

APROXIMACIONES HISTÓRICAS ALREDEDOR DEL CONCEPTO DEL
ELECTRÓN: LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL RELATIVA AL ESTUDIO DE LA
NATURALEZA CORPUSCULAR U ONDULATORIA DE LOS RAYOS CATÓDICOS.

JUAN MAURICIO GUZMÁN BENAVIDES

2019184112

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ
2020

APROXIMACIONES HISTÓRICAS ALREDEDOR DEL CONCEPTO DEL
ELECTRÓN: LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL RELATIVA AL ESTUDIO DE LA
NATURALEZA CORPUSCULAR U ONDULATORIA DE LOS RAYOS CATÓDICOS.

Juan Mauricio Guzmán Benavides

2019184112

Trabajo de grado para optar al título de:
Maestría en Docencia de las Ciencias Naturales

Asesor

Marina Garzón Barrios

Docente del Departamento de Física

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN DOCENCIA DE LAS CIENCIAS NATURALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BOGOTÁ
2020

Tabla de contenido

Introducción.....	1
1. Los laboratorios en la Europa del siglo XIX	4
1.1 La luz catódica.....	6
1.2 Los tubos de rayos catódicos	7
2. Los experimentos de Hertz	22
2.1 La continuidad de la descarga en los tubos	23
2.1.1 El primer montaje: Replicando a De la Rue.	25
2.1.2 El segundo montaje: La respuesta de las bobinas al cambio de la corriente. .	26
2.1.3 El tercer montaje: El condensador como sensor de discontinuidad de la descarga	26
2.1.4 El cuarto montaje: La continuidad de la descarga verificada con un electroscopio.....	28
2.2 El rayo catódico y la corriente viajan por diferentes caminos.....	29
2.2.1 La influencia de los rayos sobre un imán	29
2.2.2 El camino de la corriente y su relación con el rayo catódico	31
2.2.3 La naturaleza del rayo catódico.	36
2.3. Los efectos electrostáticos en los rayos catódicos.....	37
2.3.1 Los efectos electrostáticos producidos por los rayos	38
2.3.2 Los efectos electrostáticos que experimentan los rayos.	39
2.4 Conclusiones respecto al trabajo experimental de Hertz.....	41
3. Los experimentos de JJ Thomson.....	42
3.1 La carga de los rayos catódicos	43
3.2 Los efectos electrostáticos de los rayos catódicos.....	45
3.3 La ionización de los gases por los rayos catódicos	47
3.4 Comportamiento de los rayos bajo efectos magnéticos en diferentes gases	48
3.5 La relación m/e	50
3.5.1 Determinación del tamaño de los corpúsculos mediante la medida de la energía calórica de los rayos.	50

3.5.2 Medida de la relación m/e con campos eléctricos y magnéticos.....	54
3.6 Conclusiones respecto al trabajo experimental de Thomson.....	57
4. ¿Quién tenía la razón Hertz o Thomson?	58
4.1 El reconocimiento de Thomson y su asociación con el electrón.....	66
5. El papel del experimento en la historia del electrón.....	74
Conclusiones.....	77
Referencias	80

Tabla de ilustraciones

Figura 1. Esquema y fotografías de tubo de rayos catódicos.....	6
Figura 2. Máquina electrostática de Hauksbee.....	9
Figura 3. Tubo de descarga.....	10
Figura 4. Tubo de rayos canales y fotografía en funcionamiento.....	11
Figura 5. Fotografías de tubos Geissler.....	13
Figura 6. Tubos de Crookes.....	14
Figura 7. Tubos de Crookes irradiando diferentes sustancias.....	15
Figura 8. Röntgen tomando una radiografía.....	17
Figura 9. Montaje de Hertz basado en el experimento de De La Rue.....	25
Figura 10. Circuito de tubo catódico con puente de Wheatstone.....	26
Figura 11. Circuito con interruptor de rueda dentada y condensador.....	27
Figura 12. Circuito con electroscopio y resistencia.....	28
Figura 13. Tubo catódico con perforación en el cátodo.....	30
Figura 14. Instrumento de medida de efectos magnéticos.....	31
Figura 15. Caja de descarga de Hertz.....	32
Figura 16. Montaje de líneas de corriente.....	32
Figura 17. Líneas de campo magnético en la caja de Hertz.....	33
Figura 18. Líneas de corriente de Hertz.....	34
Figura 19. Líneas de corriente de Hertz con electrodos perpendiculares.....	35
Figura 20. Líneas de corriente de Hertz con electrodos paralelos.....	35
Figura 21. Tubo catódico con perforación en el cátodo.....	37
Figura 22. Montaje de Hertz para estudio de efectos electrostáticos.....	38
Figura 23. Prueba de montaje de efectos electrostáticos.....	39

Figura 24. Montaje para determinar los efectos electrostáticos en los rayos.....	40
Figura 25. Experimento de Perrin.....	43
Figura 26. Primer experimento de Thomson.....	44
Figura 27. Segundo montaje de Thomson.....	45
Figura 28. Montaje para determinar la conductividad del gas en el tubo.....	47
Figura 29. Campanas al vacío con campo magnético.....	49
Figura 30. Tubo para relación m/e con termocupla.....	52
Figura 31. Deflexión del haz debido al campo magnético.....	52
Figura 32. Esquema de la fuerza eléctrica.....	54
Figura 33 Tubo de Thomson para relación m/e.....	56
Figura 34. Cajas de descarga de Hertz.....	59
Figura 35. Tubos de Thomson.....	60
Figura 36. Tubos de Thomson vs tubo de Hertz.....	61
Figura 37. Montaje de Hertz Perrin y Thomson para medir la carga de los rayos.....	62
Figura 38. Prueba de montaje de Hertz.....	63
Figura 39. Montaje de Hertz para detectar ondas electromagnéticas.....	65

Introducción

El electrón es uno de los conceptos fundamentales en ciencias, juega un rol esencial en el comprensión de determinadas fuerzas y fenómenos físicos de la naturaleza, como la electricidad, el magnetismo o la conductividad eléctrica; en gran medida explica las uniones atómicas y las reacciones químicas; es notable en la construcción del mundo moderno, es el principio básico de la electrónica y las comunicaciones, sus propiedades características y comportamientos frente a campos electromagnéticos y su papel en la conformación de la materia es, en apariencia, ampliamente estudiado y difundido en las clases de ciencia.

No hay duda de que la construcción del concepto electrón es un triunfo del intelecto humano porque no sólo nos permitió unificar explicaciones sobre diversos fenómenos que no parecían tener conexión, sino que su caracterización abrió la puerta para la fabricación de máquinas que impulsaron la revolución tecnológica.

El electrón en un constructo que aparece en los libros de ciencia desde muy temprano en la academia, como primer acercamiento se nos dice que hace parte fundamental del átomo, con imágenes se nos muestra como una simple partícula con carga negativa, de esta forma el concepto se da por entendido a tal punto de parecer obvio, simple y cotidiano, hace parte de nuestras explicaciones de los fenómenos eléctricos de manera tan natural, que muy pocas veces nos detenemos a preguntar o a dudar de él.

A pesar de ser un concepto clave, en los libros de texto se destina muy poco espacio a su estudio, al consultar los libros de física y química más usados en la enseñanza de las ciencias en nuestro país¹, encontramos no más de una página acerca del electrón, se hacen una reseña muy breve de su “descubrimiento”, se menciona a JJ Thomson como su artífice, y sutilmente, se mencionan los tubos de rayos catódicos como el instrumento con el cual fue posible su detección.

Infortunadamente hemos heredado esta concepción, donde existe una especie de trinidad entre Thomson, tubo catódico y electrón, que nos deja una visión desdibujada de la forma en la que se construye este concepto, muy pocas veces se entiende o se profundiza acerca de ¿por qué Thomson uso rayos catódicos?, y si la finalidad de sus experimentos era determinar o probar la existencia de partículas cargadas que hoy en día asociamos con

¹ Ver por ejemplo Física Universitaria Zears Zemanski volumen 2 Pearson Education, o Química General Raymond Chang Mc Graw Hill.

electrones, se dejan de lado elementos tan fundamentales en la construcción de la ciencia como son: el contexto de producción de conocimiento, sus necesidades, el debate de las ideas, o el consenso de la comunidad científica, por sí solo, Thomson no habría avanzado mucho, fue necesario la acumulación de experiencias, ideas, y experimentos que fueron madurando la idea de electrón.

