

¿EXPERIMENTOS ROMÁNTICOS? EL CASO DE LA ELECTRICIDAD

*Friedrich Steinle*¹

Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte

Un caso sorprendente

En el verano de 1820 una carta impresa circuló a lo largo de la Europa ilustrada, causando gran impresión. Contenía la descripción de un resultado experimental: la acción del galvanismo sobre una aguja imantada, un efecto que se buscaba en vano desde hacía mucho tiempo. El resultado proporcionaba la prueba experimental de una relación entre fuerzas de la naturaleza que habían sido tratadas por separado. No hay que sorprenderse de que el resultado recibiera grandes elogios de quienes tenían la creencia de que las distintas fuerzas de la naturaleza estaban conectadas entre sí o que, incluso, no eran sino distintas expresiones de una misma fuerza fundamental -una creencia a menudo calificada de “romántica”. No hay que sorprenderse tampoco de la desconfianza profunda por parte de quienes nunca habían tenido, o habían rechazado, cualquier creencia de ese tipo. Si se me permite simplificar un tanto la situación, estos dos grupos han sido asociados con la “física romántica” y la *Natürphilosophie*, por una parte, y con el uso del método matemático en física por otra. Mientras que el primer grupo estaba diseminado a lo ancho de los países de lengua alemana, con una cierta concentración en Jena, el segundo estaba concentrado solamente de París. Es bien característico que la primera reacción en París contra el informe fuese la sospecha de que se trataba de otra “*rêverie allemande*”².

¹ Agradezco a Jutta Schickore y a los participantes en el Symposium de Gran Canaria sus comentarios sugerentes y críticos.

² Como Dulong informó a Berzelius: (Söderbaum 1912-32), vol. 4, 18.

El propio Hans-Christian Ørsted, autor de la carta³ y figura central de la Academia de Copenhague, conocía bien a los dos grupos. Dieciocho años antes, en el curso de una visita de tres años por los centros de investigación en Alemania y Francia, había visitado, entre otros lugares, Jena, donde había hecho amistad con Johann Wilhelm Ritter, que ya era ampliamente conocido por sus trabajos en electroquímica y galvanismo. Del mismo modo, había pasado mucho tiempo en París y se había informado acerca de la tendencia matematizadora de la escuela de Laplace. Profesor ya de Física en Copenhague, compartía aún muchas de las creencias centrales del idealismo alemán y de la *Natürphilosophie*, pero al mismo tiempo mantenía un distanciamiento crítico con respecto a las empresas especulativas y tenía buen cuidado en su investigación de separar claramente los hallazgos empíricos y las explicaciones especulativas⁴. Sin embargo, se le incluye a menudo entre los “físicos románticos”, y su descubrimiento del electromagnetismo se considera como uno de los mayores éxitos, incluso una *Sternstunde* (“hora mágica”) de ese momento histórico concreto⁵.

El descubrimiento de Ørsted fue espectacular y causó reacciones importantes. El tema fue estudiado inmediatamente en toda Europa, y muchos expresaron su impresión de que se acababa de abrir un nuevo campo de investigación. La mayor parte de la investigación subsiguiente implicaba experimentación. El período inicial del electromagnetismo, con muchas acciones enfocadas al mismo problema, proporciona un escenario prometedor para los estudios del experimento, sus variantes y formas específicas. En particular, el episodio podría servir como clave para estudiar la cuestión de si hay una variedad específica que pudiese denominarse “romántica” y cómo se podría caracterizar. Estas cuestiones constituyen el objetivo de mi contribución. Después de algunas consideraciones y especificaciones generales esbozaré los procedimientos experimentales de muchos investigadores del período histórico. A la vista de esa muestra volveré a la cuestión general y defenderé un cambio significativo de perspectiva.

³ Para Ørsted, cf. la introducción de Kirstine Meyer a (Meyer 1920), o (Dibner 1962), (Williams 1974), (Franksen 1981), (Jansen, Snorrason & Lauritz-Jensen 1987). La carta latina (Ørsted 1820A) pronto fue traducida e impresa en francés, inglés, alemán, italiano y danés, cf. (Meyer 1920), vol.2, 214, y (Steinle en prensa-a), cap. 2.

⁴ Para un informe crítico de Ørsted como filósofo de la naturaleza, cf. (Christensen 1995). Una selección de los escritos de investigación de Ørsted ha sido traducido al inglés en (Jelved, Jackson & Knudsen 1998).

⁵ (Mey & Sibum 1987), 146, (Snelders 1990).

¿Física romántica, experimentos románticos?

El concepto de “ciencia romántica”, o más específicamente “física romántica”, aunque se ha usado a menudo debe tratarse con precaución. Contrariamente a lo que sucede con el “romanticismo” en literatura, el concepto de “ciencia romántica” ha sido introducido tardíamente con distintos fines, sobre todo el de calificar así la ciencia “mala”, la ciencia equivocada o, en unos pocos casos, para rehabilitarla como un episodio importante y muy fructífero⁶. Es una categoría que nunca ha sido elaborada consistentemente. Dependiendo de lo que se tratara, bien podía referirse a un grupo pequeño de quienes tenían relación con el correspondiente movimiento literario o, más a menudo, con un grupo mayor de investigadores que incluía a personajes tan distintos como Oken, Seebeck, Steffens y Humboldt, y hasta a Goethe, Davy y Faraday, incluso a pesar de su ocasional rechazo explícito de la literatura romántica y del método especulativo en la ciencia. Si queremos usar hoy el término como una categoría del análisis historiográfico, entonces hay que hacer un análisis más profundo de su significado, sus límites y sus funciones.

Un punto específico a considerar aquí es que no se puede equiparar fácilmente “ciencia romántica” y “Naturphilosophie”, como se ha hecho a menudo. Ken Caneva, en un destacado artículo ha señalado que estos dos conceptos, si se toman con significado preciso, tienen decididamente sentidos diferentes, a pesar de su área de solapamiento⁷. Pero todavía se siguen poniendo juntos, a costa de una imprecisión considerable. Mientras que el período ha recibido en los últimos años una atención creciente⁸, el término “ciencia romántica” se suele usar de modo vago como un reclamo, dirigiendo la atención hacia un periodo histórico, hacia un tipo específico de creencias o de prácticas o hacia un grupo de investigadores más o menos difuso. El valor de un concepto tan vago para la historiografía de la ciencia es, por supuesto, escaso. Aunque no es tarea mía remediar aquí ese desafortunado estado de cosas, es necesario estar prevenido frente a ello. Lo que haré en este escrito es dirigirme a un aspecto específico de la investigación científica –el experimento– y preguntar si es posible y significativo en algún sentido hablar de un tipo específico de experimento “romántico”. Mi conclusión, por anticiparla desde ahora, será negativa, pero, al mismo tiempo, apuntará a un significativo cambio de perspectiva.

⁶ La tradición de criticar la ciencia “romántica” se remonta, al menos, a Helmholtz y Du Bois-Reymond, pero sorprendentemente continúa en la historiografía moderna, como en (Gillispie 1960), quien retrató la investigación romántica como meditación de ‘salón’. Un punto de vista más positivo y, a veces, apologético es el que asumen (Poppe 1959), (Herrmann 1967), (Herrmann 1968), (Wetzels 1973), (Wetzels 1990).

⁷ (Caneva 1997). Véase también (Engelhardt 1988) o (Nielsen 1989).

