

El Magnetismo Rotatorio de Arago

Carles Paul Recarens

Departamento de Mecatrónica. Sección Física, ESUP, 08302, Mataró.

paul@tecnocampus.cat

Albert Serra Valls

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Venezuela.

albert@innovem.cat

Abstract

El conocido astrofísico Carl Sagan comentaba: “Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología en la que nadie sabe nada de estos temas. Ello constituye una fórmula segura para el desastre”. Sobretudo cuando este conocimiento científico y tecnológico proviene del electromagnetismo. Es conocido que los orígenes del electromagnetismo se remontan a los experimentos de Oersted, pero casi nadie conoce la gran contribución que efectuó Francesc Arago al desarrollo del electromagnetismo. En este artículo demostramos que los experimentos de Arago contribuyeron de forma decisiva al pensamiento teórico de André Marie Ampere. Culminando en el experimento decisivo del disco de Arago, donde se muestra el magnetismo de rotación, precursor del disco de Faraday y origen de la tecnología electromagnética.

1. Francesc Aragó, los orígenes de un científico.

Los acontecimientos históricos, al igual que la ciencia, están sometidos al principio de causalidad, hay un antes y un después, una causa y un efecto. La invención de la pila de Alessandro Volta, a comienzos de 1800, fue la causa de los nuevos descubrimientos en electromagnetismo, que se inician con el disco de Aragó hacia el 1825. Provocando que el siglo XIX fuera el siglo de las ciencias físicas y el lanzamiento de una nueva revolución científica, la revolución de las máquinas eléctricas.

Por los escritos que a menudo circulan dentro de los ámbitos científicos, Francesc Aragó no es recordado en la historia de la ciencia como se merece. Se le relaciona en ciencia como hábil astrónomo y como un colaborador de Fresnel y Fizeau. Incluso con el experimento de la medida de la velocidad de la luz, que daría paso, más tarde, a la teoría de la relatividad. También es conocido como personaje público dentro del gobierno francés de la revolución de 1848. Sin embargo no suelen encontrarse escritos sobre su talante científico. En cambio, es sin duda el personaje más conocido en su época, dentro y fuera de Francia, por el descubrimiento del disco que lleva su nombre, el disco de Aragó. Disco que abre la puerta al camino del electromagnetismo, al disco de Faraday y a la teoría de la relatividad.

Aragó estaba dotado de una gran cultura científica, de una gran curiosidad intelectual y de una destreza manual envidiable. Asimismo poseía una atractiva capacidad oratoria. Encontró el tiempo necesario para interesarse en la astronomía, geofísica, meteorología, termodinámica, óptica, fotografía y electromagnetismo, destacando enormemente en este último campo científico. Desarrolló una larga carrera científica de 1805 hasta su muerte en 1853.



Ilustración 1: Francesc Aragó i Roig

Se debe tener en cuenta que en la Francia de mediados del siglo XIX ya existía una fuerte tradición científica, debido sobre todo a la presencia de grandes instituciones

científicas, como la Academia de Ciencias desde el año 1666, la Escuela de Puentes y Caminos fundada en 1747 y la Escuela de Minas en 1783. Otros, como la Escuela Politécnica, la Escuela Normal Superior y la oficina de longitudes que databan de la revolución francesa. Precisamente la época de la revolución permitió el acceso a la educación de las clases medias y más desfavorecidas, promoviendo el desarrollo social y el creciente interés en la ciencia.

Francesc Joan Domènec Aragó y Roig nació el 26 de febrero de 1785 en Estagel (Pirineos Orientales), situado a 25 kilómetros de Perpiñán. Su padre, Francesc Raymond Bonaventura Aragó, (1754-1814), era una persona instruida, obtuvo el título de bachiller en derecho por la Universidad de Perpiñán donde fue partidario de la revolución francesa desde el comienzo y se convirtió en el alcalde del pueblo de Estagel, entre otros cargos públicos. Tomó una parte activa en la resistencia contra los españoles que invadieron el Rosellón durante la Guerra de los Pirineos o Guerra de la Convención, declarada por la República Francesa contra España el 7 de marzo de 1793.

En 1796 la familia Aragó se traslada a Perpiñán donde Francesc Aragó inicia sus estudios en la escuela municipal. La casualidad lo hace coincidir, paseando por Perpiñán, con un joven oficial de ingeniería (François Cellini de Creyssac) que se encuentra dirigiendo unas reparaciones en la muralla de la ciudad. Después de intercambiar unas palabras, Cellini le cuenta que ha conseguido la titulación en la Escuela Politécnica (Ecole Polytechnique de París) y que se accede mediante un examen de ingreso. El programa del examen el gobierno lo envía cada año a la administración local y se encuentra publicado en la biblioteca de la escuela central.

Aragó se interesa enormemente y sin dudar lo se dirige a leer el programa. Tan pronto conoce cuáles son los conocimientos que se exigían a los candidatos, abandona las clases en la escuela central, donde sobretodo se enseñaba literatura francesa, en detrimento de las matemáticas. Entonces decide estudiar por su cuenta los grandes maestros como Legendre, Lacroix y Garnier. Recibe la ayuda en matemáticas de Hippolyte Raynal, matemático amateur y amigo de su padre, que le da clases para superar los estudios. Se esfuerza intensamente durante un año y medio para pasar el programa de admisión que se realizará en Montpellier, dirigido por Gaspar Monge.

Desgraciadamente Monge se encuentra indispuerto y escribe a los examinadores que la prueba de ingreso se realizará en París. Aragó con dieciséis años y también indispuerto no puede viajar a París. Así que no le queda más remedio que esperar al año siguiente.

Durante este año de 1802 continúa estudiando matemáticas, sobre todo *L'Introduction à l'analyse infinitésimale* de Euler la *Résolution des équations numériques*, la *Théorie des fonctions analíticas*, la *Mécanique analytique* de Joseph Louis Lagrange y la *Mécanique Celeste* de Pierre Simon Laplace y *Mémoire sur la manière de distinguer les Maxima des Minima dans le Calcul des Variations* y *Mémoire sur les Intégrations par arcs d'ellipse* de Andren Marie Legendre.

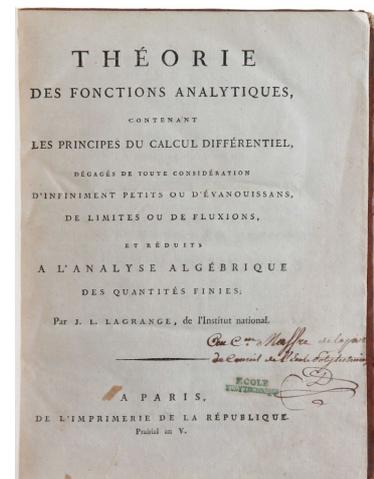


Ilustración 2: Cálculo Diferencial de Lagrange

Finalmente en 1803 Aragó se presenta al examen de ingreso en Toulouse, con Gaspar Monge. Responde perfectamente y con elegancia a las cuestiones de álgebra y análisis. Tanto es así, que Monge le sitúa en la primera posición de su lista.

A finales de 1803 entra en la Escuela Politécnica de París. Los conocimientos que se imparten de análisis matemático, ya los conoce todos, debido a los estudios preparatorios que ha realizado por su cuenta. Un acontecimiento importante sucedió cuando llegó el momento de hacer el examen de matemáticas para pasar de una división de la Escuela a otra. El examinador no era otro que Legendre, del que Aragó había estudiado profundamente sus memorias matemáticas.

Mientras espera para examinarse se encuentra ante sí un alumno totalmente abatido saliendo del examen oral. En cuanto entra Aragó observa ante sí a Legendre, que le pregunta bruscamente:

- ¿Cómo se llama usted?
- Aragó.
- Entonces usted no es francés?
- Si no fuera francés no estaría aquí delante de usted, pues no hay nadie que entre en la

Escuela sin tener la nacionalidad.

- Mantengo que no es francés ya que se dice Aragón.
- Sostengo que soy francés y un buen francés, a pesar de que mi nombre os sea extraño.
- Está bien, está bien, no discutimos más este punto y pasemos a la pizarra.

Apenas con la tiza en la mano, Legendre le replica

- Vos debéis ser de los departamentos recientemente unidos a Francia.
- No Señor, soy del departamento de los Pirineos Orientales, al pie de los Pirineos.
- Porque no me lo ha dicho antes, eso lo explica todo. Así usted es de origen español?
- Posiblemente, pero en mi humilde familia no conservamos las piezas auténticas que me puedan permitir remontarnos al estado civil de mis antepasados: cada uno es hijo de sus obras.

Volviendo al examen, Aragón empieza a resolver un problema utilizando integrales dobles y Legendre lo detiene diciendo que este método no se encuentra en el temario impartido por el profesor. Donde la ha aprendido? le pregunta Legendre y Aragón contesta que en una de sus memorias matemáticas.

-He elegido este método porque me parece mejor que lo explicado en clase.

Ante esta respuesta halagadora Legendre queda convencido de los conocimientos de Aragón, siendo este acontecimiento el comienzo de una buena amistad. Rápidamente Aragón se convierte en un alumno brillante y el primero de su promoción.



Ilustración 3: Instituto de Francia

El 26 de octubre de 1810 imparte su primera clase en la Escuela Politécnica, *Análisis aplicado a la geometría* a petición de Gaspar Monge. En 1812 es nombrado profesor adjunto y en 1816 profesor a tiempo completo. En 1818 imparte una nueva disciplina, la

Aritmética Social, que aplica el cálculo de probabilidades desarrollado por Laplace a la demografía y la economía. Lecciones que le serán útiles más adelante en cuanto sea representante de la Cámara de los Diputados.

Las cualidades de Arago son sus habilidades manuales, sus estudios matemáticos y su gran curiosidad. Estas características le fuerzan de forma natural a participar activamente en casi todas las novedades científicas de mediados del siglo XIX. Es por ello que la actividad científica de Arago es abundante y variada. Sus dotes esenciales son de experimentador y observador, dejando para los demás la búsqueda de las teorías. Tiene un gran entusiasmo por todos los nuevos dominios de la ciencia y se precipita en la búsqueda e investigación en los campos de la astronomía, la geodésica, meteorología, geofísica, la naturaleza de la luz y esencialmente sobre electromagnetismo que es el que nos ocupa en este artículo.