Se entiende que el objetivo de los libros de textos no es hacer un recuento histórico detallado de la ciencia, pero la forma en que se introduce el concepto da pie para interpretaciones erróneas de diferentes tipos, muestra, por ejemplo, al científico como un personaje que en solitario y por su cuenta es capaz de interpretar y dar explicaciones de la naturaleza, hace suponer que la ciencia es una acumulación de información verdadera construida por un puñado de personajes con intelectos extraordinarios, dejando de lado la construcción social de la misma, el desarrollo de experimentos en el laboratorio, la concepción de hipótesis y el debate de las ideas.

A medida que van avanzando los cursos, la percepción del electrón no cambia mucho, incluso para quienes optan por estudiar ciencias, la idea de electrón no va más allá de una partícula negativa constitutiva del átomo que posee ciertas características que se pueden describir con un número, muy pocas veces hay una reflexión de cómo es posible que sepamos de la existencia de algo que en la ciencia aparece como perceptible a través de unos instrumentos, con depurados procesos experimentales y unas teorías estructuradas.

Este trabajo busca rescatar y dejar en manifiesto para sus lectores, algunos de los aspectos que llevaron a aceptar la idea de electrón dentro de la comunidad científica, y que pasan desapercibidos para la mayoría de los textos. Para ello, se presenta un panorama histórico de la evolución de los tubos de descarga durante el siglo XIX, se centra en los estudios sobre la naturaleza de las descargas en los tubos catódicos realizados por Heinrich Hertz en 1886 y Joseph John Thomson en 1897, ya que estos científicos parecen ser el centro de una controversia² entre dos escuelas, la alemana y la inglesa, que dominaban el pensamiento científico occidental por aquel entonces, y que parte de esa controversia llevó a la consolidación del concepto electrón no sólo como explicación del fenómeno de los rayos catódicos, sino que también se convirtió en el paso decisivo en la construcción de una teoría que explicaba la estructura y comportamiento de la materia.

Con el análisis de estos experimentos, y el contexto en el cual se desarrollaron se tiene la intención de mostrar al lector una visión un poco más detallada de la construcción del concepto electrón, resaltar la historia de un instrumento tan importante para el desarrollo de la tecnología y la ciencia como lo fue el tubo de rayos catódicos o tubo de descarga, también, este escrito tratará de esbozar cual fue el papel del experimento y de la comunidad científica en la construcción del concepto electrón.

² Como se mostrará brevemente en este texto hay dudas de esa controversia.

Se pretende que este análisis histórico incida sobre la visión que tiene el maestro sobre la ciencia con la esperanza de que oriente su labor pedagógica; se sabe que la historia de la ciencia puede ser un recurso para el trabajo del maestro de ciencias, en cuyo uso debe ser formado, y a la que se puede acudir con diferentes propósitos (Ayala, 2006), que en nuestro caso permita el establecimiento de paralelos entre el desarrollo científico y el desarrollo del conocimiento individual que derive elementos para el diseño de actividades en el aula que faciliten la comprensión y uso del concepto electrón.

Los estudios históricos permiten al docente de ciencias configurar una visión holística que proporciona una importante información sobre el contexto de producción de las teorías científicas y de esa manera intentar recontextualizar y adaptar fenomenologías en aras de que el estudiante asuma con criterio las teorías que se le presentan.

El objetivo general de este trabajo es realizar un análisis histórico de la actividad experimental sobre la naturaleza de los rayos catódicos, y los argumentos que conducen a la idea de electrón; a través de los trabajos realizados por Heinrich Hertz en 1886³ y JJ Thomson en 1897⁴.

También, se busca describir los procedimientos experimentales mediante los cuales se construyen argumentos sobre la naturaleza de los rayos catódicos que conducen a la idea de electrón.

Destacar la importancia de los tubos de rayos catódicos como instrumento crucial en el estudio de las descargas eléctricas generadas en gases, identificando su funcionamiento y su versatilidad para las investigaciones científicas.

Se espera que a futuro este escrito sea tomado como base para la construcción o replicación de algunos de los montajes sobre rayos catódicos, la construcción de equipo puede ser un excelente recurso para el aula, los tubos de descarga han desaparecido poco a poco de las prácticas del laboratorio a tal punto de que son una rareza para los docentes en formación, es importante romper con esta tendencia y con la visión simplista del concepto electrón.

Por último, es bueno aclarar que este trabajo no busca dar una definición del concepto electrón, ni indagar en sus orígenes, ahonda en el estudio de los rayos catódicos como factor determinante para la concepción final del concepto electrón que llegó a nuestros días, intenta mostrar el cómo, el por qué y el cuándo del concepto electrón se convirtió en lo que aceptamos y enseñamos en el aula.

³ Experiments on the cathode discharge de 1883 y publicados en 1886 en *Miscellaneous Papers* capítulo XII

⁴ Cathode Rays, *Philosophical Magazine*, volumen 44 (1897) páginas 296–314.

1. Los laboratorios en la Europa del siglo XIX

En el siglo XIX, los laboratorios eran muy diferentes a como los conocemos actualmente, por lo general solo había un profesor que a menudo vivía allí mismo y que contaba con la ayuda de muy pocos asistentes, las investigaciones eran diversas y abarcaban cualquier aspecto de la naturaleza, no existía una especialización de estos, era común encontrar en un mismo laboratorio equipos e investigaciones de todo tipo, todo estaba condicionado al interés del que estuviese a cargo, haciendo que el diseño y construcción de equipos fuera característico de cada lugar.

Al igual que hoy, el prestigio de un laboratorio está condicionado al grado de sofisticación y desarrollo de sus instrumentos, en el siglo XIX, una forma de clasificar un laboratorio era de acuerdo con el poder de la batería que disponía, recordemos que por aquella época no había forma de conectarse a una red para obtener la energía eléctrica, simplemente no existía, por lo tanto un sinónimo de gran laboratorio era contar con una buena batería⁵, que por lo general se encontraban en sótanos mal olientes por los compuestos ácidos de las mismas, ¡en 1850 un laboratorio podía estar orgulloso de poseer 1.9V a su disposición para sus experimentos!, parece ridículo para nuestros días, pero mantener esas diferencias de potencial implicaba grandes esfuerzos físicos y económicos, ya que la composición de las baterías llenas de ácidos, producía degradación de sus electrodos, arrojando vapores fuertes y desagradables, era muy importante para todo gran laboratorio mantener sus baterías en condiciones de trabajo y por lo tanto gran parte de sus recursos económicos y tiempo de trabajo de los asistentes se invertían en ello. (Segrè, 1980)

El hecho de que se tuviera como prioridad en un laboratorio la disposición de una fuente de voltaje confiable reflejaba el grado de importancia de las investigaciones de los fenómenos eléctricos para la época, por todas partes de Europa el fenómeno de la electricidad era estudiado desde diferentes perspectivas y con diferentes propósitos, para mediados del siglo XIX, Inglaterra, Francia y Alemania eran los tres líderes en ciencia, las tres grandes potencias vivían todas situaciones políticas y sociales diferentes.

Inglaterra comandada por la reina Victoria estaba en su esplendor luego de cimentarse en una generación nacida en la revolución industrial, las investigaciones en ciencia cobraban importancia como proyecto político que buscaba la consolidación de un imperio, por otro

⁵ Una batería era una colección de celdas voltaicas muy similares a la desarrollada por Volta, todas se basaban en el mismo principio, pero variaban en la composición de sus electrodos y sus soluciones electrolíticas.

lado, Francia poco a poco se recuperaba de las guerras napoleónicas y reivindicaba la confianza en el proyecto de república democrática, sin embargo la derrota en las guerras franco prusianas de la segunda mitad del siglo XIX, debilitaron sus investigaciones en ciencia, la desmoralización de los franceses se puede medir por la reacción de Louis Pasteur (1822-1895) y otros científicos franceses ante los desastres de la guerra, angustiados y heridos por su arraigado patriotismo, asociaron la derrota de Francia con su abandono de la ciencia durante los cincuenta años anteriores y recordaron con orgullo el papel desempeñado por la ciencia en la defensa del país durante la Revolución y las guerras napoleónicas. Pasteur esperaba que a través de la ciencia pudiera acelerar la recuperación de Francia (Segrè, 1980).