⁸ Como indicador, véanse las colecciones (Porter y Teich 1988), (Cunningham y Jardine 1990), (Poggi y Bossi 1994), (Uerlings 1997), (Shaffer 1998), o en los recientes congresos en la Universidad de Harvard (Mayo de 2002) y en Gran Canaria (Septiembre de 2002).

Experimentar es un procedimiento complejo, en el que interactúan estrechamente acciones y consideraciones, instrumentos y teorías, espacios y materiales, actores y cuestiones. Al preguntarse por un experimento “romántico” se pueden adoptar muchas perspectivas diferentes. Esto sigue siendo cierto si uno se centra, como yo haré, en los experimentos de investigación, dejando aparte los experimentos utilizados en otros contextos tales como las ilustraciones para estudiantes o las representaciones públicas de carácter lúdico. El experimento “romántico” apuntaría simplemente hacia los experimentos dirigidos por aquellos que se consideran “románticos”. La cuestión se vuelve algo trivial entonces –si decidimos hablar de románticos, tenemos experimentos románticos– y coextensiva con la cuestión de quién es considerado “romántico”. Por contra, la pregunta más interesante es si hay algo específico en la investigación experimental de aquellos que se relacionan con la “física romántica”, en contraste con otros investigadores del mismo campo. El experimento romántico podría, por ejemplo, apuntar a una actividad experimental hecha con ideas “románticas” *in mente*, tales como la unidad de la naturaleza, o la polaridad e intensidad, o la conexión del mundo material y espiritual. Sin embargo, no está claro en absoluto que esas ideas deban hacer que la actividad experimental difiera de la actividad de aquellos que no las compartían. Así pues, la perspectiva más prometedora para abordar nuestra cuestión me parece que es proyectar una mirada a la *práctica* experimental en todos sus diversos aspectos: el rasgo genuino de la actividad experimental, el uso de los instrumentos y la actitud hacia ellos, el carácter de los mismos, los modos de observación, la utilización del propio cuerpo, el tipo de cuestiones planteadas y las vías de evaluación de los resultados experimentales, remitiéndolos a los resultados expuestos.

A pesar de algunas tentativas⁹, la pregunta por tal práctica experimental “romántica” concreta está totalmente abierta¹⁰. Abordarla de manera comprensiva, sin embargo, requeriría amplios estudios que abarcaran los distintos campos de investigación del periodo, como la fisiología, la química, la acústica, la óptica, los colores, etc., un estudio que llenaría fácilmente un libro. En cambio, lo que yo haré es analizar un episodio específico –el primer electromagnetismo– con esas preguntas *in mente*. En consecuencia,

⁹ (Schulz 1993), aun habiendo suscitado explícitamente la cuestión de una práctica experimental romántica concreta, de hecho sólo estudió unas declaraciones programáticas. (Daiber 2001) proporciona un ejemplo contundente de lo que falla al plantear los estudios de los experimentos desde una perspectiva meramente filológica.

¹⁰ (Henderson 1998) aspira a encontrar un enfoque experimental específico en Novalis y Ritter, en el que la ciencia se vea como “un proceso en marcha que usa símbolos instrumentales en el pensamiento concreto de la imaginación” (163). Pero, de nuevo, la práctica experimental está sorprendentemente ausente de su exposición. Una mirada más de cerca arrojaría una luz totalmente diferente a la pretendida especificidad de los procedimientos experimentales de Ritter en oposición a Volta, por ejemplo, e incluso más si se incluyera a Galvani.

podré abordar algunos problemas característicos para responder algunas de las cuestiones expuestas anteriormente, pero fundamentalmente para cambiar la perspectiva general. Además, apuntaré algunas de las razones que me hacen sugerir que esos resultados van más allá del caso histórico particular.

El electromagnetismo temprano

El asunto de la posible interacción entre electricidad y magnetismo se había considerado hacía ya tiempo, incluso en el siglo XVIII, cuando circularon informaciones acerca de sucesos tales como cruces de hierro imantadas por la descarga de un rayo. La investigación volvió a animarse al surgir la pila de Volta en 1800. En 1801, Johann Wilhelm Ritter hizo una serie de experimentos sobre las propiedades galvánicas específicas de los polos magnéticos opuestos, que no tuvieron éxito. Los experimentos del *amateur* de Padua Gian Domenico Romagnosi en 1802 y del profesor de Química de Génova Mojón en 1804 no tuvieron virtualmente ningún eco, aunque habían mostrado alguna acción del galvanismo sobre el magnetismo¹¹. Sí recibió mucha atención, por el contrario, el experimento de dos académicos de París: en 1805 Jean Hachette y Bernard Desormes hicieron flotar en agua una gran pila voltaica con el fin de comprobar hacia donde era dirigida por el magnetismo terrestre. De manera muy característica en la investigación parisina, dejaron la pila “abierta”, es decir, no conectaron sus dos extremos, y obtuvieron un resultado negativo¹².

Este somero esbozo deja claro que los experimentos que buscaban una acción electromagnética podían diseñarse y llevarse a cabo sin creencias y presupuestos mentales vinculados a la *Natürphilosophie* o al idealismo alemán. De igual modo, las lecciones extraídas de esos resultados diferían ampliamente. En Francia, el resultado de los experimentos de París fomentaba la creencia de que la acción electromagnética no existía –después de todo, el experimento se hizo con la supervisión y bajo los auspicios de la autoridad en ese campo, la academia de París. La creencia consiguiente estaba corroborada implícitamente, además, por la teoría matemática de la electricidad presentada por Poisson en 1812, que no se refería explícitamente al tema, pero no dejaba espacio para tal interacción: como otras teorías de tipo “laplaciano”, trabajaba sobre el supuesto general de que no había ninguna interacción entre distintos imponderables como luz, calórico, y fluido eléctrico y magnético. Pero no todo el mundo se preocupaba por la autoridad de la academia de París y de la física laplaciana, y no todos aceptaban los experimentos de París como la última palabra en el tema de

¹¹ (Dibner 1962), (Andrade Martins 2001).

¹² (Mottelay 1922), 376. De haber cerrado la pila, habrían obtenido probablemente un resultado positivo.

la atracción electromagnética. Basándose en creencias generales sobre la relación de todas las fuerzas de la naturaleza, algunos mantenían aún la creencia en la posibilidad de la interacción electromagnética.

Ørsted, descubriendo la acción electromagnética

Uno de los que mantenían tal creencia fue Ørsted. Sobre la base de su visión general de la acción eléctrica y química, ya en 1812 puso el énfasis en sus expectativas de que las fuerzas eléctricas y magnéticas interactuaran entre sí¹³. Pero sólo ocho años después, en julio de 1820, emprendió un serio trabajo experimental y obtuvo, en efecto, un resultado positivo¹⁴. Colocó una aguja magnética, suspendida como una brújula, cerca del hilo que conectaba una pila galvánica (fig. 1); en el momento en que el hilo se conectaba a la pila, la aguja se desviaba de su posición norte-sur y sólo la recuperaba cuando se desconectaba el hilo. El experimento mostraba claramente la acción del galvanismo sobre el magnetismo, y es ese resultado lo que comunicó –plenamente consciente de lo espectacular de la noticia– de la manera más directa y rápida, pero también más cara, con la carta arriba mencionada, escrita en latín y enviada a los investigadores de toda Europa.