2. El descubrimiento de la Pila de Volta.

Arago se encuentra inmerso en la época y el lugar idóneo para el nacimiento de la nueva teoría del electromagnetismo. En los primeros días del año 1800, cerca de la ciudad de Como, aparecen unos extraños artefactos amontonados uno sobre el otro, un disco de cobre, un disco de zinc y un paño mojado, un disco de cobre, un disco de zinc y un paño mojado y así sucesivamente, uno sobre el otro sin interrumpir este orden. Todo este conjunto forman un montón uniforme de discos de cobre y zinc emparejados y separados por un paño mojado en una solución salina y también en forma de disco. Junto al artefacto se encuentra una carta dirigida a Sir Joseph Banks, presidente de la Royal Society de Londres.

El creador de este artefacto es Alessandro Volta y la disposición de su invento ha pasado a la historia como la pila de Volta. Nada hace pensar en este momento de la importancia del artefacto, pero se convertirá en el aparato más utilizado y imprescindible que ha generado la ciencia de los humanos. Uniendo los extremos de la pila por un hilo conductor se obtiene una fuente continua de electricidad, sin interrupciones durante un considerable tiempo. Inicialmente su principal utilidad es en

experimentos de química, física y fisiología.

El gran descubrimiento de la batería eléctrica o pila de Volta, no se produce por casualidad. Volta era amigo de Luigi Galvani, médico, fisiólogo y físico, que descubrió la electricidad animal el 1780. El galvanismo, nombre que se dio a la actividad eléctrica producida en los organismos animales, se convirtió en un gran suceso tanto científico como social.



Ilustración 4: Alessandro Volta

Durante mucho tiempo aparecieron varias leyendas sobre cómo Galvani había llegado al descubrimiento del fluido vital eléctrico. Anécdotas ridículas como explica Alibert¹ en su *Èloge històriques de Galvani* o el mismo Aragó² en *Èloge històriques de Volta*

"El descubrimiento inmortal de la batería se encuentra conectado al resfriado leve de una señora Boloñesa en 1790 y a las ranas, por el caldo que el médico prescribió como remedio. Algunas ranas, ya desnudas por el cocinero de la señora Galvani y estiradas en una mesa justo en el momento que por casualidad se descargó lejos una máquina eléctrica. Los músculos, aunque no habían sido golpeados por la chispa, se sentían en el momento de la descarga, fuertes contracciones "

Por error el editor escribió 1790 cuando tenía que ser el 1780. Louis Figuier³ en *Les Merveilles de la Science* comenta que había recogido veintiuna variantes de cómo esta historia era contada. Lo cierto es que el propio Galvani lo explica en una memoria⁴ en latín, donde intervienen el factor suerte y una máquina eléctrica de generación electrostática de alto voltaje.



Ilustración 5: Pila de Volta

¹ J.L. Alibert. *Èloge històriques de Louis Galvani*.1801

² F. Aragó. *Èloge històriques de Volta*. Obras completas. Paris. 1854

³ Louis Figuier. *Les Merveilles de la Science ou description populaire des inventions modernes*. Paris.1867

⁴ Aloysii Galvani. De Viribus Electricitatis in Motu Musculari. 1790. pp 363

Luigi Galvani era profesor de anatomía en la universidad de Bolonia, fisiólogo anatomista y familiarizado con la electricidad estática, se interesaba también por la química orgánica y la física aplicada. Preocupado durante mucho tiempo por el estudio de las funciones del sistema nervioso estaba convencido de la acción de la electricidad en los fenómenos de la vida y decidido a buscar esta influencia en los órganos de los



Ilustración 6: Luigi Galvani

animales. Albrecht von Haller (1708-1777) fisiólogo suizo, ya había demostrado que los músculos eran irritables, dado que cuando recibían un estímulo a través de los nervios se contraían. Galvani hacía tiempo que trabajaba con ranas, el 2 de abril de 1772 había publicado un estudio sobre la irritabilidad halleriana, el 22 de abril de 1773 sobre los movimientos musculares de las ranas y el 20 de enero de 1774 otro sobre la acción del opio en los nervios de las ranas. Así que Galvani estaba preparado para hacer el descubrimiento

más importante de su época, aunque fuera por casualidad.

Este suceso lo explica con detalle Luis Figuiet a partir del original escrito en latín por Galvani.

"Una noche de 1780, Galvani se encuentra en su laboratorio con algunos estudiantes ocupados en repetir los experimentos de irritabilidad nerviosa de los animales de sangre fría, en particular de las ranas. El procedimiento consistía en despojar rápidamente de su piel las ranas mientras estaban vivas para separar inmediatamente, de un golpe de cincel, los miembros inferiores de los superiores, conservando solamente los dos nervios del muslo. El laboratorio también servía para experimentos de física y disponía de una máquina eléctrica electrostática. Al tiempo que Galvani se disponía a efectuar el experimento con ranas otro alumno se disponía a efectuar experimentos de física con la máquina electrostática. Esta coincidencia fortuita, derivada del azar, fue el comienzo del dominio de las máquinas eléctricas.

Después de haber hecho la preparación a la rana, Galvani la pone sin ninguna intención particular sobre la mesa de madera que servía de soporte a la máquina electrostática, para salir del laboratorio e ir a otra parte de la casa.

Uno de los ayudantes de Galvani, para terminar de comprobar la disección y la separación de los nervios de la rana, los tocó con su escalpelo. A continuación, los miembros inferiores del animal entraron en contracción, como si estuvieran poseídos de una convulsión tetánica. Generando inmediatamente este fenómeno insólito una gran sorpresa a las personas que se encontraban en ese momento en el laboratorio."

Lucia Galeazzi Galvani, esposa de Luigi Galvani observó que las contracciones de la rana se produjeron en el instante preciso en que la máquina electrostática descargaba una chispa eléctrica. Inmediatamente reconoció que el efecto observado era la manifestación de la electricidad como fluido vital o electricidad animal. En aquella época la electricidad más conocida era producida por algunos animales y las botellas de Leyden eran consideradas órganos artificiales capaces de acumular este fluido vital eléctrico.



Ilustración 7: Máquina Electrostática

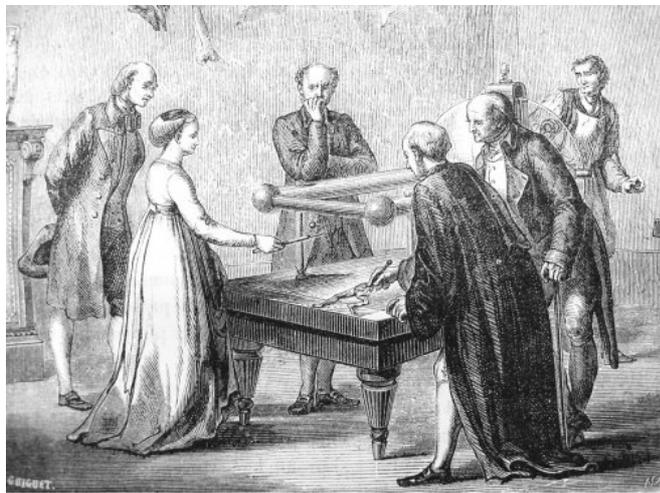


Ilustración 8: Movimiento músculo rana

Pronto se llamó galvanismo a la teoría de Luigi Galvani. El galvanismo presupone que el cerebro de los animales produce electricidad que circula por los nervios y se acumula en los músculos, que producen el movimiento o contracción de los miembros. Esta inaudita, hasta entonces teoría, se convirtió en la nueva investigación científica de Europa. Utilizada para estudiar los orígenes y principios de la vida y para aplicar nuevas terapias médicas. Erasmus Darwin, abuelo de Charles Darwin, fue un gran impulsor del galvanismo⁵, afirmando que la fuente de todo movimiento en los animales es "el espíritu de animación, único en la vida orgánica". Darwin y Galvani creían en un organismo entendido como un sistema dinámico de comunicación mediante la electricidad y con una organización interna gobernada por el cerebro.

⁵ Darwin, Erasmus. *Zoonomia, Or the Laws or Organic Life*. London.1801.

El galvanismo se apoderó del panorama cultural europeo del siglo XIX. De la mano de Schelling, Hegel, Schopenhauer, Ritter y Muller el galvanismo aparece como el germen de una nueva filosofía de la naturaleza. Las teorías de Luigi Galvani y Erasmus Darwin afectan el pensamiento alemán, sobre todo a Ritter y Muller. Emerge una corriente filosófica como una alternativa radical al mecanicismo newtoniano, creyendo en un nuevo principio de la vida. La electricidad se considera como un fluido vital, que conduce los movimientos humanos en contraposición al pensamiento mecanicista de engranajes y poleas. Aparece el romanticismo⁶ para designar a todos aquellos que el pensamiento neoclásico ya no les satisface. El espíritu de aventura romántico es una visión de pasión y riesgo de la vida, sin excluir el razonamiento y la realidad. Define a un nuevo hombre que siente y sin embargo puede pensar. La imaginación emerge como una potente herramienta, que conjuntamente con los medios adecuados, puede revelar la realidad y belleza de la naturaleza como un único ente.

Esta nueva filosofía y pensamiento del romanticismo impulsa nuevas ideas científicas que al mismo tiempo la refuerzan. Se crea una realimentación entre la filosofía de la vida y la ciencia. De esta unión surge precisamente la idea del control de la vida por la ciencia. Los efectos de la pila de Volta aplicados a los cuerpos inertes generaron el mito de Frankenstein por Mary Shelley. En el preámbulo de la primera edición de la novela *Frankenstein o el moderno Prometeus*, en 1818, Mary Shelley se refiere al galvanismo y los experimentos de Erasmus Darwin como impulsores de la idea para su novela.