Por su parte, Alemania, ascendía rápidamente y estaba dominada por los militares, la larga lucha entre la autoridad civil y militar, que había durado más de sesenta años, se había resuelto a favor de estos últimos, la ciencia y la técnica servirían a el propósito imperialista alemán. Así las cosas, el ambiente social y político de Europa condicionó la forma en que se hacía la ciencia, robusteciendo la investigación experimental y la colaboración con la industria, hecho que se hizo evidente durante el transcurso de la primera guerra mundial en donde se aplicó todo el conocimiento alcanzado durante todo el siglo XIX, en la construcción de armas para la guerra.

Bajo este panorama, la física en el siglo XIX tuvo uno de los periodos más brillantes de toda la historia de las ciencias, periodo que iba a llevar a la humanidad a el desarrollo tecnológico que forjó nuestro mundo moderno, investigaciones en todos los campos, surgían en los laboratorios Europeos, en este siglo la teoría electromagnética vio la luz gracias a los trabajos de Maxwell, que unificaron los fenómenos eléctricos y magnéticos, esto fue visto como el segundo gran éxito en las explicaciones sobre la naturaleza solo comparable con los principios de Newton, (Berkson, 1974) sin embargo, a diferencia de la mecánica newtoniana, los trabajos Maxwell tardaron un tiempo en ser aceptados por la comunidad científica, porque planteaban la necesidad de una nueva visión del mundo, en donde la acción a distancia dejaba de tener sentido, y que llevó a finales del siglo XIX, a el cambio del paradigma Newtoniano.

Los fenómenos eléctricos se convirtieron en el centro de la investigación de los físicos y los ingenieros quienes vieron desde muy temprano el potencial económico de este campo del saber, la invención de la pila voltaica abrió la puerta para la investigación e invención de todo tipo de artefactos, entre ellos los tubos de descarga, quienes jugaron un papel importante en el entendimiento del fenómeno eléctrico y la naturaleza oculta de la configuración de la materia.

1.1 La luz catódica

Ver un tubo de descarga en funcionamiento por primera vez es una experiencia que enriquece y despierta la curiosidad por los fenómenos eléctricos, a pesar de que hoy en día ya estamos familiarizados con los fenómenos eléctricos y producción de luz con electricidad, no deja de ser inquietante ver el resplandor verdoso en la pared del vidrio, aún causa asombro ver como esa luz se desvía con un imán y cambia sus características al aumentar el vacío en el tubo, infortunadamente esta experiencia ha ido desapareciendo de los cursos de ciencias, y hoy en día los tubos de rayos catódicos son una rareza para los estudiantes.

Imaginemos un montaje con un tubo de descarga como el la figura 1, conectado a una bomba de vacío y a una fuente de alto voltaje ($>1000V$), en un principio, el tubo tiene aire a la misma presión atmosférica y no apreciamos ningún destello en su interior, al ir extrayendo el aire del tubo por medio de la bomba hasta llegar a los 10 Torr,⁶ aparece un parpadeo de luz en el tubo, a medida que continúa el bombeo, un resplandor rosado uniforme llena todo el tubo entre el cátodo y el ánodo, a continuación, aparece un resplandor violeta en el cátodo (electrodo negativo), creciendo en longitud y aparentemente empujando el resplandor rosado hacia el ánodo (electrodo positivo), pero sin tocarlo nunca; el resplandor violeta está separado del resplandor rosado llamado "columna positiva" por una región oscura, el "espacio oscuro de Faraday". La presión del aire en esta etapa es de aproximadamente 1 Torr. (Dahl, 1997)

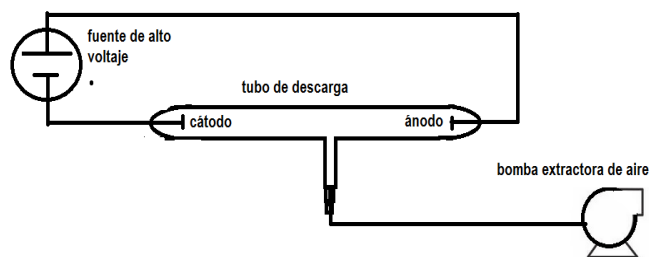


Figura 1. Esquema y fotografías de tubo de rayos catódicos. Arriba esquema de conexión de un tubo de descarga. Abajo, fotografías del tubo de descarga a diferente presión que muestra la aparición de líneas oscuras. El tubo izquierdo está a una presión de 40 torr y el tubo a la derecha está a una presión de 0.03 Torr a medida que disminuye

⁶ El Torr es una unidad de medida de la presión que era comúnmente utilizada en el siglo XIX, también es llamada mm Hg, para hacernos una idea de esta unidad la presión atmosférica a nivel del mar equivale a 760 Torr

la presión el fenómeno luminoso experimenta la aparición de franjas que van desapareciendo hasta dejar una luz verdosa sobre la pared del tubo. Fuente: the cathode rays tube site. <https://www.crtsite.com/page6-4.html>

A medida que continúa la reducción de la presión, el resplandor rosado que retrocede se rompe en una serie de estrías curvas, espaciadas regularmente, con sus superficies convexas orientadas hacia el cátodo.

En este punto, la resistencia al paso de la corriente en el tubo ha alcanzado un máximo y es necesario aumentar el voltaje en la fuente, el resplandor violeta se divide en dos partes, una aparentemente adherida al cátodo (el "resplandor del cátodo") y una segunda, una columna separada (el "resplandor negativo"), que se extiende hacia el ánodo. Las dos partes están separadas por el "espacio oscuro de Crookes" que se alarga gradualmente, pareciendo empujar el resplandor negativo, el espacio oscuro de Faraday y la columna positiva estriada hacia el ánodo.

Nuevamente es necesario aumentar el voltaje de la fuente, a medida que el espacio oscuro de Crookes continúa creciendo, la columna positiva se desvanece, excepto una película de corta duración en la superficie del ánodo (el "resplandor del ánodo"), el resplandor del ánodo pronto desaparece, al igual que el espacio oscuro de Faraday, con el resplandor negativo que se extiende hasta el ánodo.

Finalmente, el brillo del cátodo y el brillo negativo también desaparecen, en este momento el espacio oscuro de Crookes llena completamente el tubo, la descarga es completamente oscura, pero se establece un fenómeno nuevo: las paredes del tubo de vidrio están bañadas por una fluorescencia verde amarillenta, en esta etapa, la presión en el tubo es de aproximadamente 0,03 Torr, si fuera posible por medio de la bomba alcanzar el estado de vacío perfecto, es decir la total ausencia de aire en el tubo, la descarga cesaría por completo, es decir el vacío no es posible el paso de la corriente. (Dahl, 1997)

Las variaciones del fenómeno lumínico al cambio de la presión fue fuente de hipótesis e ideas que mayoritariamente involucraban el éter, por ejemplo, Goldstein opinó que la descarga consiste en una alteración del éter, por sí mismo invisible, y solo se convierte en luz al impartir su energía a las partículas de gas, (Hertz, 1886, pág. 246), sin embargo, una explicación satisfactoria que uniese criterios no existió hasta bien entrado el siglo XX.

1.2 Los tubos de rayos catódicos

Es difícil describir lo que se siente al entrar por primera vez a un laboratorio, los objetos allí encontrados guardan cierta fascinación y encanto, su sola presencia refleja la mezcla entre técnica y arte, verlos funcionar despierta el interés por aprender sobre ellos, invita a explorar en sus principios de funcionamiento y da cierto sentimiento de control sobre la naturaleza.

Esos mismos sentimientos despertaron los tubos de descarga que durante algún tiempo fueron centro de atención y desarrollo en los laboratorios europeos, la evolución de estos objetos no sólo sirvió para el avance de la ciencia, sino que también, impulsó la industria de la iluminación y desencadenó el desarrollo de la era de la electrónica y las telecomunicaciones.

Como pocos instrumentos del laboratorio los tubos de descarga trascendieron la investigación en el ámbito científico y permearon la industria, el arte y la vida cotidiana, sus aplicaciones van desde instrumentos de medida⁷, equipos de comunicación, a equipos médicos, pasando por artículos de decoración de la clase alta de la época.