La creencia general en la existencia de una relación entre las fuerzas de la naturaleza se había complementado, por supuesto, con asunciones más específicas. Sostenía, por ejemplo, que el “conflicto eléctrico” –así es como llamaba al proceso, por otra parte desconocido, que tenía lugar dentro del hilo– no sólo tenía efectos dentro del mismo, sino probablemente también en el espacio que lo rodeaba. Esta idea hizo que prestara atención, a diferencia de otros, al espacio alrededor del hilo¹⁵. En términos generales, el camino hacia su descubrimiento llevaba de unas hipótesis generales “teóricas” al experimento concreto, lo que, desde luego, no era inusual en la investigación, como lo mostraba por ejemplo el experimento de Hachette y Desormes, que tenía una estructura parecida, incluso en lo que se refiere a la manera de realizarlo y estabilizarlo. Lo que era drásticamente distinto, desde luego, eran las creencias e hipótesis detrás de las previsiones que había que comprobar en el experimento. Del episodio aprendemos algo acerca del poder heurístico de ciertas hipótesis de partida, pero nada acerca del tipo específico de experimento que haya que realizar, ni de la estruc-

¹³ (Ørsted 1812)

¹⁴ Respecto a la historia y a los antecedentes de sus investigaciones, Ørsted ofreció diferentes relatos retrospectivos: (Ørsted 1821), (Ørsted 1830). Se proporcionan estudios históricos en (Meyer 1920), LXVII-XCVII, (Dibner 1962), y (Snelders 1990).

¹⁵ (Andrade Martins 1999) ofrece un análisis más ajustado. Por supuesto, el conocimiento de Ørsted acerca de las experiencias y fallos anteriores también desempeñó un papel esencial en esto.

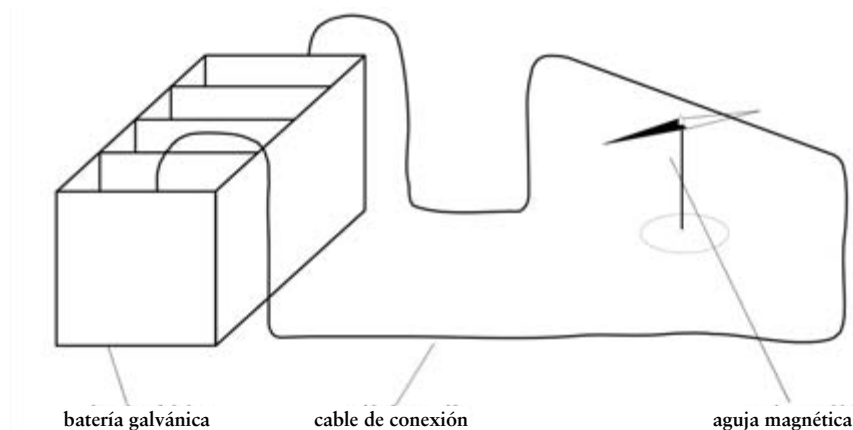


Fig. 1. Esquema representativo del dispositivo experimental de Ørsted en 1820.

tura epistémica, ni tampoco de la manera concreta en que se hicieron realmente los experimentos.

Se abren perspectivas más interesantes si contemplamos la oleada de experimentos estimulada por el descubrimiento de Ørsted. Muchos investigadores que continuaron su trabajo insistieron en que el resultado de Ørsted no era un efecto aislado, sino que abría todo un nuevo campo de trabajo. Al mismo tiempo, hay que decir que el nuevo efecto proporcionaba bien poca orientación, más bien al revés: sugería que, a primera vista, los conceptos que tradicionalmente servían para interpretar los efectos físicos –atracción y repulsión– no tenían aplicación aquí. Esto, subrayado explícitamente, causó una perplejidad general. Voy a exponer a continuación una muestra de las distintas maneras de arreglárselas con tan peculiar situación.

Ørsted, a la búsqueda del electromagnetismo

El primer investigador en el que hay que fijarse es el propio Ørsted. Después del periodo febril en que hizo públicas las noticias, empezó a trabajar más concienzudamente en el asunto¹⁶. El objetivo y la forma de la investigación cambiaron significativamente; ya no se trataba de establecer y fijar un efecto concreto, sino más bien de explorar un campo más amplio de fenómenos asociados. Analizó entre otros el efecto de la batería: mientras que al principio había utilizado un aparato grande, después se dedicó a variar sistemáticamente los parámetros de la pila, el tamaño y número de placas, el

¹⁶ Sus resultados se publicaron en un segundo escrito algunos meses después: (Ørsted 1820), entre otros.

nivel de ácido, la polaridad, etc., para encontrar de qué manera afectaban a la acción electromagnética. Además de formular tales dependencias, comprobó que un aparato mucho más pequeño, incluso un dispositivo con dos placas, era suficiente para conseguir el efecto. Esto no sólo hizo que fuera mucho más fácil realizar los experimentos, sino que proporcionó también la oportunidad de “invertir” la acción electromagnética; en vez de mantener el hilo fijo y mover el imán, se movía el hilo (junto con la pila pequeña), suspendido de un cable, y se acercaba el imán. Cuando Ørsted encontró que los movimientos del hilo coincidían con lo que cabía esperar a partir de consideraciones de reciprocidad mecánica, fue todavía más allá e intentó obtener tales movimientos a partir del magnetismo terrestre. En eso, sin embargo, fracasó, y supuso que lo que pasaba es que el dispositivo no era lo suficientemente sensible.

Schweigger

Aunque Ørsted publicó estos resultados bastante pronto, otros se le anticiparon. Johann C. S. Schweigger, profesor de física y química en Halle y editor de una revista importante, se había ocupado de cuestiones similares, como la del efecto de variar las características de la batería y la de la reciprocidad de la acción electromagnética. Incluso su método experimental era parecido: variación sistemática de los parámetros de la batería y el dispositivo como elemento fundamental. Sin embargo, Schweigger extendió también el método al hilo de conexión. Se dio cuenta de que la acción electromagnética se veía reforzada cuando no sólo se ponía el hilo sobre la aguja sino que también se llevaba hacia atrás por debajo de ella. El procedimiento podía repetirse, dando lugar de este modo a una especie de enrollamiento del hilo alrededor de la aguja, dispositivo que reforzaba considerablemente el efecto electromagnético. Schweigger llamó a este dispositivo “multiplicador” y lo presentó ya en una conferencia en Halle en septiembre¹⁷.

Poggendorff

Más o menos al mismo tiempo, un estudiante de Berlín, Johann C. Poggendorff, estimulado por su director de trabajo, el académico Paul Erman, estudió el electromagnetismo y, siguiendo métodos parecidos a los de Schweigger, observó que el efecto electromagnético puede reforzarse si se retuerce muchas veces el hilo en vez de una sola. Poggendorff experimentó con el

¹⁷ Publicó sus resultados en (Schweigger 1821).

dispositivo (que llamó “condensador”, visto que la fuerza electromagnética estaba tan concentrada en los rollos) e hizo variar sistemáticamente sus parámetros, como el número de enrollamientos, su conexión (paralela, en serie y mixta, por usar una terminología posterior) y el diámetro del hilo. Obtuvo de nuevo regularidades empíricas, por ejemplo sobre el efecto del número de enrollamientos¹⁸.