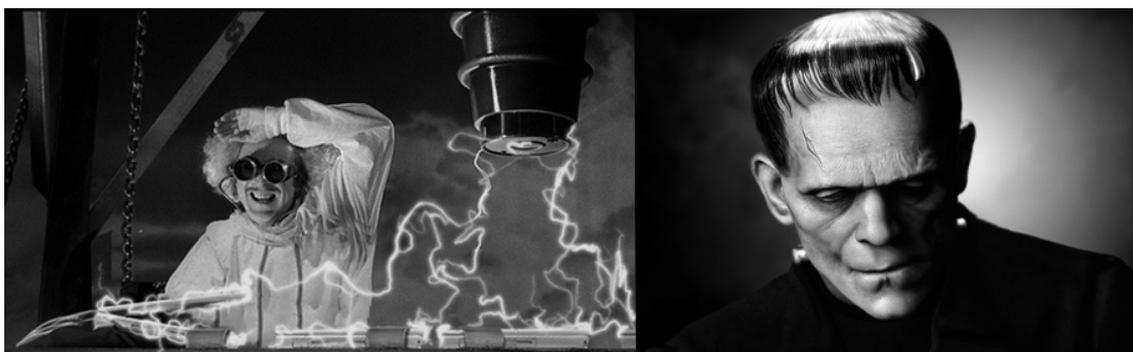


Ilustración 9: Dr. Frankenstein y el Monstruo

⁶ Jaques Barzun. *Del amanecer a la decadencia: 500 años de vida cultural en occidente*. Ed Taurus.2001

Alessandro Volta escribe una carta dirigida a Sir Joseph Banks, presidente de la Royal Society de Londres. La carta llega el mes de abril de 1800 aunque incompleta. Pero con los suficientes datos para que Joseph Banks lo comunique en secreto a Antony Carlisle, Cruikshank y Humphry Davy para que puedan construir su propia pila eléctrica y experimentar con ella. Joseph Banks impone la condición de que no comuniquen sus resultados experimentales hasta que no se pueda publicar la carta entera, a fin de mantener los derechos de la prioridad del descubrimiento de Volta. La comunicación oficial se hace públicamente el 26 de junio de 1800 en la Royal Society, conjuntamente con una gran cantidad de experimentos realizados por los que habían dispuesto de la información privilegiada del nuevo aparato.

Desde el primer momento que se tuvo conocimiento de la fabricación de la pila aparecieron detractores de las ideas de Volta sobre cuál era la verdadera esencia de la fuerza electromotriz de la pila. Davy y Wollaston, en Inglaterra, Gautherot, en Francia y Parrot en Rusia. Volta sintió la necesidad de defender su teoría y para dar a conocer su teoría decidió que el lugar adecuado era París, centro mundial de la ciencia entonces. Así, a finales de 1800, Volta conjuntamente con su amigo Brugnatelli se dirige a París para discutir con otros especialistas los fenómenos eléctricos de la pila. Del 18 al 20 de noviembre de 1800 mostró diferentes experiencias ante la Academia de Ciencias. Aragón se encuentra en la sala y no se pierde ninguna de las sesiones, pues se siente muy atraído por los experimentos de Volta. Así lo comenta en sus memorias⁷.

"La producción de electricidad por el mero contacto de metales diferentes es uno de los hechos más grandes y establecidos de la ciencia física ... y ahora estos medios están en manos de todos los experimentadores, y es gracias al genio de Volta que lo ha hecho posible"

"[La pila de Volta] ... esta masa aparentemente inerte, este extraño ensamblaje, esta pila de tantas parejas de metales diferentes separados por un poco de líquido es, por la singularidad de los efectos, el instrumento más maravilloso que el hombre nunca ha inventado, sin exceptuar el telescopio y la máquina de vapor "

Tal es la expectación de estos nuevos experimentos, que el cónsul Napoleón Bonaparte asiste a la segunda sesión quedando enormemente sorprendido y pidiendo que repita los experimentos en una sesión particular. Impresionado, Napoleón como miembro del

⁷ F. Aragón. Notas biográficas. pp 200.

Instituto Francés, propone conceder a Volta una medalla de oro para conmemorar el descubrimiento de la pila. Pide que se establezca una comisión que repita todas las experiencias. Esta comisión se encuentra formada por Laplace, Coulomb, Hallé, Monge, Fourcroy, Vauquelin, Pelletan, Charles, Brisson, Sabatier, Guyton y Biot, que después de repetir los experimentos de Volta⁸, concluyen:

"... Proponemos ofrecer al ciudadano Volta la medalla del Instituto, en oro, como un testimonio de la clase de satisfacción por los descubrimientos que ha enriquecido la teoría de la electricidad, y como prueba de su reconocimiento por haberlas comunicado"



Ilustración 10: Volta y Napoleón

La idea central de Volta es que su pila sea un sustituto de las botellas de Leyden, para mejorar los experimentos y las aplicaciones a la anatomía y fisiología. Volta está convencido de que la pila es una botella de Leyden con la propiedad de autocargarse después de cada descarga o emisión del fluido eléctrico, actuando como un órgano eléctrico artificial. Volta nunca imaginó la gran importancia que tendría en los acontecimientos posteriores de la ciencia y la técnica su inmortal descubrimiento.

La pila de Volta sin embargo, tenía el inconveniente de que el peso de los discos comprimían el paño húmedo y producían cortocircuitos. William Cruickshank, profesor de química en la Royal Military Academy de Woolwich, en las inmediaciones de 1802 resolvió el problema girando los elementos de la pila en una caja y sustituyendo la solución salina por ácido sulfúrico. Al mismo tiempo William Hyde Wollaston

⁸ Biot. Rapport sur les expériences du citoyen Volta. Mathématiques et Physiques. 1801.

desarrolla sus ideas sobre la electricidad construyendo una versión particular de la pila de Volta. Descubre la diferencia entre la electricidad galvánica y la electricidad por frotamiento, esta última producida por los generadores electrostáticos.



Ilustración 11: Batería de Cruickshank

La pila de Volta es un nuevo aparato que produce una gran corriente a un bajo voltaje de forma continua, en cambio las máquinas eléctricas de corriente electrostática proporcionan un alto voltaje a baja corriente y de forma discontinua. La particularidad de la pila de Volta de poder dar una elevada intensidad continúa creó la posibilidad de ver fenómenos electromagnéticos que de otra manera era imposible de observar.

Así comenzó una carrera tecnológica para ver quien construía la pila de Volta más grande siguiendo la estructura de Cruickshank. Con esta nueva disposición no apilada era posible aumentar el número de elementos de la batería y por lo tanto aumentar los metros cuadrados de superficie de las placas metálicas, consiguiendo un aumento de la tensión y la intensidad.

3. La conquista de la pila más grande.

Cuando Humphry Davy, en 1802 accede a la cátedra de química de la recién fundada Royal Institution de Londres en 1799, se dispone a construir una pila más grande para sus experimentos. Construye una de 400 pares de 5 pulgadas cuadradas y 40 pares de 1 pie cuadrado, con la que realiza la mayor parte de sus exitosos experimentos de

electrólisis. El 20 de noviembre de 1806 Davy imparte la que será su primera conferencia Bakeriana⁹, en un local de la Royal Society lleno de gente que esperaban oír hablar sobre descubrimientos en gases, geología o agricultura química. Pero en cambio Davy anuncia el uso de la nueva pila voltaica en un campo completamente nuevo, el del análisis electroquímico y promete que encontrará nuevos materiales hasta entonces desconocidos utilizando el nuevo instrumento de la pila voltaica.

La conferencia causó un gran impacto mundial y durante los siguientes cuatro años Davy continuó utilizando las conferencias para dar a conocer sus avances. En otoño de 1807 consiguió aislar los elementos metálicos sodio y potasio. Poco después de su segunda conferencia Bakeriana, el 19 de noviembre de 1807, cayó gravemente enfermo, eso imposibilitó continuar con su labor durante más de dos meses. La batería que había estado utilizando en los experimentos y demostraciones ya tenía cinco años. Habían efectuado intentos de mejorar el rendimiento utilizando diferentes combinaciones galvánicas con el mínimo coste posible. Pero la verdad era que la pila estaba bastante desgastada y no se podían seguir haciendo más experimentos, sobre todo aplicar la pila a la descomposición de las tierras y los óxidos metálicos que se le resistían.

La Royal Institution en 1808 se encuentra con una importante falta de financiación y decidió abrir una suscripción popular para construir una batería voltaica a gran escala. En Francia los trabajos de Gay-Lussac y Thenard, para construir una gran pila voltaica, estaban casi a punto al igual que para Berzelius en Estocolmo. Preocupado por perder la primacía en este nuevo campo científico de la electroquímica y conociendo que París podría tener una batería de superior potencia, Davy apeló a la rivalidad entre Inglaterra y Francia para proclamar que Londres no podía perder la hegemonía científica¹⁰.

"Un nuevo camino de descubrimientos se nos abre con la acción de la electricidad de la pila de Volta, que nos promete traer grandes avances en la Química y la Filosofía Natural, y las artes útiles relacionadas con ellas; y como el aumento de las dimensiones del aparato es absolutamente necesario para conseguirlo, se propone elevar un fondo por suscripción, para construir una potente batería, digno de un establecimiento nacional y capaz de promover los grandes retos de la ciencia.

⁹ Humphry Davy. The Bakerian Lecture, on some chemical Agencies of Electricity. Phil. Trans.R.Sol.Lod. 97,1-56.1807

¹⁰ Patrick Unwin, Robert Unwin. Humphry Davy and the Royal Institution of Great Britain. Notes Rec. R.Soc. **63** pp7-33. 2009

En otros países se han previsto suficientes medios públicos para continuar las investigaciones. Éstas han tenido su origen en este país, y sería deshonoroso para una nación tan grande, tan poderosa y tan rica, que por falta de recursos económicos se tuvieran que completar en el extranjero.