El estudio de los rayos catódicos, fue determinante en la construcción de una teoría acerca de la estructura de la materia, pero su origen está lejos de este fin, las descargas lumínicas experimentadas por tubos de vacío fueron objeto de estudio durante casi todo el siglo XIX, la investigación para determinar su naturaleza y definir sus características fue caldo de cultivo para el desarrollo no sólo de la teoría atómica, sino que también conformó casi toda la base tecnológica de la electrónica del siglo XX, los tubos de rayos catódicos pueden ser considerados los precursores de las válvulas de vacío, las lámparas de descarga y los tubos de rayos x, su versatilidad también permitió nuevas técnicas para el estudio de la composición del universo por medio de la espectroscopía.

Su evolución muestra como la actividad científica muchas veces reproduce fenómenos que son raros en un ambiente natural, dándonos un panorama de cómo es necesaria la artificialización de la naturaleza para su estudio, los tubos catódicos no sólo permitieron estudiar los fenómenos de la electricidad sino que también trazaron el camino para la construcción de nuevas tecnologías, por consiguiente, revisar la ruta que llevó a los tubos de rayos catódicos y al fenómeno de descarga lumínica a la comprensión de la estructura de la materia, puede ser un buen pretexto para analizar el papel del experimento y el instrumento en la construcción de la ciencia.

Los orígenes de las descargas luminosas en tubos de cristal son anteriores a todos los experimentos reportados como precursores del estudio de los rayos catódicos, estos fenómenos luminosos fueron documentados por primera vez en el siglo XVII por el sacerdote francés Jean Picard (1620 1682) quien descubrió que, al agitar un barómetro de mercurio producía un resplandor; cuando la noticia del trabajo de Picard llegó a Londres, Francis Hauksbee (1660 1713) reprodujo el resplandor mercurial, como se le llamo a este fenómeno, en una campana que evacuó con una bomba de vacío de su propia invención, una demostración del efecto ante la Royal Society de Londres causó el suficiente impacto como para que Isaac Newton lo invitara a unirse a sus filas en 1703.

⁷ Los tubos de rayos catódicos eran el elemento principal de los osciloscopios hasta entrado el siglo XXI, donde fueron remplazados por otras tecnologías.

Unos años después de sus primeros experimentos con la luz mercurial, Hauksbee decidió ver qué pasaría si eliminaba el mercurio de la ecuación, primero, reemplazó la sustancia con otros materiales, luego decidió dejar un globo de vidrio evacuado, completamente vacío, al hacer girar el globo y tocarlo con sus manos observó una luz azul lo suficientemente brillante como para poder leer con ella, aunque aparentemente tubo cierto interés en desarrollar una lámpara a partir de esta nueva fuente de luz, nunca lo hizo, sus experimentos se encaminaron en construir máquinas que fueran capaces de cargar objetos eléctricamente y no en estudiar el fenómeno lumínico en sí,⁸ su máquina electrostática conformada por una esfera de vidrio con aire a baja presión figura 2, era capaz de cargar electrostáticamente los objetos que estuvieran en contacto con la esfera, esto permitió disponer de una fuente sencilla capaz de dotar de electricidad los objetos abriendo la puerta a las investigaciones de fenómenos eléctricos durante todo el siglo XVIII, siendo este aparato remplazado parcialmente por la pila voltaica en 1800.

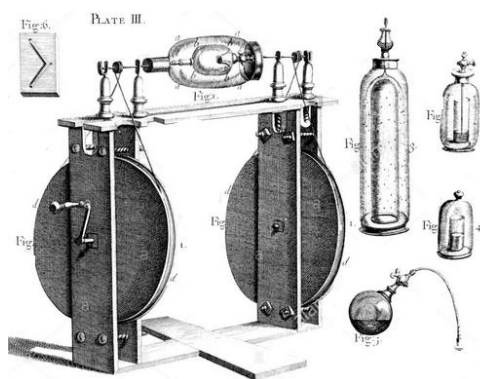


Figura 2 Máquina electrostática de Hauskbee. Varias piezas de cristal se hacen rotar por efectos de una manivela y una polea, a los recipientes de cristal se les hace vacío, algunos de ellos se les introducía mercurio, causando un resplandor al ser tocados, la función principal de esta máquina era cargar eléctricamente los objetos al frotarlos contra el vidrio, fuente: Science History Images / Alamy Stock Photo, ID de la imagen HRP64B

Fueron varios los científicos interesados en los fenómenos lumínicos en los tubos con gases enrarecidos,⁹ hasta el mismo Faraday experimentó con ellos, para su época era desconcertante saber que los gases se comportaban como aislantes, pero al ser enrarecidos se tornaban conductores, esto planteaba la pregunta de si la electricidad era capaz de viajar

⁸ Su publicación llamada “Experimentos físico-mecánicos sobre varios temas” publicado en 1709, se enfocó más en el estudio de los fenómenos electrostáticos generados por su máquina, que en el funcionamiento de la máquina por sí misma, aunque si documentó el fenómeno luminoso, no fue el tema central de su investigación.

⁹ Un gas enrarecido es aquel que se encuentra a una presión inferior a la presión atmosférica.

en el vacío, de ser posible, planteaba la viabilidad de poder estudiar directamente la naturaleza del fenómeno del fluido eléctrico.¹⁰

La posibilidad de indagar más a fondo estas inquietudes tuvieron que esperar al desarrollo de varias técnicas experimentales claves para construir tubos de descarga, entre ellas: una bomba de vacío suficientemente eficiente, un sello metal vidrio capaz de sostener los electrodos y el vacío en los tubos, y una fuente de alto voltaje para alimentar los electrodos y generar las descargas.

Cada una de estas innovaciones fue llegando a medida que trascurría el siglo XIX, con estos avances, en 1858 el profesor alemán Julius Plücker (1801 1868) estudió la conducción de electricidad a través de gases a muy baja presión utilizando un tubo de vidrio en el que colocó dos placas metálicas en la parte interior de los extremos, Plücker vio cómo se iluminaba todo el tubo al aplicar electricidad a las placas. Sin embargo, cuando casi todo el gas era evacuado notó que esa luz desaparecía quedando tan sólo un resplandor verdoso en el vidrio cercano a la zona de la placa conectada a la terminal positiva de su fuente de electricidad (el ánodo); la imagen luminosa no dependía mucho de la posición de ese electrodo. Más bien, parecía como si la luminosidad en esa zona fuera producida por algún tipo de rayos emitidos por la placa conectada al cátodo, y que viajaban de una placa a la otra a través del vacío.

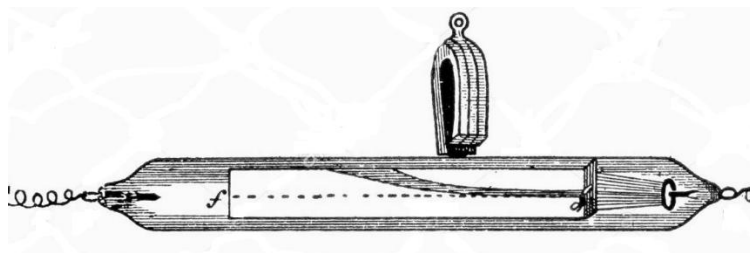


Figura 3. Tubo de descarga similar a los usados por Plücker, los rayos pueden ser desviados por imanes, fuente: Granger Historical Picture Archive / Alamy Stock Photo, Image ID: FFBWRB

Plücker también observó que la posición de la imagen luminosa podía ser modificada si se acercaba un imán a la zona del ánodo; un alumno suyo, Johann Wilhelm Hittorf (1824 1914) encontró que al interponer objetos entre el cátodo y el ánodo se producían sombras en la imagen luminosa, con lo que reforzó la idea del origen catódico para esos rayos, Hittorf fue la contraparte alemana de William Crookes. En sus primeros días en la Academia de Münster, tuvo que fabricar gran parte de sus propias herramientas e instrumentos debido a la falta de disponibilidad y al dinero limitado de la Academia, en

¹⁰ En el siglo XIX, la explicación más popular sobre la electricidad involucraba la creencia de que era como un fluido continuo, porque experimentos de la época lograron almacenarla y trasportarla al igual que el agua, las botellas de Leyden se les consideraba y aún se les considera tanques de almacenamiento, además, la electricidad podía viajar a través de ciertos materiales a los que se les llamó conductores, sin embargo, no se entendía el por qué tenía tales propiedades.