Davy

En Londres la reacción al informe de Ørsted se retrasó algo. Sólo en octubre se publicó la traducción inglesa en una revista. Uno de los que se apercebió enseguida de su importancia fue Humphry Davy, ampliamente conocido por sus trabajos en electroquímica y que estaba a punto de convertirse en presidente de la Royal Society de Londres. Davy se lanzó al trabajo experimental centrándose en varios asuntos: los efectos magnetizantes del hilo, la dependencia del efecto con respecto a las propiedades de la batería, el efecto de un dispositivo completo de hilos en contraste con el caso de un solo hilo, la “reciprocidad” del efecto y, en particular, las complicadas disposiciones espaciales. Tal y como indica la lista, había mucho en común con el trabajo de los demás. Además, el parecido era también muy estrecho en cuanto a los métodos experimentales; de nuevo el procedimiento fundamental consistía en variar unos cuantos parámetros, y de nuevo se trataba de formular regularidades empíricas cada vez más generales o, dicho con palabras de Davy, de establecer una “ley de producción del magnetismo”¹⁹. Hay que recordar aquí que Davy, al igual que otros investigadores de este primer periodo, conocía poco o nada de lo que hacían los demás en el mismo momento. Uno de los resultados más notables de Davy en sus esfuerzos en el camino hacia esa “ley” fue su propuesta de determinar la dirección de magnetización de agujas de acero cerca del hilo mediante el concepto de sentido de rotación. La función principal de este medio poco usual de representación era permitir una formulación densa y escueta de numerosos resultados experimentales.

Ampère, en búsqueda de los “hechos generales”

En fuerte contraste con Londres, las reacciones en París al informe de Ørsted fueron mucho más inmediatas y rotundas. Después de todo, el efecto

¹⁸ (Poggendorff 1821).

¹⁹ (Davy 1821), p. 14.

constituía un serio desafío tanto a la doctrina general de fluidos que no interaccionan como en particular a la noción de fuerzas centrales, noción en la que se basaba fundamentalmente la todavía poderosa física de Laplace con su tendencia matematizante. En consecuencia el informe de Ørsted tropezó con escepticismo y falta de confianza. Desafortunadamente para el grupo de la tradición matemática, su principal defensor, Jean-Baptiste Biot, estaba de viaje cuando llegaron las noticias. De este modo un “marginal” pudo, con una iniciativa totalmente inesperada y trabajando solo en ese campo, avanzar mucho antes de la vuelta de Biot: André-Marie Ampère, profesor de matemáticas de la Escuela Politécnica, sin ninguna experiencia en electricidad y en el trabajo experimental, se lanzó inmediatamente a la tarea y después de tres meses de actividad febril fue capaz de establecerse como figura principal en el nuevo campo y como fundador de la electrodinámica.

Voy, a partir de su primera actividad, de la que no sabíamos prácticamente nada hasta hace poco²⁰, a esbozar dos episodios. En primer lugar, Ampère ideó un instrumento que reducía extraordinariamente el efecto del magnetismo terrestre, su “aguja astática”. Se ponía el eje de la aguja en la dirección de la orientación magnética, de tal modo que la aguja no sufría los efectos del magnetismo terrestre. Con este instrumento, Ampère variaba numerosas condiciones experimentales: la fuerza y polaridad de la batería, la longitud y el material de la aguja magnética y, más aún, la posición de la aguja con relación al hilo (arriba, abajo, derecha, izquierda, horizontal, vertical). De nuevo su finalidad era descubrir los factores importantes y enunciar regularidades. Lo más difícil fue formular la dependencia del efecto de la ordenación espacial del cable y el imán. Cuando Ampère comprobó que la deflexión de la aguja era siempre hacia una posición en ángulo recto, el problema central fue formular en cuál de las dos direcciones posibles se movía el polo norte. Ørsted había referido todos los movimientos a direcciones de la brújula, lo que daba lugar a descripciones largas y complicadas que hacían imposible cualquier generalización. Ampère introdujo nuevos conceptos para superar estos obstáculos, entre otros los de “lado izquierdo” y “derecho” de la corriente y los explicó mediante una persona en la que circulaba una corriente de los pies hacia la cabeza: si dicha persona gira su cabeza hacia la aguja magnética, su mano derecha señala el “lado derecho” de la corriente y la mano izquierda el “izquierdo”. Ampère denominó la regularidad consiguiente (que más tarde se llamó la “regla del nadador” de Ampère) como “acción dirigida” y le atribuyó el estatus especial de “hecho primitivo”.

Pero fue todavía más lejos. Se había dado cuenta de que la propia batería ejercía una acción sobre la aguja magnética, de manera muy parecida al

²⁰ La razón de ello se encuentra tanto en su particular sistema de publicación como en el estado de las fuentes especialmente malo. Mi exposición actual está basada en una nueva forma de reconstruir el material de archivo. Para una exposición más detallada, véase (Steinle 2000) y (Steinle en prensa-a); para mis procedimientos, véase (Steinle en prensa-b).

hilo, pero en cierto modo en la dirección opuesta. A fin de incluir los dos casos en una misma regularidad, asignó a la corriente galvánica dentro de la batería la dirección opuesta a la corriente del hilo. Sin embargo, poco después encontró un modo más fácil de conseguirlo. Si se consideraba que la dirección de la corriente dejaba de referirse a los polos de la batería, y se tomaba como un sentido de circulación, era posible dar una forma más coherente y general de la regularidad obtenida. Se pensó, por primera vez en la historia, que la batería “se concebía como formando *un circuito único* con el hilo conductor”²¹. Esta noción de circuito de corriente resultó ser fundamental para la investigación ulterior y se integró rápidamente en la terminología de la investigación en electricidad. Pero el escenario original de la formación del concepto fue la formulación de la regularidad de la “acción dirigida” de una manera más general.

Ampère, demostrando una teoría

Por contraste, voy a mencionar un segundo episodio, algo posterior, del trabajo de Ampère. Paralelamente a su búsqueda de regularidades, Ampère seguía sus especulaciones acerca de las “causas” de la interacción electromagnética y formuló la hipótesis de que el magnetismo podía ser causado por corrientes eléctricas circulares dentro de los cuerpos magnéticos. Buscando confirmación empírica, Ampère consideró que las corrientes eléctricas circulares podían interactuar entre sí, sin que interviniera hierro alguno. Para comprobarlo, diseñó un experimento específico. La parte central del aparato consistía en dos espirales de hilo conductor. Una de ellas estaba colgada como un péndulo y podía moverse muy fácilmente hacia la otra, o en sentido opuesto a ella, que estaba montada sobre una base fija. Ampère pensaba que las espirales, una vez conectada la batería, deberían atraerse o repelerse entre sí. Cuando este efecto no tuvo lugar, lo atribuyó a obstáculos debidos a excesiva fricción en el aparato e insuficiente potencia de la batería. Sus intentos fueron tan lejos que, gastándose medio mes de sueldo, consiguió por último la batería más potente de París y con este aparato obtuvo al fin el efecto deseado, en un experimento que se hizo en el propio taller de los constructores de la batería. Sólo pocas horas después anunció orgullosamente el nuevo efecto en una conferencia en la academia de París, y lo presentó como una “prueba final” de su hipótesis de las corrientes circulares como causa del magnetismo²².