Pido a las personas instruidas que este campo de investigación no caiga en vano. Se propone que el instrumento y aparato se construya en el Laboratorio de la Royal Institution, donde será empleado en el adelanto del nuevo departamento de ciencia ".

En las biografías de la época se comenta que para gran satisfacción de Davy y por el honor del país, la lista de suscriptores fue rápidamente completada y la mayor batería jamás construida, enseguida se puso en funcionamiento¹¹. Pero en realidad no sucedió de esa manera. Varios patrocinadores se comprometieron a hacer un donativo, pero pocos cumplieron este compromiso, por ejemplo Henry Cavendish se comprometió con £30 que no pagó nunca¹². No es hasta el 12 de julio de 1810 que Davy se refiere a los últimos experimentos realizados con la nueva batería. Así que transcurren unos 18 meses entre la petición en la Royal Institution y la puesta en funcionamiento de la pila siguiendo el diseño de Wollaston. Estaba formada por 200 grupos unidos entre sí por 10 pares de placas y cada placa tenía 32 pulgadas cuadradas. La batería era la más potente de su época y generaba 2.200 voltios.

Los experimentos sobre descomposición electroquímica habían causado una fuerte impresión a Napoleón, que honró al genio de Davy por sus descubrimientos anunciados en las Transacciones Filosóficas de 1807. Se acordó conceder un premio extraordinario de 60.000 francos para promover y compartir el conocimiento científico, pero solo se concedieron 3000 dada la guerra existente entre Francia e Inglaterra. El bloqueo naval impuesto por Inglaterra imposibilitó que llegara a Davy la notificación del premio enviada por Delambre (secretario general del Instituto). A pesar de todo Davy recibió el honor ya que cinco años después, en octubre de 1813, embarcó con su mujer y su protegido Michael Faraday hasta llegar a París donde recibió la medalla del honor.

¹¹ J.A.Paris, The Life of Sir Humphry Davy, 2 vols. London 1831.

¹² Patrick Unwin, Robert Unwin. A devotion to the experimental sciences and arts: the subscription to the great battery at the Royal Institution 1808-9. BJHS 40(2):181-201. June 2007.

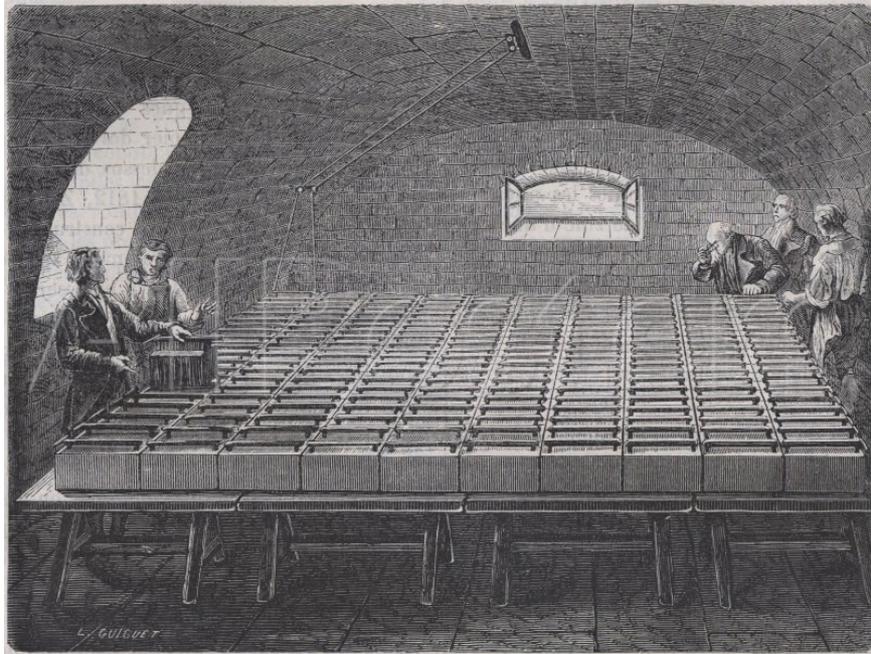


Ilustración 12: Pila en la Royal Institution. Londres

A pesar del reconocimiento a Davy por Napoleón, éste se enfadó y preguntó:

- Por qué estos descubrimientos no se han realizado en Francia?

Louis Berthollet que acompañó a Napoleón en su expedición militar y científica en Egipto en 1798, le explicó que en Francia no había una pila suficientemente potente como la Inglesa.

-Bueno, pues construiremos una de potente y que no se ahorre en cuidados ni gastos.

Contesta Napoleón.

Gay-Lussac y Thenard en 1813 instalaron en la Escuela Politécnica una pila de 600 elementos formados por parejas de placas de cobre y zinc de 9 decímetros cuadrados por cada placa, la de cobre pesaba 1 kg y la de zinc 3 kg . Toda la batería tenía 54 metros cuadrados de superficie.

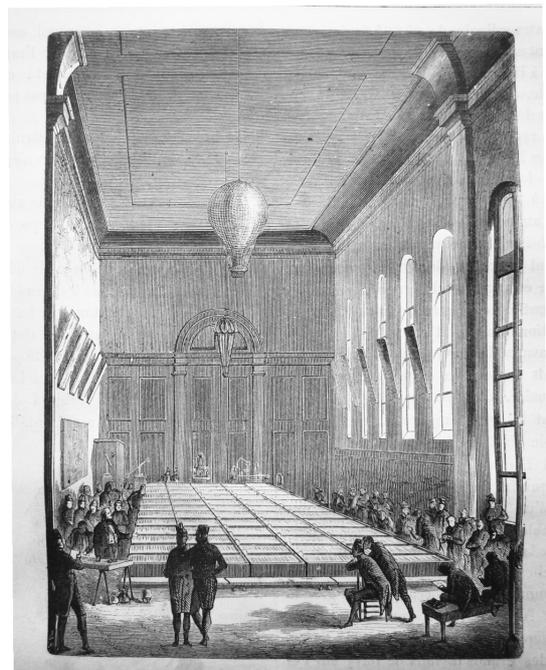


Ilustración 13: Batería en el Polytechnique de Paris

Por supuesto, existían otras baterías eléctricas en toda Europa y la más parecida en potencia era la de Ginebra. Estas grandes pilas se pueden considerar los gigantes tecnológicos de su época, el equivalente a la "big science" de nuestros días. Como el acelerador de partículas LHC (Large Hadron Collider) del CERN. El parecido es casi total. En la década de 1810 la lucha entre Francia e Inglaterra para ser el primero en lograr descubrir nuevos elementos mediante la descomposición electroquímica propició la construcción de grandes pilas eléctricas. En la década de 1950 la guerra fría entre Estados Unidos y Rusia dio paso a la conquista del espacio hasta conseguir llegar a la Luna en 1969. En la década de 2010 la carrera entre el CERN (Europa) y el Fermilab (Estados Unidos) por ser el primero en detectar la partícula de Higgs, impulsó la construcción del acelerador LHC (CERN) en Europa, y concluyó con el descubrimiento de la partícula de Higgs en 2013, doscientos años después de la construcción de la pila eléctrica en la Escuela Politécnica de París.



Ilustración 15: 1969 Apollo XI despegue a la Luna



Ilustración 14: LHC en el CERN

4. Los experimentos de electromagnetismo.

En la Europa de 1800 la proliferación de las pilas eléctricas proporciona una fuente continua de corriente eléctrica de alta intensidad a baja tensión para numerosos experimentos en electroquímica. Así que la pila de Volta parecía estar predestinada a perfeccionar la química en lugar de la física, pero finalmente fue un instrumento decisivo en la comprensión del electromagnetismo.

Generalmente se cree que el descubrimiento de Oersted sobre la relación entre la electricidad y el magnetismo fue fortuito, mientras daba una clase práctica de física en la Universidad de Copenhague. Los acontecimientos que concluyeron con la unificación de la electricidad y el magnetismo en el electromagnetismo, son bastante más interesantes que una simple casualidad. En 1962 Thomas Kuhn¹³ en su libro *La Estructura de las revoluciones científicas* realiza un análisis completo sobre los fenómenos, tanto sociales como científicos, que determinan el cambio de una teoría antigua por otra de moderna, a lo que denomina Kuhn el cambio de paradigma. Asegurando que las preferencias y creencias de los científicos también condicionan sus teorías científicas. Tal como sucede en este caso.

A principios del siglo XIX, el debate sobre las relaciones entre la electricidad y el magnetismo ya era bastante vivo y con una extensa trayectoria. Los marineros ya habían notado que la brújula cambiaba su polaridad en barcos impactados por rayos. En sus obras completas, Arago¹⁴ comenta que por el año 1675 dos barcos ingleses de viaje de Londres a Barbados¹⁵, a la altura de las Bermudas, un rayo rompió el palo de uno de los barcos y rasgó las velas. Como efecto secundario la brújula cambió su polaridad, marcando el sur en lugar del norte como era habitual, y este estado se mantuvo durante todo el viaje. Otros incidentes con rayos se encuentran documentados y en todos ellos se hace constar la variación de los polos de las brújulas, que puede ser en cualquier ángulo comprendido entre los 0 y 180 grados. Esto hace pensar que estos incidentes eran más habituales de lo que nos podemos imaginar.

Benjamin Franklin había magnetizado agujas descargando una botella de Leyden. Otros habían efectuado experimentos similares pero con resultados discutibles, así que, la creencia habitual en aquella época era que la electricidad y el magnetismo no tenían ningún nexo de unión. En 1802 André-Marie Ampere estaba decidido a demostrar que la electricidad y el magnetismo son dos tipos de fluidos que actúan independientemente uno del otro. En 1807 Thomas Young en sus *Lectures on Natural Philosophy*¹⁶ señala

¹³ Thomas Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago Press. 1962

¹⁴ Arago, Obras completas, pp 423

¹⁵ Anónimo. An Extract of a Letter etc. from Dublin May the 10th, 1676. Philosophical Transactions 1 January 1676.