este laboratorio, desde 1865 realizó una extensa investigación sobre descargas de gas y fabricó tubos con "vacío absoluto", Hittorf descubrió incluso antes que Crookes en 1869 que los rayos catódicos viajaban en línea recta y que la intensidad de los rayos aumentaba con una presión decreciente, también notó la sombra en la pared de vidrio cuando había una obstrucción en el camino del rayo, tanto Crookes como Hittorf fueron investigadores importantes y compartieron conocimientos sobre este tema. (Ganot & Atkinstone, 1887)

Los experimentos de Hittorf fueron continuados siete años más tarde por Eugene Goldstein (1850 1930), quien entonces trabajaba en la Universidad de Berlín bajo la dirección de Hermann Ludwig Von Helmholtz (1821 1894), en sus experimentos de 1876 Goldstein modificó el cátodo haciéndolo más grande para luego colocar en frente un pequeño objeto que proyectó una sombra en la pared del tubo de descarga, además, demostró que los rayos, para los que ahora acuñó el término "Kathodenstrahlen"(rayos catódicos), (Volker & Manz, 1978), no se emiten en todas las direcciones desde la superficie del cátodo, sino sólo en direcciones normales a la superficie, a pesar de la aparente distinción que esto implica entre la forma en que los rayos catódicos se emiten desde la superficie del cátodo y la de la luz desde la superficie de un filamento, Goldstein, Hittorf y la mayoría de sus colegas alemanes fueron persuadidos de sus propiedades de proyección de sombras, que sin importar si la fuente es puntual o un objeto plano extendido, los rayos consistían en algún tipo de onda electromagnética en el éter. Goldstein tendría mucho más que aportar sobre los rayos catódicos en los años venideros; el tema lo ocuparía esencialmente durante toda su carrera, motivando a varios científicos alemanes entre ellos a Heinrich Hertz (1857 1894), para que estudiase el tema. (Hertz, 1886)

En 1886 Goldstein experimento con un nuevo tubo en el cual el cátodo era un disco con varias perforaciones que estaba perpendicular al eje del tubo figura 4, con esta configuración se observó una luz que salía directamente de los agujeros del cátodo y se dirigía en dirección opuesta del ánodo viajando en línea recta, a este fenómeno le llamó rayos canales o anódicos. (Thomson J. J., 1913)

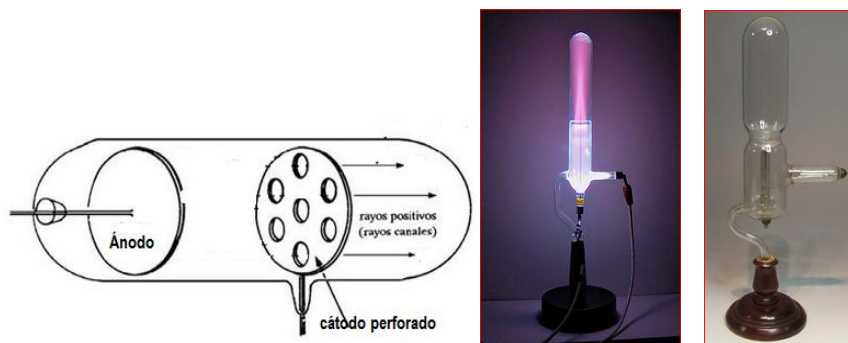


Figura 4 Tubo de rayos canales y fotografía en funcionamiento. El cátodo es un disco perforado que permitió el paso de hasta entonces desconocidos rayos de carga positiva, a la derecha fotografía del tubo usado por Goldstein

encendido y apagado, en la parte superior de la fotografía se ve el resplandor generado por los rayos canales. Fuente: the cathode ray tube site <https://www.crtsite.com/page7-2.html>

Con los experimentos de Goldstein y los de Hittorf antes mencionados, se sembró la semilla para el gran debate que se avecinaba sobre la naturaleza de los rayos, un debate clásico en los anales de la física, que se libró inicialmente entre los físicos profesionales alemanes y una camarilla menguante de físicos aficionados ingleses del mundo, la vieja escuela (Volker & Manz, 1978).

En Europa continental, los tubos de rayos catódicos no sólo eran parte del inventario de los laboratorios de investigación sino que también, se convirtieron en objetos de decoración, gracias a Heinrich Geissler (1815-1879), quien era un experto soplador de vidrio de una familia de fabricantes de arte en vidrio en Thuringen Alemania, cuando trabajó como fabricante de instrumentos en Alemania y los Países Bajos conoció a Hittorf quien lo contrató para que le construyera tubos de descarga para su investigación. Geissler abrió una pequeña empresa en Bonn en 1852 para vender sus propios instrumentos científicos de vidrio a escuelas y universidades. (Dahl, 1997)

En ese mismo tiempo, desarrolló un nuevo tipo de bomba de vacío de mercurio con el que fue capaz de crear un vacío más alto de lo posible en ese momento con equipo estándar, y permitió la producción de tubos de alto vacío que llevaron nuevos desarrollos de instrumentos de física como los que utilizó Crookes, Hittorf, Goldstein y los tubos de rayos x utilizados por Wilhelm Conrad Röntgen.

Geissler experimentó con diferentes gases en tubos de vacío, sus diseños sobresalían por sus formas y llamativos colores, figura 5, estos tubos son los que hoy se conocen como tubos Geissler,¹¹ su lanzamiento al público se hizo en 1864 junto con su nueva bomba de vacío de mercurio.

¹¹ Estos tubos fueron replicados por innumerables fabricantes europeos ganado popularidad y convirtiéndose en artículos decorativos en muy poco tiempo.



Figura 5. Fotografías de tubos Geissler. A finales del siglo XIX sus intensos colores y bellas formas convirtieron estos tubos en obras de arte y decoración, volviéndose muy populares entre el público en general, la clase alta de la época hacia sus pedidos en catálogos publicados por los fabricantes. Fuente: the cathode ray tube site <https://www.crtsite.com/page6-1.html>

El tubo Geissler fue el desarrollo práctico de la luz de descarga, sus tubos eran superiores a los anteriormente construidos pues no necesitaban ser conectados a bombas de vacío, porque venían sellados haciéndolos versátiles y mucho más fáciles de usar; sus tubos se vendieron para investigación y demostraciones en universidades, escuelas y más tarde incluso para uso de entretenimiento doméstico de clase alta; los tubos Geissler contenían un alto vacío porque se logró resolver el problema del electrodo de metal a través del vidrio (fugas), mediante el uso de alambre de platino en un sello de vidrio de plomo que se fundió en la pared de vidrio de cal sodada del tubo.

Durante el último cuarto del siglo XIX los tubos Geissler fueron fabricados por toda Europa volviéndose muy populares, incluso se piensa que los tubos mostrados por Crookes en 1879 no fueron construidos por él, sino que venían de pequeños fabricantes de Alemania. (Cathode ray tube, 2021)

Encontrar el origen de los instrumentos científicos no siempre es fácil, especialmente la cristalería, fechar estos instrumentos a veces es incluso más difícil, cuando retrocedemos en el tiempo, vemos una gran cantidad de cristalería producida en la parte este de Alemania, casi todos procedían de la zona de Turinga, una zona productora de vidrio desde la Edad Media, en donde los primeros sopladores de vidrio vendían sus propios productos en una pequeña tienda ubicada a menudo en su propia casa, muchas de esas pequeñas empresas estaban relacionadas por la familia o vivían en el mismo pueblo, los

productos variaban desde ojos de cristal, adornos navideños, barómetros, termómetros a la cristalería para física y química.

Gracias al interés despertado por las diferentes investigaciones científicas estos fabricantes se convirtieron en grandes casas matrices en especial luego del descubrimiento de los rayos x por el profesor Röntgen.