Merece la pena hacer notar aquí cuán diferente es el papel del experi-

21 Archives de l'Académie des Sciences, París, Dossier Ampère, chemise 208bis, cf. (Ampère 1820), p. 198.

22 En una carta a su hijo del mismo día del experimento exitoso: (Launay 1936-43), vol. 2, p. 562.

mento en este segundo episodio en comparación con el primero. Los elementos esenciales del experimento no cambian en toda la serie. Se trataba de optimizar en una dirección bien definida y no de explorar en un amplio terreno, como en el primero. Desde la primera idea hasta la evaluación final, el experimento estaba marcado por una previsión bien definida de resultados que había que comprobar. No se trataba pues de una regularidad del tipo “si-entonces” sino de una comprobación experimental de la teoría.

Biot

Contrariamente a Ampère, Biot tenía un programa experimental muy preciso: “lo primero que hay que descubrir es la ley de decrecimiento con la distancia de la fuerza ejercida por el hilo”²³. Se trataba de llevar a cabo el programa de Laplace y en consecuencia Biot diseñó, junto a su ayudante Felix Savart, un dispositivo para medir dicha fuerza. Se medía el periodo de oscilación de un imán suspendido horizontalmente a distintas distancias del hilo y a partir de aquí se calculaba la ley de la fuerza. Este principio de medida ya había sido empleado por Coulomb tres décadas antes y todo lo que había que hacer era trasladarlo a la nueva situación. Biot y Savart determinaron una proporcionalidad inversa entre la distancia y la fuerza sobre el imán y obtuvieron la ley del inverso del cuadrado de la distancia para elementos infinitesimales. Después de una segunda serie ligeramente modificada de medidas propusieron la ley

$$F \sim 1/r^2 \sin w$$

(donde F es la fuerza, r la distancia, y w el ángulo que forma el cable con la dirección vertical) conocida como ley de Biot-Savart hasta el día de hoy²⁴. Desde luego, estos experimentos eran de todo menos sencillos; con las extremadamente inestables pilas voltaicas las medidas eran delicadas, y alguien con menos experiencia en hacer experimentos probablemente habría fracasado. No había nada nuevo, sin embargo, en lo conceptual. La ley de la fuerza, con toda su exactitud, se refería solamente a unas pocas disposiciones experimentales, y todas las complicadas dependencias espaciales de la acción electromagnética quedaban fuera de consideración en favor de una ley matemática para una ordenación concreta. Se había conseguido el fin principal del programa de Laplace y, consecuentemente, Biot abandonó el campo.

²³ (Biot 1821), 228.

²⁴ (Biot 1820).

Faraday

Como último caso me referiré a otro científico inglés. Michael Faraday, que era entonces un desconocido “ayudante químico” de Davy en la Royal Institution de Londres, se pasó al electromagnetismo justo un año después. Acababa de terminar de elaborar un panorama detallado del estado del campo en el curso del cual había repetido casi todos los experimentos conocidos en dicho dominio²⁵. Al fin y al cabo tenía acceso a uno de los laboratorios mejor equipados de Europa. Abordó la cuestión del comportamiento de la aguja en posiciones que no son simétricas con el hilo, cuestión que Ampère había tratado pero sin resolverla. Faraday se fijó en el comportamiento de una aguja magnética horizontal suspendida cerca de un hilo vertical. Al variar sistemáticamente los dispositivos experimentales de muchas maneras, encontró que la situación era más complicada de lo que había pensado inicialmente, y que no había modo de superar los problemas del lenguaje tradicional de atracción y repulsión. Pero en cambio Faraday se dió cuenta de que el concepto de movimiento circular de un polo magnético alrededor del hilo, o viceversa, permitía una formulación coherente. Más aún, si se tomaba la rotación como el “caso más sencillo”, todos los efectos más complicados podían deducirse a partir de él, e incluso era posible entender la rotación y la repulsión como composiciones de rotaciones más elementales. Faraday terminó por conseguir estas rotaciones en los experimentos, lo que no sólo proporcionaba un fenómeno nuevo y espectacular, sino que además confirmaba con fuerza su nueva aproximación conceptual al conjunto del campo²⁶. Una vez más, el nuevo concepto surgía como un medio de formular regularidades empíricas lo más generales posibles.

¿Experimento romántico?

Algunos de los investigadores que he mencionado, como Ørsted y Schweigger, han sido denominados “románticos”, otros como Poggendorff, Ampère y Biot nunca han sido tratados como tales, y ha habido discusiones en torno a otros como Davy y Faraday. En general estas designaciones se han hecho teniendo en cuenta si las creencias fundamentales de los interesados eran semejantes a las de la *Natürphilosophie* alemana. Sin embargo, ¿hay algo que justifique estos agrupamientos (ya que no la etiqueta) considerando su práctica investigadora? Mientras que, respecto a los aspectos arriba

²⁵ (Faraday 1821-22). Para una exposición más detallada, véase (Steinle 1995) y (Steinle en prensa-a), cap. 6.

²⁶ (Faraday 1821).

expuestos de práctica experimental, hay diferencias visibles bien significativas, no veo ningún rasgo que induzca a una separación paralela con la que se toma habitualmente como línea divisoria entre románticos y no-románticos. El uso y carácter de los instrumentos, los modos de observación, el tipo de cuestiones abordadas, y las formas de evaluar los resultados experimentales varían significativamente en la muestra de los protagonistas históricos, pero ninguna de esas diferencias puede atribuirse específicamente al campo “romántico”. Incluso el uso del propio cuerpo no es en absoluto específicamente “romántico” (aunque a veces sea considerado así, por no estar mediatizado por los instrumentos): debido principalmente a la ausencia total de instrumentos sensoriales para los efectos de la pila, esas técnicas corporales resultaron masivamente difundidas, incluso entre investigadores como Volta y Biot. Como resultado queda claro que no hay nada que pueda llamarse una práctica investigadora “romántica” en el electromagnetismo temprano, aunque estuvieran implicados en él muchos actores supuestamente “románticos”.

Sin embargo, es bastante significativa la muestra de casos que apunta a una disposición diferente. Observando la práctica experimental, fue ciertamente Biot y, en menor grado, Ampère quienes se diferenciaron de todos los demás en un buen número de aspectos. Biot fue el único en organizar las mediciones de forma muy sofisticada (Ampère lo había intentado, pero fracasó), el único en intentar encontrar una cuestión muy específica a través de todos sus experimentos (la cuestión del exponente de la ley de la fuerza), y junto con Ampère, el único en presentar los resultados mediante una fórmula que se consideró “probada” por el experimento. Para sus contemporáneos Ampère parecía estar incluso más cerca de Biot a ese respecto que para nosotros, puesto que en sus publicaciones minimizó sistemáticamente e incluso dejó de lado aquellas de sus actividades que tenían un carácter más exploratorio (tal y como he ejemplificado en mi primera sección sobre Ampère). En un análisis de la práctica experimental esos métodos de trabajo se manifiestan especiales, y claramente diferentes de la mayor parte de las otras actividades que se llevaban a cabo en ese campo. Volveré a esa observación significativa en la próxima sección.

Aquellas observaciones están corroboradas mediante una revisión de la literatura histórica del periodo en cuestión. Dicho brevemente, se publicaron recuentos sobre la historia y estado del electromagnetismo –Erman en 1821, Faraday el mismo año, y Pfaff en 1824²⁷. No obstante, en ninguna de ellas hubo nada que retratase a un grupo especial que pudiéramos identificar como “romántico”. Aquellos que han sido llamados después “románticos” eran simplemente considerados como los principales investigadores del momento, junto con otros muchos. No es que esos autores trataran el campo como indiferenciado y homogéneo. Ellos subrayaron los

²⁷ (Erman 1821), (Faraday 1821-22), (Pfaff 1824).

métodos específicos como especiales y diferentes de la mayoría de las demás. Pero dicho estatus especial no se adscribía a un grupo de supuestos “románticos”, sino a Biot con su ley y a Ampère con su teoría matemática. Fue el método matematizante el que se mostró especial.