¹⁶ Robert C. Stauffer. Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism. *Isis* **48**, 1,33-50. 1957

que "no hay ninguna razón para imaginar una inmediata conexión entre el magnetismo y la electricidad". Incluso en 1819 Jean Baptiste Biot al final de un artículo sobre magnetismo nos hace saber que los principios magnéticos y los principios eléctricos son de naturaleza diferente.

En cambio, Oersted, profesor de Filosofía Natural y Secretario de la Royal Society de Copenhague a principios de 1806 publica el trabajo *An Inquiry into the Identity of Chemical and Electrical Forces*¹⁷. En el capítulo 8 considera la idea de la identidad entre el magnetismo y la electricidad. Sugiere que todos los fenómenos de la naturaleza son producidos por un mismo principio, que aparece de muchas formas, como luz, calor, electricidad, magnetismo, etc.

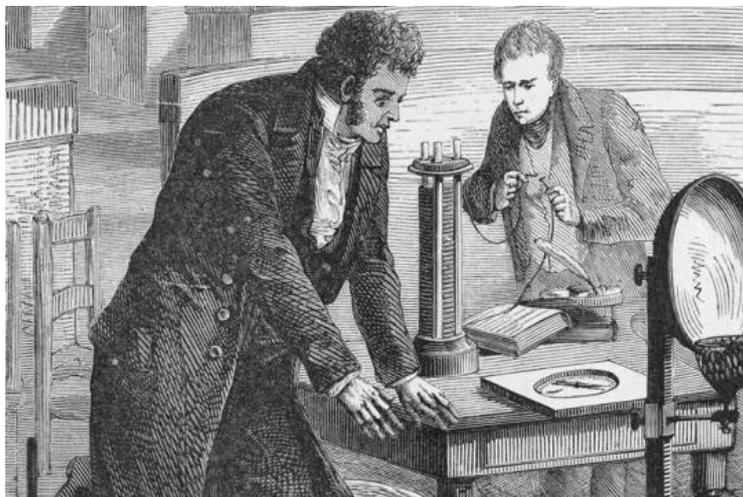


Ilustración 16: Experimentos Oersted

Debemos recordar que las objeciones a la conexión entre electricidad y magnetismo estaban fundamentadas en los resultados experimentales. Contrapuesto a esta visión totalmente mecanicista o racional en Alemania nació un contracorriente llamado Naturphilosophie o Filosofía de la Naturaleza, como corriente filosófica ligada al Romanticismo. Oersted influenciado por esta nueva corriente está convencido de la conexión entre la fuerza magnética y la fuerza eléctrica en una sola fuerza fundamental, como ya había manifestado públicamente a pesar de estar en contra de la opinión general. Por lo tanto podemos decir que el descubrimiento del electromagnetismo no fue casual sino buscado y perseguido, a pesar de que el camino para llegar era totalmente desconocido.

¹⁷ Faraday, Michael. *Historical Sketch of Electro-Magnetism*. *Annals of Philosophy*. Vol II: 195-200, 274-290 1821, Vol III: 107-121. 1822.

Oersted cree que la propagación de la electricidad es una continua alteración y restauración del equilibrio eléctrico. Llega a esta conclusión realizando experimentos donde intervienen la electricidad y el calor. Comprueba que el paso de la corriente eléctrica a través de un conductor produce calor. Con estas observaciones, considera que la transmisión de la electricidad es un conflicto eléctrico entre dos fuerzas opuestas que de momento ignora. Influido por la Naturphilosophie, va más allá, y conociendo que los rayos pueden provocar el giro de la brújula, que los rayos provocan calor y luz y que la corriente eléctrica a través de un conductor provoca calor, concluye que la luz, el calor, la electricidad y el magnetismo son la causa de un mismo fenómeno de la naturaleza aún por descubrir.

El movimiento del Romanticismo que impulsa la unión del hombre con todas las fuerzas de la naturaleza, influyen el pensamiento de Oersted, Davy y Faraday entre otros. Podemos asegurar que la influencia de este pensamiento o corriente filosófica condiciona la experimentación de los científicos y por tanto los resultados obtenidos. Tal como sucedió a los científicos alemanes al final de la primera guerra mundial, donde el desánimo de perder una guerra perfectamente programada, indujo a la creencia en la indeterminación de los sucesos en lugar del determinismo¹⁸.

Oersted pretende resolver esta incertidumbre con un experimento que contiene gran parte de los fenómenos involucrados, la electricidad, el calor, la luz y el magnetismo. Influido por los efectos de los rayos sobre las brújulas, pretende comprobar este fenómeno mediante un experimento utilizando una pila de Cruickshank. Calienta hasta la incandescencia un hilo de platino junto a una brújula, mediante el paso de la corriente eléctrica. Quiere observar la desviación de la aguja de la brújula y lo hace en una de sus clases, pues su investigación en física va en paralelo a las prácticas con los alumnos. En una mañana de primavera de 1820 lo tiene todo preparado para hacer el experimento, justamente por la tarde tiene una clase ante un auditorio de alumnos avanzados en ciencia. El hecho de tener que preparar una clase sobre sus ideas de unificación entre el calor, la luz, la electricidad y el magnetismo lo convencen cada vez más sobre la

¹⁸ Forman, Paul. *Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment*. Historical Studies in the Physical Sciences, Vol 3 (1971), pp.1-115.

existencia de una única fuerza fundamental de la naturaleza.

Oersted espera observar un gran efecto de la desviación de la aguja asociado a la incandescencia, pese a que el efecto se produjo, fue muy débil y no terminó de convencer a la audiencia. Oersted no quedó tampoco convencido del todo, posponiendo la continuación de los experimentos para más adelante. A principios de julio se dedica sin interrupción a los experimentos, hasta llegar a los resultados deseados utilizando una pila más grande y con conductores más gruesos. En este momento queda perplejo y se da cuenta que no es necesario el calor y la luz para desviar la brújula. Solo la electricidad produce un efecto magnético, acaba de nacer del electromagnetismo. Este experimento sorprende enormemente a la comunidad científica y es el punto de partida de la nueva investigación en la relación íntima entre la electricidad y el magnetismo.

Publica su descubrimiento en un primer papel, en julio de 1820, en una memoria de cuatro páginas escritas en latín *Esperimenta circum effectum conflictus electricitatis in Arcum magneticum* (Experiencias relativas a los efectos de conflicto eléctrico sobre una aguja imantada) donde de una forma preliminar anuncia los resultados obtenidos sin mencionar los detalles del experimento.

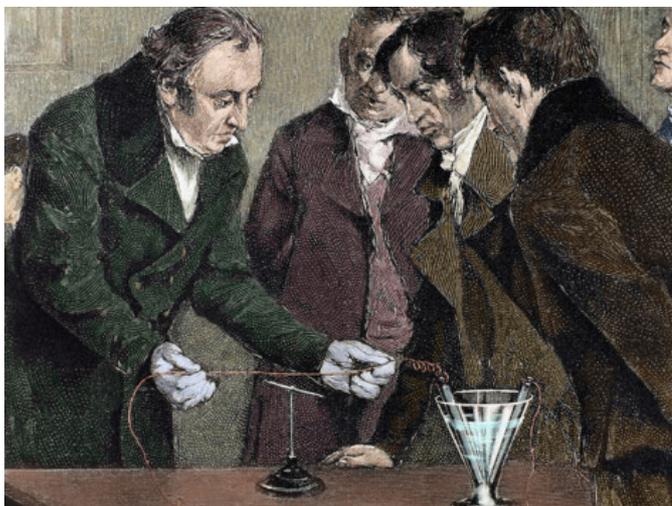


Ilustración 17: Oersted mostrando su descubrimiento sobre electromagnetismo

Precisamente Francesc Aragó se encuentra en Ginebra en 1820 y puede conocer y experimentar el descubrimiento de Oersted gracias a su amigo Pictet. Conjuntamente con otros asiste a la comprobación de los experimentos de Oersted preparados por el profesor Charles Gaspard de La Rive, con la pila que tenía a su disposición. Al volver a

Paris, Aragó publica una traducción al francés del original latín¹⁹ y repite los experimentos en la Academia de Ciencias el 11 de septiembre de 1820. André Marie Ampere está presente y queda fuertemente impresionado, centrando, a partir de ahora, su interés en este nuevo campo de investigación. No olvidemos que Ampere estaba convencido de que la electricidad y el magnetismo eran fenómenos independientes.

Oersted escribe un segundo papel mucho más detallado y con diagramas explícitos de la forma de los aparatos utilizados. Este segundo papel llega a Paris el 29 de septiembre de 1820, unos 25 días después de que Aragó hubiera anunciado el descubrimiento en la Academia de Ciencias y se hubiera puesto a experimentar por sí mismo²⁰, como otros científicos de la época y en especial Ampere. El 25 de septiembre de 1820 Ampere²¹ ya había enunciado su descubrimiento sobre la interacción entre dos corrientes paralelas mediante la construcción de un aparato de su invención, la balanza de Ampere. Sirve para definir la intensidad de una corriente eléctrica a partir de la fuerza que ejercen los dos conductores, dando el nombre de Ampere a la unidad de corriente eléctrica.

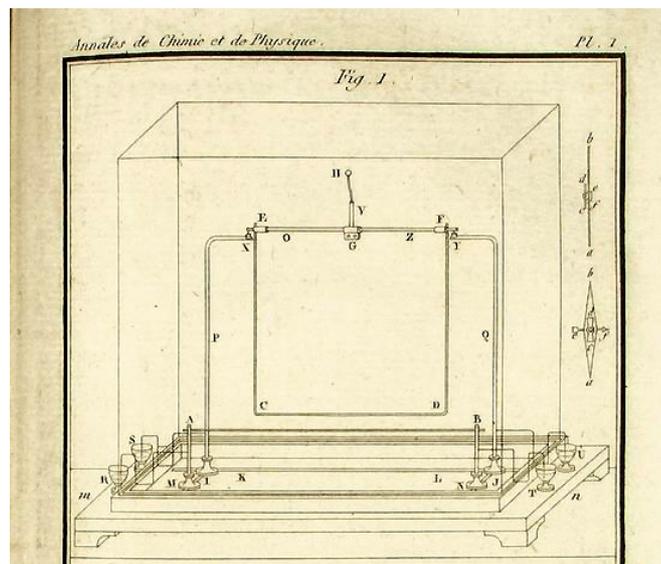


Ilustración 18: Balanza de Ampere

¹⁹ Aragó. Experimenta Circa Effectum, etc. Expériences sur l'effet du conflict électrique sur l'aiguille aimantée. Annales de chimie et de physique. pp 417 1820.

