrico, *Enseñanza de la Ciencias*, 15 (2), 259-271.
- FURIÓ, C. & GUIASOLA, J., 1998, Difficulties on learning the concept of electric field, *Science Education* 82 (4), 511-526.
- GAGLIARDI R., 1988, Cómo utilizar la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3), 291-296.
- GENTNER, D y STEVENS, A.L. (Eds.) 1983. *Mental models*. Hillsdale, N.J.: LEA.
- GIANNETTO, E., TARSITANI, C. & VICENTINI, M., 1992, The relations between Epistemology, History of Science and Science Teaching from the point of view of the Research on Mental Representations, in Skip Hills (ed.), *History & Philosophy of Science Education*, Queen's Univ., Kingston, 359-374.
- GIL, D. & CARRASCOSA, J. 1985, Science learning as a conceptual and methodological change, *European Journal of Science Education* 5, 70-81
- GIL D., CARRASCOSA J., FURIO C. y MARTINEZ-TORREGROSA J., 1991, *La enseñanza de las Ciencias en la educación secundaria*. ICE de la Universidad de Barcelona-HORSORI. Barcelona
- GUIASOLA, J., 1997, El trabajo científico y las tareas en electrostática en textos de Bachillerato, *Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales* 11, 45-54.
- GUIASOLA, J. y FURIO, C., 1994, Dificultades en el aprendizaje significativo de algunos conceptos de electrostática, *Investigación en la Escuela*, 23, 103-114.

- GURUSWAMY, CH., SOMERS, M.D. & HUSSEY, R.G., 1997, Students' understanding of the transfer of charge between conductors, *Physics Education* 32 (2), 91-96.
- HEILBRON, J.L., 1979, *Electricity in the 17th and 18th centuries. A study of early modern Physics*, University of California Press. Berkeley. California.
- HODSON, D., 1992, Assessment of practical work: Some consideration in philosophy of science, *Science and Education* 1, 115-144.
- LINDER, C.J., 1993, A challenge to conceptual change, *Science Education* 77 (3), 293-300.
- MC DERMOTT, 1984, Research on conceptual understanding in Mechanics, *Physics Today*, 37 (7).
- MARTON, F., 1981, Phenomenography- Describing conceptions of the world around us, *Instructional Science*, 10, 177-200.
- MATTHEWS M.R., 1990, History, Philosophy and Science Teaching: A rapprochement, *Studies in Science Education*, 18, 25-51.
- MOREIRA, M.A., 1996, Modelos mentais, *Investigações em Ensino de Ciências* 1 (3), 193-232.
- MORTIMER, E.F., 1996, Constructivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos?, *Investigações em Ensino de Ciências* 1 (1), 20-39.
- NERSSESIAN, N., 1989, Conceptual change in science and in science education, *Synthese* 80, 163-183.
- PINTÓ, R., ALIBERAS, J. y GÓMEZ, R. 1996. Tres enfoques en la investigación sobre concepciones alternativas, *Enseñanza de las Ciencias* 14 (2), 221-232.
- PRIESTLEY, J. (1775). *The History and Present State of Electricity*, 2 vols. (originally published 1775), New York: Johnson Reprint Company (1966).
- RAINSON S., TRANSTRÖMER G. & VIENNOT L., 1994, Students' understanding of superposition of electric fields, *American Journal Physics* 62 (11), 1026-1032.
- REINER, M., 1997, A learning environment for mental visualization in electromagnetism, *International Journal of Computers for Mathematical Learning* 2, 125-154.
- SALTIEL E. y VIENNOT L., 1985, ¿Qué aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontáneo de los estudiantes?. *Enseñanza de las Ciencias*, 3(2), 137-144.
- SEROGLOU, F., KOMOURAS, P. & TSELFES, V., 1998, History of science and instructional design: the case of electromagnetism, *Science and Education* 7, 261-280.
- SOLBES, J. y TRAVER, M.J., 1996, La utilización de la historia de las ciencias en la enseñanza de la Física y Química, *Enseñanza de las Ciencias* 14(1), 103-112.
- TATON R., 1988, *Histoire Generale des Sciences* . Presses Universitaires de France. Paris.

- TÖRNKVIST, S., PETTERSSON, K.A. & TRANSTRÖMER, G., 1993, Confusion by representation: on student's comprehension of the electric field concept, *American Journal of Physics* 61 (4), 335-338.
- TOULMIN R., 1972, *Human understanding : the collective use and evolution of concepts*, Princeton University Press (traducido al castellano en Alizanza Editorial, Madrid, 1977).
- VIENNOT L., 1996, *Raisonnement en physique. La part du sens commun*, De Boeck Université. Paris.
- VIENNOT L., 1992, Raisonnement à plusieurs variables: tendances de la pensée commune, *ASTER* 14, 127-141.
- VIENNOT, L. & RAINSON, S., 1992, Students' reasoning about the superposition of electric field, *International Journal of Science Education*, 14 (4), 475-487.
- WANDERSEE J.H., 1992, The Historicality of cognition: implications for Science Education Research, *Journal of Research in Science Teaching* , 29 (4), 423-434.
- WANDERSEE J.H., MINTZES J.J. & NOVAK J.D., 1994, Research on alternative conceptions in Science, *Handbook of research on science teaching and learning* (McMillan Publishing Company. New York).
- WHITE, R. & GUNSTONE, R., 1992, *Probing understanding*, The Palmer Press. London.
- WHITTAKER, E. 1987, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, American Institute of Physics.

Recebido em 04.01.99

Reformulado em 15.04.99

Aceito em 26.04.99