Aunque mis resultados se basan en un estudio histórico bastante limitado, no se restringen al episodio del primer electromagnetismo, sino que dan una visión característica del escenario general de la investigación eléctrica a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Haciendo un somero esbozo, podría decirse que el campo de trabajo estaba dominado por dos grandes tendencias: la más importante, simbolizada por la pila de Volta, se refería a todo el galvanismo con sus ramificaciones en fisiología y electroquímica, mientras que la otra, no menos visible, simbolizada por la balanza de torsión de Coulomb, se centraba en la cuantificación y la matematización. Si examinamos este campo, lo que sí se hace ver como un grupo específico dotado de un programa propio, no son los “románticos” en cualquiera de los sentidos del término, sino el círculo de investigadores matematizantes. Establecidos esencialmente en París, tenían un programa explícito, se habían distanciado deliberadamente de la forma tradicional de investigar en electricidad, y sus trabajos sólo podían ser entendidos en general por los miembros del grupo. Y ellos buscaban ciertamente una práctica experimental bastante específica, guiada por la idea de las mediciones de precisión, y sus consecuencias para el tipo de cuestiones, de acciones y del uso y carácter de los instrumentos. Por el contrario, los que suelen llamarse “románticos” eran sencillamente los principales representantes de una tendencia investigadora que implicaba a la mayoría de los investigadores europeos. Tal perspectiva es apta para cambiar nuestra visión de la investigación “romántica”, al menos en materia de electricidad. Si puede extenderse y cómo a otros campos como la fisiología, geología y mineralogía, es una cuestión abierta a la vez que interesante.

Experimentación exploratoria, formación conceptual y electricidad

El caso de la electricidad es suficientemente rico como para que se lo considere de carácter más general. Aunque los procedimientos y objetivos del experimento en los casos que he expuesto arriba no evidencian diferencias entre “romántico” y “no romántico”, apuntan, sin embargo, a tipos claramente distintos de procedimientos experimentales. En muchos casos nos encontramos en un lugar preeminente una especie de método de variación de numerosos parámetros experimentales, con el propósito de obtener un conjunto de regularidades empíricas. Ørsted (en su segunda serie), Schweigger, Poggendorff, Ampère (en su primera serie), Davy y Faraday se comportaron en esto de manera bastante semejante. Fue distinta, sin embargo, la manera de proceder de Biot, como lo fue el primer episodio de Ørs-

ted y el segundo de Ampère. Más que de hacer muchas variaciones, se trataba de sacar el máximo partido de un dispositivo experimental para determinar un factor numérico o de comprobar una intuición específica bien formulada.

Los dos métodos apuntan a dos tipos diferentes de actividad experimental. El segundo tipo está más próximo a lo que puede considerarse la “visión estándar” del experimento. Había una teoría que permitía esperar cierto efecto; esto daba lugar a diseñar y a realizar el experimento; y su resultado servía de ejemplo o de apoyo a la teoría. Así es como ha concebido, en general, el experimento tradicionalmente la filosofía de la ciencia²⁸. Sin embargo, los otros casos exhiben un tipo de experimento que he caracterizado como “exploratorio”²⁹. Lejos de ser un juego sin ideas con el aparato, tiene orientaciones y fines epistémicos precisos. El método experimental principal es la variación sistemática de los parámetros del experimento, con la finalidad de saber cuáles afectan al efecto buscado o son un requisito esencial. La finalidad principal es formular regularidades empíricas acerca de esas dependencias y correlaciones. Además, en muchos casos sucede que los conceptos y categorías existentes resultan ser inadecuados para dicho propósito. Se hace entonces necesaria la revisión de estos conceptos y categorías y la formación de otros nuevos que permitan una formulación general y estable de los resultados experimentales. Es aquí, en el marco de la formación de conceptos, donde la experimentación exploratoria alcanza su poder e importancia únicos, donde la acción y la conceptualización se estabilizan o desestabilizan mutuamente a cada paso. Los dos tipos de experimento no sólo difieren en su finalidad epistémica y en las orientaciones para el trabajo experimental efectivo, sino también en el carácter de los instrumentos y aparatos. Los instrumentos para el trabajo de exploración deben permitir un mayor abanico de variaciones, y estar abiertos a una variedad mayor de posibles resultados, incluso algunos no previsibles. Por el contrario, al comprobar previsiones bien fundadas, los instrumentos han sido diseñados para un determinado efecto; las posibilidades de variación son mucho más restringidas y lo mismo sucede con los resultados que no entran dentro del rango de lo esperado. Tal y como lo ilustran tanto el segundo instrumento de Ampère como el dispositivo de Biot, la especificidad del aparato tiene que pagar un precio en términos de pérdida de flexibilidad y de capacidad de captar resultados inesperados.

La experimentación exploratoria es mucho más común en la investigación científica de lo que se ha creído hasta ahora. Precisamente en la historia de la electricidad es posible dar una lista de numerosos episodios, desde Gilbert hasta Dufay, Galvani y Humboldt, de Faraday a Plücker y Röntgen,

²⁸ (Popper 1934), (van Fraassen 1981), por poner sólo dos ejemplos.

²⁹ Para una exposición más detallada, véase (Steinle 1997), (Steinle 2002), o (Steinle en prensa-a), cap. 7.

llegando hasta la superconductividad a alta temperatura de la década de 1980³⁰. En otros campos, como la química o las ciencias biológicas, hay muchísimos ejemplos. Que la experimentación exploratoria haya escapado durante tanto tiempo a la atención se debe sobre todo a que es típico que no aparezca en la presentación de los resultados científicos, ni siquiera en narraciones posteriores de los científicos acerca de lo que hicieron. Después de todo, es a menudo el cambio de las categorías básicas, conceptos y formas de representación lo que más importa aquí. Y, como ya señaló Ludwik Fleck, es sumamente difícil, después de haberse observado tal cambio o reformulación, volver a imaginar el estado previo e imperfecto de la investigación³¹.

Más que típica de algunos campos de estudio o tradiciones, la experimentación exploratoria tiene que ver con situaciones epistémicas específicas, aquellas en las que las mismas bases conceptuales de un campo determinado son puestas en cuestión y, por tanto, no ofrecen orientación alguna para el trabajo experimental. La primera fase del electromagnetismo es un ejemplo típico. Muchos investigadores se vieron desconcertados por las características del efecto. El mayor desafío radicaba en las propiedades espaciales del nuevo efecto, ya que era ahí donde los conceptos tradicionales no resultaban efectivos. Fue aquí, por tanto, donde se formaron, en el curso de la experimentación exploratoria, nuevos conceptos: “izquierda y derecha de la corriente” y “circuito de corriente” de Ampère, esquemas circulares de Davy y movimientos circulares de Faraday (primero imaginados y posteriormente realizados). Más tarde Faraday elaboraría, en un contexto muy parecido, incluso el concepto de líneas de fuerza. Todos estos conceptos fueron introducidos como un medio de formular regularidades empíricas, excluyendo explícitamente la consideración de procesos microscópicos. Por el contrario, la situación era muy diferente para Biot. Profundamente comprometido con la concepción laplaciana del universo, no podía poner en cuestión sus conceptos fundamentales, por lo que, en contraste con los demás, trabajó buscando la estabilidad conceptual. Su tarea experimental fue claramente dictada por el programa: encontrar un dispositivo que permitiera hallar la ley de la fuerza. Variar con amplitud muchos parámetros experimentales hubiera ido en contra de su bien planeado programa. Algo parecido puede decirse de los métodos de comprobación de Ampère en el segundo episodio.