²⁰ Aragó. Expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant voltaïque. Annales de chimie et de physique. pp 93 1820.

²¹ Ampere. De l'Action mutuelle de deux courans elctriques. Annales de chimie et de physique. pp 59 1820.

Este experimento, hoy en día, lo podemos considerar como el primer experimento sobre la teoría de la relatividad, desconocida en aquella época. No es hasta 1905 que Einstein enuncia su célebre teoría, pero sus inicios no son otros que los experimentos de Ampere con las cargas en movimiento.

El resultado experimental de este aparato sobre la atracción y repulsión entre corrientes es de gran importancia en el desarrollo del electromagnetismo, pues Ampere demuestra con este experimento que el magnetismo es una consecuencia de la electricidad únicamente. Faraday quedó fuertemente impresionado con este resultado y las correspondientes consecuencias teóricas, aunque no estaba del todo de acuerdo al no encontrar la relación directa entre la corriente eléctrica y el magnetismo. Posteriormente Faraday describirá el fenómeno del magnetismo a partir de la acción de un campo magnético, que inventa y que a la vez tampoco le convence. De estas dudas Einstein deduce la teoría de la relatividad donde encuentra la relación directa entre las cargas en movimiento y el magnetismo, tal como había previsto Ampere, pero a consecuencia de deformar la estructura del espacio-tiempo.

Las siguientes imágenes corresponden al experimento de la balanza de Ampere que hemos realizado nosotros. Puede observarse perfectamente el movimiento de repulsión del conductor cuando paso una corriente eléctrica de unos 200 Amperios.

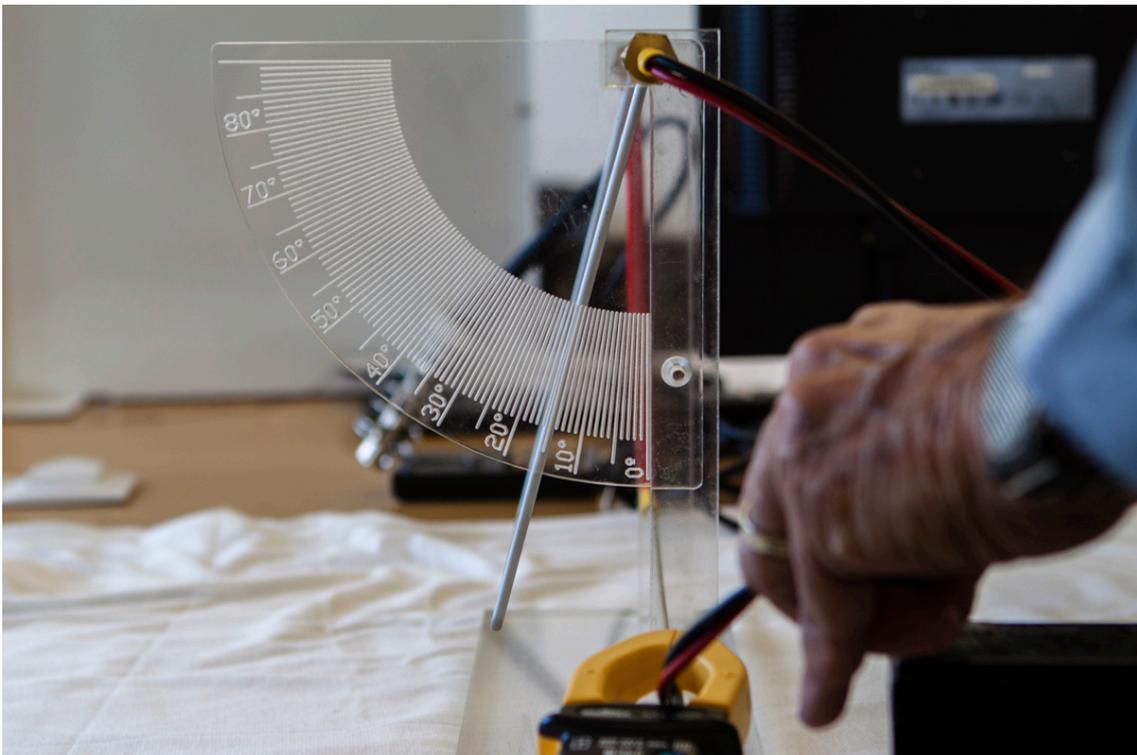


Ilustración 19: Experimento Balanza de Ampere en nuestro laboratorio

5. Los experimentos de Aragó.

La habilidad manual que Aragó adquirió realizando experimentos para Ampere le impulsa a seguir desarrollando e idear nuevos experimentos sobre electromagnetismo. Continúa intrigado por la relación entre los rayos y el magnetismo, sobre todo por los numerosos casos que existían. En junio de 1731, un comerciante había colocado una gran caja de cuchillos, tenedores y varios objetos de hierro y acero en la esquina de su habitación en Wakefield, a punto de ser enviados a las colonias. Por casualidad un rayo entra en la habitación rompiendo la caja y dispersando todo lo que contenía. Los cuchillos, tenedores y otros objetos ofrecían rastros quemados y estaban magnetizados. En enero 1748 el barco Le Dover, también después de un golpe de un rayo, un gran número de piezas de hierro y acero situadas en la habitación del capitán fueron fuertemente imantadas. Un tal Sr. Rihouet que fue herido por el golpe de un rayo que azotó el barco Le Golymin en la noche del 21 al 22 de febrero de 1812, todas las piezas de acero de su reloj fueron magnetizadas, veintisiete años después, la magnetización producida aún era presente. Por tanto, no se podía despreciar el peligro que suponían los rayos a los navegantes, alterando el curso de sus relojes y modificando la polaridad de las brújulas.



Ilustración 20: Tormenta en alta mar

Hacia el 20 de septiembre de 1820, Arago ya había hecho ciertos descubrimientos experimentando con la pila de Volta y el magnetismo²². Descubre que un alambre en contacto con los dos polos de la pila actúa también sobre la aguja imantada, que la naturaleza de esta acción no depende de la posición de la pila sino de cómo los “fluidos” positivos y negativos se mueven en el hilo conductor relativamente a los polos de la aguja. Si el alambre se encuentra dispuesto bajo la aguja imantada, producirá una desviación en sentido inverso de lo que ocasiona cuando se encuentra por encima.

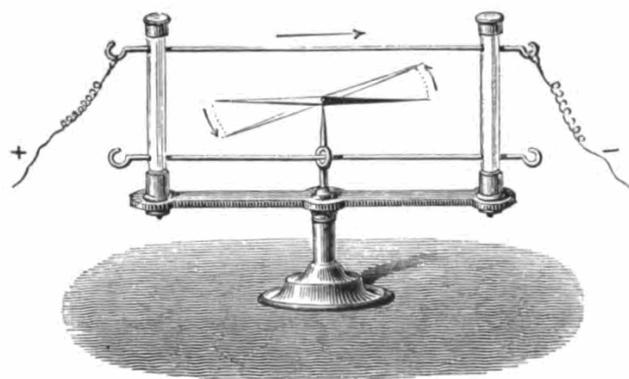


Ilustración 21: Movimiento de una aguja imantada por la corriente

En otro experimento coloca un hilo cilíndrico de cobre a uno de los polos de la pila voltaica y se da cuenta de que en el momento que este hilo está en contacto con el polo contrario atrae limaduras de hierro dulce, como lo habría hecho un verdadero imán. Y



Ilustración 22: Atracción limaduras de hierro

en el momento que el hilo de cobre deja de estar en contacto con los polos de la pila las limaduras se separan del hilo. Repitiendo el experimento con limaduras de cobre, latón o serrín observa que no atraen al hilo conductor. Observa también que la fuerza atractiva sobre las limaduras de hierro actúa si éstas se encuentran en contacto con el hilo y disminuye fuertemente a medida que la acción de la pila se debilita.

Observa también que el efecto de atracción magnética con un hilo conductor de latón se mantiene pocos instantes después de desconectarse de la pila. Además comprueba que el efecto se produce a distancia, aunque el hilo no esté en contacto con las limaduras estas levantan. Lo mismo sucede si el hilo es de plata, platino, etc e independiente de la

²² Arago, comunicación del lunes 25 setembre. Annales de chimie et de physique, pp 82. 1820

forma, masa o diámetro, siempre que actúen con la misma intensidad de corriente. Comprueba que un hilo de cobre está dotado de una "virtud magnética" muy intensa y que esta propiedad se mantiene unos instantes después de desconectarlo de la pila, pero es un fenómeno muy huidizo y difícil de reproducir a voluntad.

Dada la frenética investigación en magnetismo y corrientes eléctricas, es necesario idear nuevos aparatos experimentales para poner en práctica las ideas que van surgiendo. Ampere es un teórico sin destreza experimental y Arago dispone de una gran habilidad manual y sensibilidad en la experimentación. Ampere era muy torpe, poco hábil manualmente, le costaba dibujar una línea recta y hacer un círculo o un cuadrado le era casi imposible y además era lento en sus movimientos. En cambio disponía de una mente rápida y un talento natural para el razonamiento teórico, su imaginación y memoria eran espectaculares, hasta retener los detalles más minuciosos. Podemos decir que Ampere se dedicaba a la meditación teórica y Arago a la acción, comparándose este último en la forma de ser de Faraday. Para paliar esta carencia experimental, Ampere tenía el apoyo de Arago y Fresnel, que con su habilidad manual le ayudaban siempre que podían en los experimentos sobre electromagnetismo, tanto en el laboratorio como en las exposiciones públicas.