Hasta este momento la escuela continental europea conducida por lo que hoy en día es Alemania estaba a la cabeza de la investigación con los tubos de descarga, sin embargo, cuando se habla de rayos catódicos casi siempre se empieza por los experimentos de Sir William Crookes (1832 1919), son sus tubos los que usualmente aparecen en las imágenes de los libros de texto, figura 6, antes de Crookes en Inglaterra la experimentación con tubos de descarga estuvo en manos de miembros de una clase persistente de científicos aficionados que constituían un segmento del establecimiento científico de finales de la época victoriana, hombres que buscaban la física experimental como pasatiempo en sus propios laboratorios privados y con sus propios recursos. (Dahl, 1997)

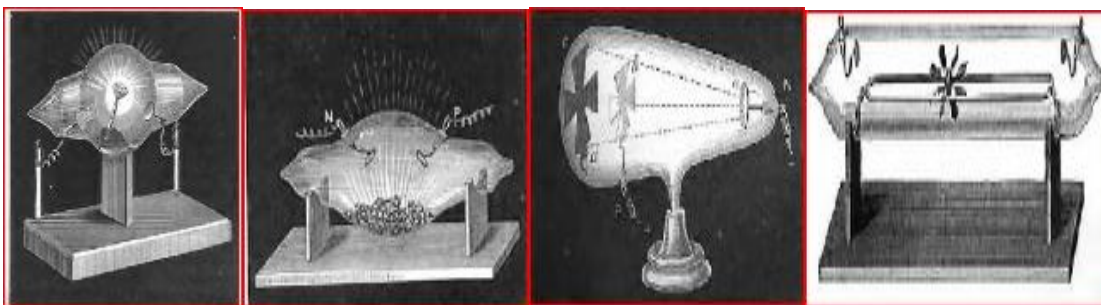


Figura 6. Tubos de Crookes, dibujos de diferentes tubos de descarga utilizados por Crookes en su conferencia en la Asociación Británica para el avance de la ciencia en 1879, en dicha conferencia Crookes mostró algunas de las características de los rayos y como se comportaban al entrar en contacto con diferentes sustancias. Fuente: artículo "On The Radiant Matter" de William Crookes 1879 publicado en Popular Science Monthly

Algunos de ellos con antecedentes universitarios pero formados en áreas distintas de la ciencia experimental (quizás derecho, medicina, a menudo matemáticas puras); algunos herederos de empresas comerciales; algunos terratenientes y señores del campo, para ellos, las ciencias naturales no eran una vocación, sino como pasatiempo, cuatro de estos señores muy dedicados al estudio de la descarga eléctrica fueron: Warren De La Rue,(1815 1889) director de una destacada empresa de fabricación de artículos de papelería; William Spottiswoode (1825 1883), director de una imprenta igualmente próspera; J Fletcher Moulton (1844 1921), abogado; y John Peter Gassiot (1797 1877), comerciante de vinos. (Dahl, 1997)

Cada uno de ellos construyó o utilizó tubos Geissler, modificándolos y adaptándolos a sus propios intereses, por ejemplo, para de la Rue era más importante estudiar el fenómeno de descarga en diferentes sustancias ya que tenía gran interés en la

electroquímica, dedicó gran parte de sus artículos a la construcción y funcionamiento de baterías capaces de alimentar los altos voltajes necesarios para los tubos.

Aunque estos personajes aportaron avances significativos y se convirtieron en respetados miembros de las diferentes sociedades científicas inglesas, muy pocas veces se les menciona como parte de la historia de los rayos catódicos, no encuentro el motivo de esto, tal vez porque sus aportes fueron opacados por sus logros posteriores, o porque en su momento la atención en el fenómeno catódico estaba centrado en las investigaciones alemanas, es por eso que, casi toda la historia en investigación con rayos catódicos en Inglaterra tiene como artífice principal a sir William Crookes (Dahl, 1997)

Crookes al ser químico le da otra visión al fenómeno de descarga, para él el fenómeno lumínico podría ser pensado como una manifestación de un cuarto estado de la materia, que él llamó “materia radiante” (Crookes, 1880, pág. 13), y que posteriormente se le asoció como nombre el estado plasma, siendo los experimentos de Crookes los primeros sobre este tema, en "Sobre la materia radiante", una conferencia en la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia en Sheffield, el viernes 22 de agosto de 1879, Crookes mostró 19 tubos diferentes y discutió el cuarto estado de la materia, muchos de esos tubos fueron la base de nuevos descubrimientos como el tubo de rayos X y el tubo de Braun, que más tarde se convirtió en nuestro conocido tubo de TV.

Después de que Crookes hiciera su primer anuncio en 1879, hizo un segundo anuncio en 1881 sobre las propiedades fluorescentes y fosforescentes de diferentes materiales en su artículo “Discontinuous Phosphorescent Spectra in High Vacua”, mostró que algunos minerales brillan maravillosamente cuando se activa el tubo y se irradian con rayos catódicos, se experimentó con todo tipo de materiales y muestras de minerales fluorescentes, conchas, corales, piedras preciosas, incluso rubíes y diamantes. Figura 7,



Figura 7. Tubos de Crookes irradiando diferentes sustancias con luz catódica, a la izquierda un tubo con rubíes que al ser iluminado realza el color de los cristales, a la derecha coral y varios minerales iluminados por los rayos. Fuente: the cathode ray tube site <https://www.crtsite.com/page7.html>

Los estudios de Crookes, aunque no fueron los primeros, parecen ser un punto de convergencia entre electricistas¹², químicos y físicos; y este poder aglutinante consolida y les da el estatus de punto de partida sobre las investigaciones en rayos catódicos, a tal punto que los tubos de descarga aún son llamados tubos de Crookes, la historia que nos llega de los libros de texto resalta por sobre todas las cosas las investigaciones hechas por los ingleses, resaltando los estudios de Faraday, los de Crookes y los Thomson, más adelante se discutirá algunos aspectos del porqué de este sesgo histórico.

En 1883 Heinrich Hertz experimenta con los tubos de descarga, con la idea definitiva de completar una explicación satisfactoria, para él, existían dos fenómenos distintos en los rayos catódicos, uno de carácter eléctrico, la descarga, y otro de carácter lumínico, asociado a algún tipo de manifestación en el éter (Hertz, 1886), los resultados de Hertz rompen con la tendencia que mostraba los rayos catódicos estaban conformados por algún tipo de ente material cargado eléctricamente, además los experimentos llevados a cabo por su discípulo Philipp Lenard (1862 1947) en 1892 mostraron que los rayos catódicos eran capaces de atravesar películas delgadas de aluminio hecho que en un principio confirmaba la hipótesis de Hertz sobre la naturaleza etérea de los rayos, y confirmando por el momento la no existencia de partículas en los mismos.

Durante la década de los 80 del siglo XIX, la investigación en rayos catódicos fue mayoritariamente encabezada por las investigaciones continentales, este hecho es verificable al hacer un rastreo de las publicaciones científicas del momento donde las investigaciones inglesas sobre el tema brillan por su ausencia (Falconer, corpuscles to electrons, histories of the electrón, 2001), la tendencia se modificó a luz de nuevos descubrimientos, que implicaban que la investigación en rayos catódicos no estaba acabada, por el contrario, podría ser la clave para el entendimiento de la composición de la materia.

En 1895 Wilhelm Conrad Röntgen (1845 1923) identificó un nuevo tipo de radiación que emanaba de los tubos de rayos catódicos, esta radiación tenía la capacidad de atravesar objetos con mucha facilidad, de aquí su utilidad en medicina pues fue posible tomar “fotografías” del interior de nuestros cuerpos figura 8.

¹² En el siglo XIX, se le llamaba electricistas a una serie de personajes que por lo general no pertenecían a la academia y que experimentaban con diferentes artefactos eléctricos, sus fines eran desde simple curiosidad hasta fines económicos.