La diferencia entre los métodos exploratorios y los dirigidos por la teoría ofrece una nueva perspectiva sobre la investigación eléctrica de principios del siglo XIX, concretamente sobre el *status* particular de los trabajos de París. La investigación sobre la pila voltaica y sobre todos los campos

³⁰ Discuto esos casos en (Steinle en prensa-a), cap. 7. (Burian 1997) presenta un caso significativo tomado de los comienzos de la genética.

³¹ (Fleck 1979), 86.

relacionados era heterogénea y usaba métodos tanto exploratorios como orientados por la teoría o la especulación, a veces por la misma persona, como ilustra el caso de Ørsted. En cambio, aquellos comprometidos con el método matemático realizaban casi exclusivamente experimentación orientada por la teoría. Las hipótesis conceptuales del programa eran poderosas y proporcionaban limitaciones tan fuertes que permitían reducir la finalidad de muchos experimentos a la determinación de un parámetro específico: el exponente en la ley de la fuerza. La existencia de dicha ley y el hecho de que tuviera la forma de una sencilla función potencial no eran interrogantes, sino supuestos previos del marco conceptual; en efecto, sólo tales supuestos previos hacían posible una experimentación bien dirigida. Todo lo dicho ofrece una buena ilustración de cómo distintos tipos de experimentación están conectados con distintas situaciones epistémicas, con una (supuesta) mayor o menor estabilidad en el terreno conceptual.

Epílogo

En el programa general de este congreso los organizadores plantean la cuestión de si hay una manera de estudiar la Naturaleza distinta de la de las matemáticas. La pregunta debía ser retórica: es demasiado obvio que no sólo existen tales caminos, sino que han desempeñado un papel fundamental en la investigación. Sin embargo, hay otra pregunta agazapada detrás de la observación de los organizadores: ¿es dicha forma no matemática de estudiar la naturaleza la que llamamos “romántica”? Una vez más, la respuesta, desde la perspectiva de la electricidad, es muy clara: no hay ninguna razón para que todo método no matemático tenga que ver con el “romanticismo”³². Basta pensar en nombres como Galvani, Volta, Arago, de la Rive, van Marum o Poggendorff. Casi todos ellos siguieron líneas de trabajo no matemáticas, y la única excepción fue el pequeño grupo de matemáticos de París. Y no es una casualidad que sólo este pequeño grupo hiciera un cierto tipo de experimentos distinto de todos los demás. Una mirada a la práctica experimental arroja así nueva luz tanto sobre la así llamada “ciencia romántica” como sobre la experimentación en general.

³² Además, se podría añadir que no todo enfoque romántico fue ajeno a las matemáticas, como lo muestra el caso del “físico romántico” *par excellence*, Johann Wilhelm Ritter. Con su esquema de tratamiento de las disposiciones galvánicas extremadamente abstracto y poderoso, se aproximó al formalismo matemático mucho más que cualquiera de sus contemporáneos (Ritter 1798).

Referencias bibliográficas

- Ampère, André-Marie, "Suite du Mémoire sur l'Action mutuelle entre deux courans électriques, entre un courant électrique et un aimant ou le globe terrestre, et entre deux aimants", *Annales de Chimie et de Physique* 15 (Octubre, 1820), pp. 170-218.
- Andrade Martins, Roberto de, "Resistance to the Discovery of Electromagnetism: Ørsted and the Symmetry of the Magnetic Field", *Paper given on the conference 'Volta and the History of Electricity'*, Como y Pavia, Septiembre, 1999.
- Andrade Martins, Roberto de, "Romagnosi and Volta's pile: Early difficulties in the interpretation of voltaic electricity", en F. Bevilacqua and L. Fregonese (ed.), *Nuova Voltiana: Studies on Volta and his Times*, Ulrico Hoepli, Pavia y Milán (2001) 3, pp. 81-102.
- Biot, Jean-Baptiste, "Sur le magnetisme de la pile de Volta", *Bulletin des Sciences par la Société Philomatique* (Agosto, 1820) p. 128.
- Biot, Jean-Baptiste, "Sur l'aimantation imprimé aux métaux par l'électricité en mouvement; lu à la séance publique de l'Académie des sciences le 2 avril 1821", *Journal de Savans* (Abril, 1821), pp. 221-235.
- Burian, Richard M., "Exploratory Experimentation and the Role of Histochemical Techniques in the Work of Jean Brachet, 1938-1952", *History and Philosophy of the Life Sciences* 19 (1997), pp. 27-45.
- Caneva, Kenneth L., "Physics and Naturphilosophie: A Reconnaissance", *History of Science* 35 (1997) pp. 35-107.
- Christensen, Dan Ch., "The Ørsted-Ritter Partnership and the Birth of Romantic Natural Philosophy", *Annals of Science* 52 (1995), pp. 153-185.
- Cunningham, Andrew y Jardine, Nicholas (ed.), *Romanticism and the Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge 1990.
- Daiber, Jürgen, *Experimentalphysik des Geistes: Novalis und das romantische Experiment*, Vandenhoeck & Ruprecht, Gotinga 2001.
- Davy, Humphry, "On the magnetic phenomena produced by Electricity", *Philosophical Transactions* 111 (part I), (1821) pp. 7-19.
- Dibner, Bern, *Ørsted and the discovery of electromagnetism*, Blaisdell, Nueva York 1962.
- Engelhardt, Dietrich von, "Romanticism in Germany", en R. Porter and M. Teich (ed.), *Romanticism in national context*, Cambridge University Press, Cambridge 1988, pp. 109-133.
- Erman, Paul, *Umriss zu den physischen Verhältnissen des von Prof. Ørsted entdeckten elektro-chemischen Magnetismus*, Berlín 1821.
- Faraday, Michael, "On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism", *Quarterly Journal of Science* 12 (1821), pp. 74-96.
- Faraday, Michael, "Historical Sketch of Electro-Magnetism", *Annals of Philosophy* 2 y 3 (N.S.) (Septiembre, Octubre de 1821 y Febrero de 1822), pp. 195-200, 273-290 y 107-121.
- Fleck, Ludwik, *Genesis and Development of a Scientific Fact*, University of Chicago Press, Chicago 1979.
- Franksen, Ole Immanuel, *H. C. Ørsted: a man of the two cultures*, Strandberg, Birkeroed 1981.
- Gillispie, Charles Coulston, *The edge of objectivity: an essay in the history of scientific ideas*, Princeton University Press, Princeton 1960.