Esta confluencia afortunada dio origen, como hemos visto antes, en uno de los experimentos decisivos de la ciencia, la balanza de Ampere. La atracción de dos hilos rectilíneos paralelos cuando a su través pasa una corriente en el mismo sentido y repulsivo cuando es en sentido contrario. Con este experimento Ampere demuestra que la acción de atracción o repulsión atribuida exclusivamente al magnetismo también existe únicamente con corrientes eléctricas. Con su intuición teórica, Ampere sugiere que el magnetismo es consecuencia de las corrientes eléctricas y solamente estas existen en realidad.

Ampere y Arago discutían a menudo sobre los experimentos y su influencia sobre la teoría del electromagnetismo. Después de este experimento era evidente que las propiedades atractivas y repulsivas de los imanes dependían de corrientes eléctricas que deberían circular por su interior, en una dirección perpendicular a la línea que une los dos polos. Ampere dedujo que si una aguja imantada horizontal se encontraba dirigida

al norte, la corriente de la parte superior se movería de oeste a este. Estos pensamientos teóricos hacen sugerir a Arago, que seguramente, se puede obtener una fuerte imantación si se sustituye el hilo conductor rectilíneo por un hilo en forma de hélice. Construye uno y en el interior coloca una aguja de acero y efectivamente obtiene una fuerte imantación constante sobre la aguja y con el polo norte y sur bien definidos. Sin darse cuenta acaba de idear la forma de construir un electroimán, que Arago llama fenómenos de "corrientes en hélice".



Ilustración 23: Electroimán

Con estas corrientes de hélice, Arago es capaz de reproducir el comportamiento de los imanes y controlar su polaridad. Idea un bobinado con dos hélices, con una porción media sin bobinar, y observa que si se pone un hilo de acero éste queda imantado, como si el movimiento de rotación impartido al fluido magnético, por la influencia de una hélice, se continúa más allá de las espiras. Idea que proviene de Ampere. Aparece por primera vez la relación entre el movimiento de rotación y el magnetismo y es consecuencia de la habilidad constructiva de Arago y la imaginación en física teórica de Ampere.

6. Magnetismo de Rotación. Disco de Arago.

Arago se dedica durante dos años, desde el 1822 hasta el 1824 a estudiar el comportamiento de diversos materiales sobre una aguja imantada en movimiento. Descubre un hecho altamente extraño, como es el caso de que una aguja imantada en movimiento es inmovilizada por un disco de cobre en reposo, sin ningún contacto mecánico. Este experimento contradice los principios básicos de la mecánica

newtoniana. El cobre no es un material magnético, en reposo no es atraído por un imán, en cambio en movimiento actúa como si lo fuera. Aragó piensa que tiene que existir una simetría contrapuesta, es decir, si hace girar el disco bajo una aguja imantada en reposo, esta tendría que moverse para cumplir con el tercer principio de la mecánica de acción-reacción. En efecto, comprueba que esta acertado en la hipótesis y se pregunta qué leyes dominan este extraño fenómeno, dando a conocer sus resultados experimentales el 22 de noviembre de 1824 en los *Annales de chimie et de physique*²³. Le llama magnetismo de rotación y lo conocemos hoy en día como disco de Aragó.

“M. Arago communique verbalement les resultats de quelques expériences qu’il a faites sur l’influence que les métaux et beaucoup d’autres substances exercent sur l’aiguille aimantée, et qui a pour effect de diminuer rapidement l’amplitude des oscillations sans altérer sensiblement leur durée.”



Ilustración 24: Disco de Aragó

Los resultados completos los da a conocer el 7 de marzo de 1825 en los *Annales de chimie et physique* y realiza numerosas repeticiones de los experimentos de su invención ante varios físicos ingleses, suizos e italianos que estudiaban los mismos fenómenos. Incluso mantiene una discusión con Nobili y Bacelli de Modena, por diversos experimentos realizados y que estaban en contradicción con los de Aragó. Este hecho nos demuestra que los experimentos sobre magnetismo de rotación iniciados por Aragó tuvieron una repercusión científica muy importante.

Aragó, basándose en sus observaciones considera haber demostrado que todas las sustancias afectan a la rotación de la aguja imantada. En cambio Nobili y Bacelli le contradicen y aseguran que las sustancias no metálicas no tienen ninguna influencia.

²³ Aragó. Comunicación verbal. *Annales de Chimie et de physique*. 22 novembre de 1824. pp 363.

Aragó los replica²⁴ y propone que el error consiste en no tener cuidado en medir la distancia de interacción, si hubieran hecho los experimentos a una distancia más corta habrían observado la desviación de la aguja en materiales no metálicos e incluso en fluidos y gases. Babbage y Herschell²⁵ repitiendo los experimentos de Arago observan los efectos en materiales buenos conductores de electricidad pero no encuentran efectos magnéticos en las sustancias no metálicas y por tanto no conductoras de la electricidad.

Para Babbage y Herschel según la teoría electrodinámica del magnetismo es difícil concebir una circulación de electricidad en materiales no conductores, que expliquen el comportamiento magnético observado por Arago. A pesar de todo, es incomprensible que un material no magnético como el cobre y estando en reposo pueda afectar al movimiento de una aguja imantada. No tiene explicación en la mecánica newtoniana, ya que no es obvio la aparición de una fuerza que actúe sobre el movimiento produciendo la aceleración observada.

Peter Barlow²⁶ el 14 de abril de 1825 y por lo tanto poco después del artículo completo de Arago, desarrolla un estudio sobre los efectos magnéticos inducidos sobre objetos de hierro en rotación. Con este artículo los ingleses quieren apropiarse de la paternidad del descubrimiento del magnetismo de rotación. Arago reclama con contundencia ser considerado el primero en darse cuenta del efecto indicando que el 22 de noviembre de 1824 ya había comunicado a la Academia de Ciencias sus experimentos relativos a la influencia que un cuerpo en reposo metálico o de toda otra naturaleza ejerce sobre una aguja imantada oscilando sobre el disco. Por lo tanto, reclama ser el primero en observar el fenómeno del magnetismo de rotación, es consciente de la gran importancia de su descubrimiento. En sus memorias en 1850, nos recuerda que el disco de Arago causó una fuerte impresión en la comunidad científica.

“ Cet appareil est aujourd’hui dans tous les cabinets de physique ”

²⁴ F. Arago. Note concernant les Phenomenes magnétiques auxquels le mouvement donne naissance. Annales de chimie et de physique. 213-223. 1826.

²⁵ C. Babbage, J.F.W. Herschel. *Account of the Repetition of M. Arago’s Experiments on the Magnetism Manifested by Various Substances during the Act of Rotation*. Philosophical Transactions R. Soc. Lond. 1825 **115**, 467-496.

²⁶ Peter Barlow. On the temporary magnetic effect induced in iron bodies by rotation. In a letter J.F.W. Herschel, Esq. Sec. R.S April 14th, 1825

El disco de Arago golpeó los pilares de la incipiente teoría electromagnética. A pesar de todos los experimentos y las teorías que se desarrollan sobre el electromagnetismo, Arago nunca estuvo contento con la explicación que se hizo de su descubrimiento e incluso duda de la explicación dada por Faraday.

“J’avais reconnu, en déterminant avec mon ami Alexandre de Humboldt l’intensité magnétique sur la pente de la colline de Greenwich, en 1822, que l’aiguille de déclinaison mise en mouvement atteint plus tôt le repos quand elle est placée dans sa boîte que quand elle est éloignée de tous corps étrangers. Cette remarque m’avait semblé devoir mener à des conséquences importantes sur la généralité des phénomènes magnétiques jusqu’alors circonscrits et comme isolés au milieu de la science. Je n’ai jamais cessé de me préoccuper de cet ordre d’idées, et aujourd’hui encore, alors que je ne vois plus et que je ne peux plus observer, il me semble que beaucoup de recherches sont encore à tenter dans la voie que j’ai ouverte, malgré l’explication en apparence satisfaisante qui a été donnée par Faraday d’une partie des phénomènes que j’ai découverts”

Babbage y Herschel, el 16 de Junio de 1825, avanza una posible solución especulando que los polos del imán "induzcan" polos magnéticos contrarios en el disco de cobre. Esta inducción no es inmediata y este pequeño desfase temporal genera una componente paralela de la fuerza magnética en el disco, que es la que produce el movimiento. Fijémonos que es la primera vez que aparece la noción de "inducción" relacionado con el magnetismo y la electricidad. ¿Podría Faraday estar influenciado por este artículo? O es precisamente la observación del disco de Arago que le sugiere inicialmente su descubrimiento sobre la inducción electromagnética?.

Para Arago la electricidad y el magnetismo producen los mismos efectos cuando se encuentran sometidos a rotación. En el mes de agosto de 1826, considera que sus experiencias de rotación tienen que ser renovadas sustituyendo las agujas imantadas por corriente eléctrica. Construye un experimento con un disco de cobre giratorio y paralelamente a la superficie hace pasar un hilo de corriente para observar su efecto. Según Arago se observará un movimiento en el hilo. Desgraciadamente el experimento sale mal porque se rompe el eje de giro del disco, justo en el momento que Arago empieza a observar un ligero movimiento en el hilo.

Al día siguiente Arago tiene que viajar hacia los Pirineos y pide a Ampere que continúe su experimento. Después de unas mejoras en el aparato realizadas por Colladon,

Ampere repite el experimento y esta vez observa con total claridad el movimiento del hilo de corriente. Al volver a Paris, Arago los repite con ligeras modificaciones, observando siempre que no hay distinción entre los efectos producidos sobre la aguja magnética y sobre el hilo de corriente. Queda demostrado definitivamente, y otra vez, que los efectos magnéticos provienen de las corrientes eléctricas.