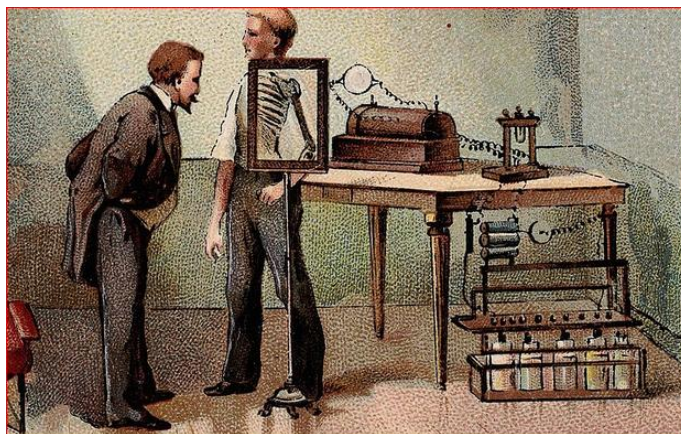


Figura 8 Röntgen tomando una radiografía, en el grabado de principios del siglo XX podemos notar el equipo compuesto de una serie de celdas planté que se observan en la parte inferior derecha, que eran la fuente de voltaje inicial, luego sobre la mesa está el carrete de Ruhmkorff elemento imprescindible para la obtención de altos voltajes, y el tubo catódico que producirá los rayos x, todo este equipo es el utilizado en cualquier investigación sobre rayos catódicos. Fuente página web <https://datosatutiplen.wordpress.com/2017/11/08/efemerides-8-de-noviembre/>

Los rayos x como los llamó Röntgen no sólo tuvo una aplicación práctica inmediata, sino que súbitamente despertó el interés de los ingleses en el fenómeno catódico, ¿cómo es posible que el rayo catódico compuesto por partículas, como lo pensaban los ingleses, era capaz de atravesar objetos? además, las investigaciones hechas ese mismo año de 1895, hechas por el francés Jean Baptiste Perrin (1870 1942) desmentían los resultados experimentales de Hertz sobre la no existencia de carga en los rayos, Perrin mostro con un montaje sencillo basado en el montaje del propio Hertz que los rayos catódicos poseían carga eléctrica, hecho que llamó poderosamente la atención de JJ Thomson quien decide modificar el experimento de Perrin y confirmar la hipótesis de la presencia de carga en los rayos. (Thomson J. J., 1897), los estudios de Thomson estaban más centrados en la conductividad de los gases que el fenómeno de los rayos catódicos en sí, y esto influyó en la forma en que abordó sus experimentos.

Los trabajos de Hertz y los de Thomson son considerados el centro de una controversia en torno a la naturaleza de los rayos catódicos, sin embargo, al rastrear los hechos históricos tal controversia se ve desdibujada y poco clara, la visión de cada uno de ellos tenía sobre el fenómeno condicionó los resultados a los que llegó, sus puntos de vista muchas veces fueron inconmensurables y por ende sus resultados experimentales en apariencia contradictorios, y es por eso, que se les considera una controversia, pero el rastreo de los hechos en este trabajo mostrará que hablar de controversia no se ajusta al contexto histórico, ni a la realidad científica del momento.

Durante la década de los ochentas del siglo XIX las investigaciones inglesas sobre rayos catódicos brillaban por su ausencia, los rayos catódicos no atrajeron mucho la atención en Gran Bretaña entre 1882 y 1894, aunque los físicos británicos mantuvieron una teoría de partículas, no consideraron los rayos catódicos lo suficientemente importantes como para justificar un argumento ni reacción alguna, no porque los británicos desconocieran

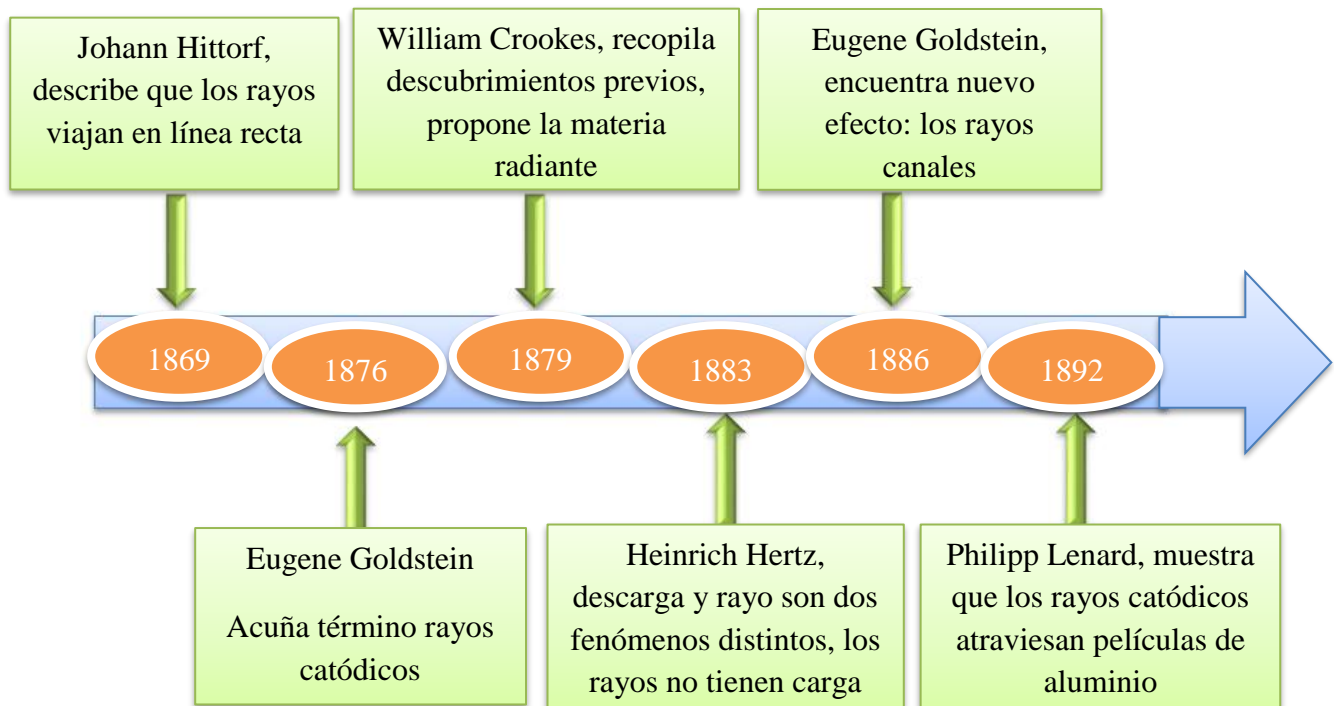
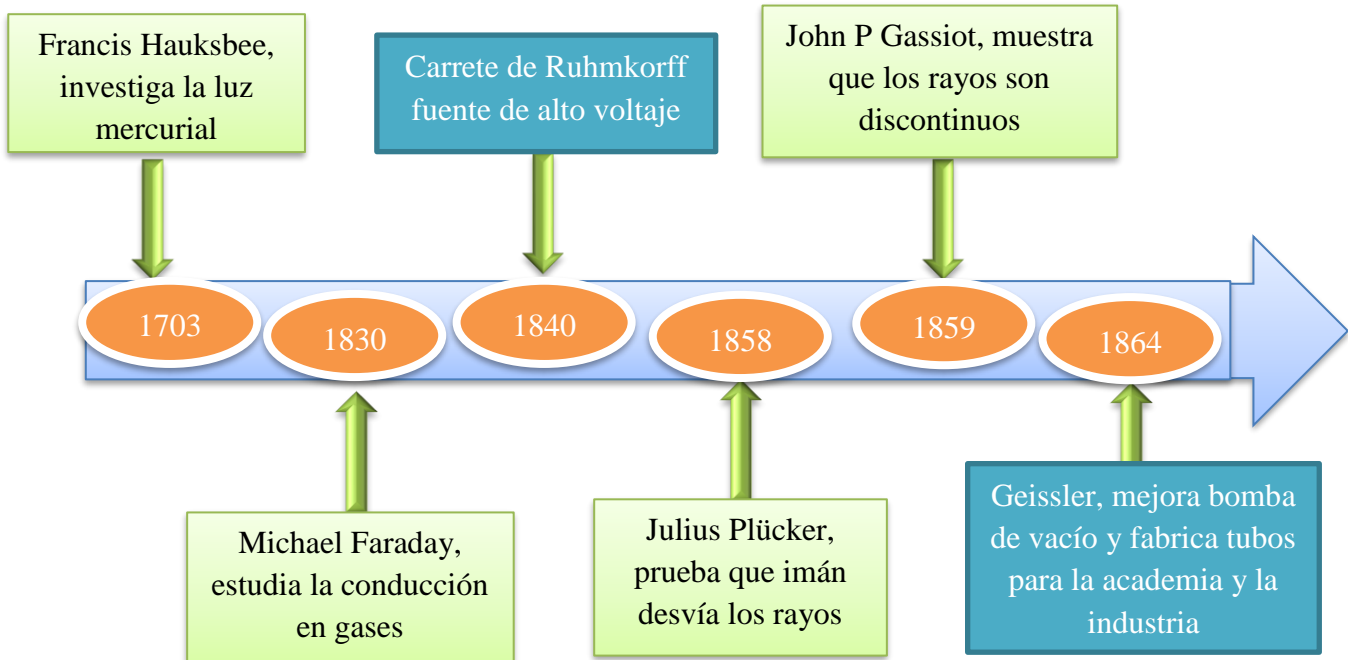
el punto de vista del éter, tanto Goldstein como E. Wiedemann se esforzaron por publicar sus artículos sobre rayos catódicos en inglés, los británicos parecen haber estado completamente desinteresados, estas conclusiones se basan en una breve revisión de artículos publicados en cuatro revistas británicas: Phil. Mag., Proceedings of the Royal Society, Nature y The Electrician. (Falconer, Corpuscles, Electron and cathode rays: JJ Thomson and the "discovery of electron", 1987)