- Henderson, Fergus, "Novalis, Ritter and 'experiment': A tradition of 'active empiricism'", en E. S. Shaffer (ed.), *The third culture: Literature and science*, de Gruyter, Berlín 1998, pp. 153-169.
- Herrmann, Armin, "Faraday, der romantische Physiker", *Physikalische Blätter* 23 (1967) pp. 343-346.
- Herrmann, Armin (ed.), *Die Begründung der Elektrochemie und Entdeckung der ultravioletten Strahlen von Johann Wilhelm Ritter*. Ostwalds Klassiker der exakten Naturwissenschaften, Neue Folge, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt/M. 1968.
- Jansen, F. J. Billeskov *et al.* (ed.), *Hans Christian Ørsted*, Nyt Nordisk Forlag Arnold Buschk, Kopenhagen 1987.
- Jelved, Karen *et al.* (ed.), *Selected scientific works of Hans Christian Ørsted*, Princeton University Press, Princeton 1998.
- Launay, Louis de (ed.), *Correspondance du Grand Ampère*, Gauthier-Villars, París 1936-43.
- Meya, Jörg & Sibum, H. Otto, *Das fünfte Element. Wirkungen und Deutungen der Elektrizität*, Rowohlt & Deutsches Museum, Hamburgo y Munich 1987.
- Meyer, Kirstine (ed.), *H.C. Ørsted: Naturvidenskabelige Skrifter - Scientific Papers*, Hoest & Soen, Copenhagen 1920.
- Mottelay, Paul Fleury, *Bibliographical History of Electricity and Magnetism, chronologically arranged*, Charles Griffin, Londres 1922.
- Nielsen, Keld, "Another kind of light: The work of T.J. Seebeck and his collaboration with Goethe, part I", *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 20 (1989), pp. 107-178.
- Ørsted, Hans Christian, *Ansicht der chemischen Naturgesetze, durch die neueren Entdeckungen gewonnen*, Realschulbuchhandlung, Berlín 1812.
- Ørsted, Hans Christian, "Nouvelles expériences électro-magnétiques; par M. J.C. Ørsted, Communiquées dans une lettre recue à Paris, le 29 septembre 1820", *Journal de Physique* 91 (Julio, 1820) pp. 78-80.
- Ørsted, Hans Christian, *Experimenta circa effectum Conflictus electrici in Acum magneticam*, Copenhage 1820 (A) p. 4.
- Ørsted, Hans Christian, "On Electro-Magnetism", *Annals of Philosophy* 2 (N.S.) (Noviembre, 1821), pp. 321-337.
- Ørsted, Hans Christian, "Thermo-Electricity", en D. Brewster (ed.), *Edinburgh Encyclopaedia*, Edimburgo 18 (1830) pp. 573-589.
- Pfaff, Christoph Heinrich, *Der Elektromagnetismus. eine historisch-kritische Darstellung der bisherigen Entdeckungen auf dem Gebiete desselben, nebst eigentümlichen Versuchen*, Perthes und Besser, Hamburg 1824.
- Poggendorff, Johann Christian, "Physisch-chemische Untersuchungen zur näheren Kenntnis des Magnetismus der voltaischen Säule", *Isis, oder Encyclopädische Zeitung (Oken)*, (1821), pp. 687-710.
- Poggi, Stefano & Bossi, Maurizio (ed.), *Romanticism in science: science in Europe, 1790-1840*. Boston studies in the philosophy of science, Kluwer, Dordrecht 1994.
- Poppe, Kurt, "Johann Wilhelm Ritter, der Physiker der Romantik", *Die Drei. Anthroposophische Zeitschrift zur Erneuerung von Wissenschaft, Kunst und sozialem Leben* 29 (1959), pp. 29-38.
- Popper, Karl Raimund, *Logik der Forschung*, Julius Springer, Viena 1934.
- Porter, Roy & Teich, Mikulás (ed.), *Romanticism in national context*, Cambridge University Press, Cambridge 1988.

- Ritter, Johann Wilhelm, *Beweis, dass ein beständiger Galvanismus den Lebensprozess in dem Thierreich begleite. Nebst neuen Versuchen und Bemerkungen über den Galvanismus*, Industrie-Comptoir, Weimar 1798.
- Schulz, Reinhard, “Gibt es für die Romantik eine spezifische naturwissenschaftliche Experimentierpraxis? Die Auffassungen von Goethe, Schelling, Ritter und Treviranus zur Naturforschung um 1800”, *Philosophia Naturalis* 30 (1993), pp. 254-277.
- Schweigger, Johann Salomo Christoph, “Zusätze zu Ørstedts elektromagnetischen Versuchen, vorgelesen in der naturforschenden Gesellschaft zu Halle den 16. September 1820”, *Journal für Chemie und Physik (Schweigger)* 31 (1. Heft (Enero, 1821)), pp. 1-17.
- Shaffer, Elinor S. (ed.), *The third culture: Literature and science*. European cultures: Studies in literature and the arts, de Gruyter, Berlín 1998.
- Snelders, H. A. M., “Ørsted’s discovery of electromagnetism”, en A. Cunningham y N. Jardine (ed.), *Romanticism and the Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge 1990, pp. 228-240.
- Söderbaum, Hendrik Gustav (ed.), *Jacob Berzelius: Bref - Lettres*, Almqvist & Wiksells boktryckeri, Uppsala 1912-32.
- Steinle, Friedrich, “Looking for a “simple case”: Faraday and electromagnetic rotation”, *History of Science* 33, (1995), pp. 179-202.
- Steinle, Friedrich, “Entering New Fields: Exploratory Uses of Experimentation”, *Philosophy of Science* 64 (Supplement) (1997), S65-S74.
- Steinle, Friedrich, “... et voilà une nouvelle théorie d’aimant”: Ampères Weg zur Elektrodynamik”, en R. Thiele (ed.), *Mathesis: Festschrift zum siebzigsten Geburtstag von Matthias Schramm*, GNT-Verlag, Berlín 2000, pp. 250-281.
- Steinle, Friedrich, “Challenging established concepts: Ampère and exploratory experimentation”, *Theoria: revista de teoria, historia y fundamentos de la ciencia* 17, (2002), pp. 291-316.
- Steinle, Friedrich (en prensa-a), *Explorative Experimente. Ampère, Faraday und die Ursprünge der Elektrodynamik*, Franz Steiner Verlag, Stuttgart.
- Steinle, Friedrich (en prensa-b), “The practice of studying practice: Analyzing research records of Ampère and Faraday”, en F. L. Holmes, J. Renn y H.-J. Rheinberger (ed.), *Reworking the bench: Research notebooks in the History of Science*, Kluwer, Dordrecht.
- Uerlings, Herbert (ed.), *Novalis und die Wissenschaften*. Schriften der Internationalen Novalis-Gesellschaft, Niemeyer, Tübingen 1997.
- van Fraassen, Bas C., “Theory construction and experiment: An empiricist view.”, en P. D. Asquith y R. N. Giere (ed.), *PSA 1980: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*, Philosophy of Science Association. vol.2, East Lansing 1981, pp. 663-677.
- Wetzels, Walter D., *Johann Wilhelm Ritter: Physik im Wirkungsfeld der deutschen Romantik*, de Gruyter, Berlín 1973.
- Wetzels, Walter D., “Johann Wilhelm Ritter: Romantic physics in Germany”, en A. Cunningham y N. Jardine (ed.), *Romanticism and the Sciences*, Cambridge University Press, Cambridge 1990, pp. 199-212.
- Williams, Leslie Pearce, “Ørsted, Hans Christian”, en C. Gillispie (ed.), *Dictionary of Scientific Biography*. 10, (1974) pp. 182-186.