7. Consecuencias del disco de Arago.

No olvidemos que Faraday atareado con la electrólisis, vuelve al electromagnetismo por su desavenencia con la teoría electromagnética de Ampere y la incompreensión del disco de Arago. No podía admitir que los efectos magnéticos se derivaran de corrientes eléctricas, pues creía que debía existir una simetría entre el magnetismo y la electricidad. De manera que ninguna de las dos podía dominar sobre el otro. Y el disco de Arago no tenía explicación en términos del magnetismo, dado que el cobre no es un material



Ilustración 25: Michael Faraday

magnético y por tanto en estado de reposo no aparece ninguna fuerza.

No hay duda de que el magnetismo de rotación de Arago ayuda a Faraday a concebir la idea de la inducción electromagnética en 1831. Estimulado por la teoría de Ampere acerca de que las corrientes eléctricas son los responsables del magnetismo y en busca de la simetría, Faraday obtiene la teoría de la inducción electromagnética. Donde el magnetismo es capaz de producir corrientes, a las que denomina corrientes inducidas.

Llegando a estos resultados con experimentos modificando el disco de Arago. Faraday introduce la corriente eléctrica a través del disco sin modificar el imán, es el disco de Faraday, en contra de Arago que hace pasar la corriente por un hilo situado encima y paralelo al disco sustituyendo al imán.

El disco de Arago presenta una nueva dimensión a la física de su tiempo, la dinámica de las cargas. La mayoría de los experimentos eran realizados de forma estática, Arago incluye una variable más sin darse cuenta, el movimiento relativo de las cargas en materiales conductores. Faraday para explicar el comportamiento del disco de Arago construye el disco de Faraday, que explica en parte la teoría de la inducción electromagnética a partir de la variación del campo magnético, existencia que impone Faraday. A pesar de todo hay detalles en el disco de Faraday que no cumplen la teoría de la inducción electromagnética, esta anomalía o excepción a la teoría se denomina paradoja de Faraday. Paradoja que enciende la chispa de la imaginación de un joven Einstein que culmina con el descubrimiento de la teoría de la relatividad, no olvidemos que el nombre del artículo del annus mirabilis 1905 se titula "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento".

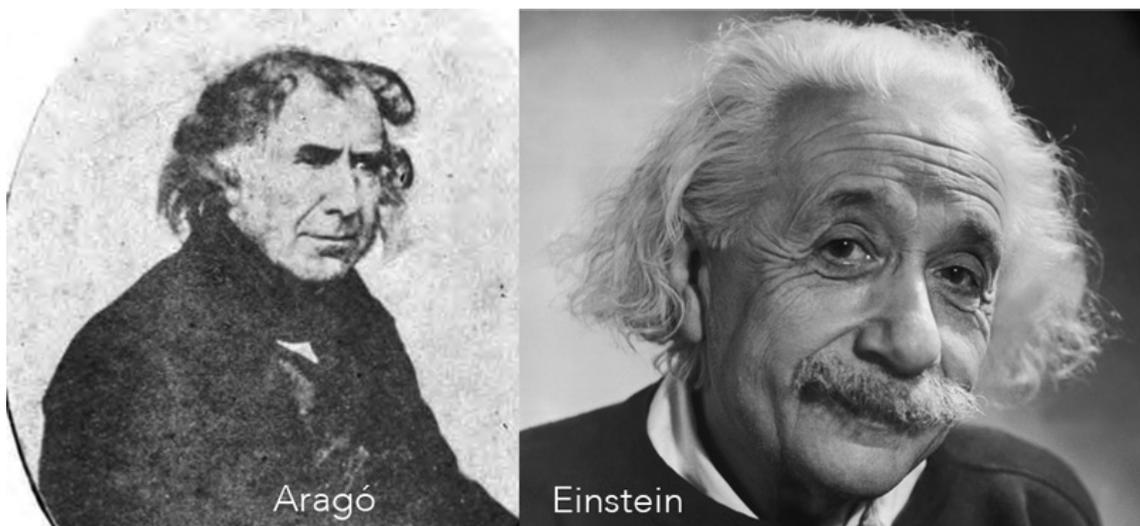


Ilustración 26: Arago y Einstein

Video experimento disco de Arago

El experimento sobre el disco de Arago que hemos realizado se encuentra en youtube:
<https://youtu.be/Pi4UOQL3yv8>

Bibliografia

1. J.L. Alibert. *Éloge historiques de Louis Galvani*. 1801
2. F. Arago. *Éloge historiques de Volta*. Obras completas. Paris. 1854
3. Louis Figuier. *Les Merveilles de la Science* ou description populaire des inventions modernes. Paris, 1867
4. Aloysii Galvani. *De Viribus Electricitatis in Motu Musculari*. 1790.
5. Darwin, Erasmus. *Zoonomia, Or the Laws of Organic Life*. 1801. London.
6. Jaques Barzun. *Del amanecer a la decadència: 500 años de vida cultural en occidente*. Ed Taurus. 2001.
7. Frances Aragò. Notes Biogràfiques.
8. Humphry Davy. *The Bakerian Lecture, on some chemical Agencies of Electricity*. Phil. Trans. R. Sol. Lod. 1807 97, 1-56. 1807.
9. Patrick Unwin and Robert Unwin. *A devotion to the experimental sciences and arts: the subscription to the great battery at the Royal Institution 1808-9*. BJHS 40(2): 181-2001. June 2007.
10. J.A. Paris, *The Life of Sir Humphry Davy*, 2 vols., London, 1831.
11. Patrick Unwin and Robert Unwin. Humphry Davy and the Royal Institution of Great Britain. Notes Rec. R. Soc. (2009) 63 7-33
12. Richard Holmes. *La edad de los prodigios*.
13. Giuliano Pancaldi. *On hybrid objects and their trajectòries: beddoes, Davy and*

- the battery*. Notes Rec. R. Soc. (2009) **63**, 247-262.
14. Biot. Rapport sur les expériences du citoyen Volta. Mathématiques et physiques. 1820. 195.
 15. Peter Barlow. *On the Temporary Magnetic Effect Induced in Iron Bodies by Rotation*. Philosophical Transactions R. Soc. Lond. 1825 **115**, 317-327.
 16. C. Babbage, J.F.W. Herschel. *Account of the Repetition of M. Arago's Experiments on the Magnetism Manifested by Various Substances during the Act of Rotation*. Philosophical Transactions R. Soc. Lond. 1825 **115**, 467-496.
 17. Michael Faraday. Experimental Researches in Electricity. Philosophical Transactions R. Soc. Lond. 1832 **122**, 125-162.
 18. Francesc Arago. Note concernant les Phénomènes magnétiques auxquels le mouvement donne naissance. Annales de Chimie et Physique. 1826 (T32). 213.
 19. Robert C. Stauffer. *Speculation and Experiment in the Background of Oersted's Discovery of Electromagnetism*. Isis (1957) **48**,1, 33-50.
 20. Anonim "...Narrative of a strange effect of thunder upon a magnetic seacard..." Philosophical Transactions R. Soc. Lond. 1676, **11**, 647-648.
 21. Benjamin Franklin, *Experiments and Observations on Electricity*, ed I.B.Cohen (Cambridge, Mass, 1941) 242-243.
 22. F. Arago. Expériences relatives à l'aimantation du fer et de l'acier par l'action du courant voltaïque. Annales de chimie et de physique. T XV p 94. 1820.
 23. F. Arago. Note concernant les Phénomènes magnétiques auxquels le mouvement donne naissance. Annales de chimie et de physique. Pg 213. 1826.

24. Peter Barlow. On the temporary magnètic effect induced in iron bodies by rotation. In a letter to J.F.W. Herschel, Esq. Sec. R.S April 14th, 1825.
25. M. Dumas. Éloge Historique de Michael Faraday. Institut Imperial de France. 18 mai 1868.
26. Friedrich Steinle. Experiments, Speculation and Law: Faraday's Analysis of Arago's Wheel. Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association. Vol. 1994 (1994) pp. 293-303.
27. F. Arago. Comunicació verbal. Annales de chimie et de physique. 22 novembre 1824. Pag 363
28. Colin A. Russel. Michael Faraday, Physics and Faith. Oxford University Press. 2000.
29. Faraday, Michael. Historical Sketch of Electro-Magnetism, *Annals of Philosophy*. 1821 Vol II :195-200, 274-290. 1822 Vol III: 107-121. Fets durant el Juliol, Agost i Septembre.
30. Aaron D. Cobb. Michael Faraday's "Historical Sketch of Electro-Magnetism" and the Theory Dependence of Experimentation. *Philosophy of Science*. Ol 76, No 5 (December 2009), pp. 624-636
31. Forman, Paul. *Weimar Culture, Causality, and Quantum Theory, 1918-1927: Adaptation by German Physicists and Mathematicians to a Hostile Intellectual Environment*. *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol 3 (1971), pp.1-115.
32. W. Sturgeon, S.H. Christie, Olinthus Gregory and Peter Barlow. Improved Electro-Magnetic Apparatus. *Transactions of the Society, Instituted at London for the Encouragement of Arts, Manufacturesm and Commerce*, Vol. 43 (1824), pp. 37-52.

33. M. Faraday. On the Vapour of Mercury at common Temperatures, by M. Faraday, Chematical Assistant at the Royal Institution. Quaterly Journal of Science, Literature and the arts. 1821. VX. pp354.
34. M. Faraday. *On some new electro-magnetical motions, and on the theory of electromagnetism*. Quaterly Journal of Science, Literature and the arts. 1922. pp. 74- 96.
35. M. Faraday. *Electro-Magnetic Current*. Quaterly Journal of Science, Literature and the arts. 1925. Pp. 338.
36. Desconocido. *Apparatus for exhibiting the Simultaneous Rotation of two Voltaic Conducting Wires round the opposite Poles of Magnets*. Quaterly Journal of Science, Literature and the arts. 1925. Pp. 336.
37. Jaques Barzun. *Del amanecer a la decadència: 500 años de vida cultural en occidente*. Ed Taurus. 2001.
38. James Lequeux. *François Arago un savant généreux. Physque et astronomie au XIXe siècle*. EDP Sciences. 2008