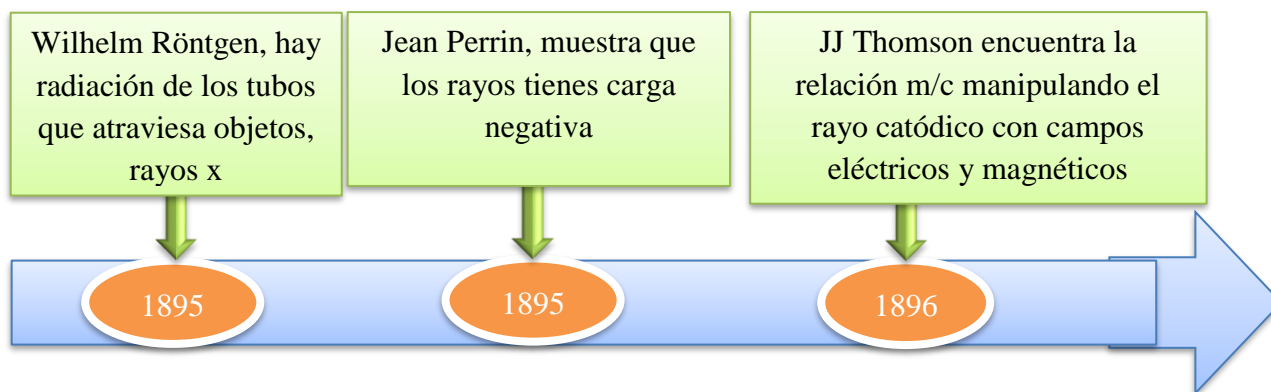
Esto contrasta con la actitud alemana, que entre 1880 y 1894, un número pequeño pero constante de artículos llegó a las páginas del the Annalen der Physik, generalmente dos o tres al año que suman treinta y cuatro en total, en la década de 1890, Lenard hizo una campaña agresiva a favor del punto de vista del éter y sin embargo la falta de controversia parece debida al desinterés británico.

A lo largo de este período, Thomson mencionó los rayos catódicos sólo dos veces: la primera vez fue en su trabajo teórico de 1881 donde investigó las consecuencias de la teoría de partículas de Crookes para la teoría del electromagnetismo de Maxwell, pero aquí el interés de Thomson estaba en el electromagnetismo, no en los rayos catódicos, la segunda mención de los rayos catódicos fue en 1893 en Recent Research Electricity and Magnetism, donde Thomson describió los rayos catódicos como un fenómeno secundario sin importancia. Aceptó el punto de vista británico, de partículas, de los rayos con la condición de que las partículas eran átomos cargados (en lugar de moléculas, como había sugerido Crookes). en privado, sin embargo, se mostraba bastante comprensivo con la teoría del éter. (Falconer, Corpuscles, Electron and cathode rays: JJ Thomson and the "discovery of electron", 1987)

Desde esta visión de los hechos la controversia sobre la naturaleza de los rayos que se cita en algunos libros históricos y que duró por casi 20 años (Weinberg, 1985) no existe, el desinterés de los británicos por el tema se ve reflejado en las escasas publicaciones de la época y por las declaraciones de Thomson en algunas conferencias, la discusión general y las tensas relaciones personales surgieron sólo en 1896, después de que el descubrimiento de los rayos X despertara el interés de los británicos, al poco tiempo aparecen las investigaciones de Thomson con los rayos y su posterior aceptación.

En la siguiente línea de tiempo se resume la trayectoria de investigación con tubos de descarga, allí se muestra de manera simplificada la evolución en la investigación con rayos catódicos





Línea del tiempo con algunos de los hechos más destacados en el estudio de los rayos catódicos. Fuente propia.

Los tubos de descarga fueron evolucionando desde una máquina electrostática a un instrumento de mediada, cada paso en su evolución iba de la mano de la visión del científico, las formas y configuraciones de los tubos se adaptaban a el tipo de investigación que se hacía, por ejemplo, el interés de Crookes por los tubos catódicos viene de la necesidad de explicar el funcionamiento de uno de sus inventos, el radiómetro, en 1878 decide emprender una investigación sospechando que el espacio oscuro, que separa el cátodo del resplandor del cátodo en los tubos de Geissler, estaba de alguna manera relacionado con la capa de presión molecular que causa el movimiento en el radiómetro (Dahl, 1997)

El radiómetro se transformó en el "radiómetro eléctrico", un tubo de descarga en el que el "pequeño molino de viento" actuaba como cátodo, con este aparato se encontró que el espacio oscuro se extendía más desde el lado ennegrecido de las paletas, pero las paletas giraban sólo cuando la presión en el tubo se redujo al punto donde el espacio oscuro en los tubos mostrados por Crookes, se extendía hasta la pared del tubo del radiómetro y allí hacía que el vidrio brillara.

Este efecto sugirió para Crookes que la descarga era una iluminación de las líneas de presión molecular, además, dado que el grosor del espacio oscuro aumentaba a medida que se reducía la presión, el espacio oscuro podía construirse para ser simplemente una manifestación visible del camino libre medio molecular, en poco tiempo, el radiómetro se modificó una vez más, de hecho, las modificaciones eran simplemente versiones más eficientes de los tubos de Geissler, y que ahora se conocieron como 'tubos de Crookes', que tenían configuraciones que favorecían sus hipótesis de la materia radiante.

Algo similar podemos afirmar de las modificaciones hechas en los tubos en las investigaciones de Goldstein que lo llevó a reproducir el efecto de los rayos anódicos o canales, su visión etérea de los rayos lo llevó a preguntarse sobre los efectos de perforar el cátodo, sin sospechar que tal cambio daría pie para nuevos fenómenos.

Una de las investigaciones más destacadas sobre rayos catódicos son las realizadas por Heinrich Hertz y John Jhosep Thomson, las del primero, un tanto olvidadas por considerarse un fracaso (Buchwald J. Z., 1995) y las del segundo por llegar a nuestros días como el experimento clave para la confirmación de la existencia de los electrones, a continuación se hace un análisis de los experimentos de estos dos científicos basado en las publicaciones originales con la esperanza de mostrar una perspectiva diferente de sus trabajos.

2. Los experimentos de Hertz

En la segunda mitad del siglo XIX las investigaciones sobre electromagnetismo estaban en su punto más alto, la publicación del tratado de electromagnetismo por James Clerk Maxwell (1831-1879), logró estructurar una teoría consistente matemáticamente que unificó los fenómenos eléctricos, magnéticos y la naturaleza ondulatoria de la luz, además, planteó la existencia de las ondas electromagnéticas, sin embargo, la teoría de Maxwell necesitaba de algunas comprobaciones experimentales en torno a la relación de los fenómenos electromagnéticos con la materia, la existencia misma de las ondas, y su comportamiento al interior de los materiales.

Es en este panorama donde Heinrich Hertz (1857-1894) inicia sus investigaciones en Berlín, entre los años 1878 y 1883, Hertz se formó bajo la tutela de Herman Von Helmholtz (1821-1894), de él aprendió la teoría electromagnética, Helmholtz era, por aquellos años, uno de los pocos físicos del continente europeo que apreciaba la importancia de los trabajos de Maxwell, la mayoría de los físicos alemanes aceptaban para los fenómenos electromagnéticos las teorías de acción a distancia de F Neumann (1798-1895), y W Weber(1804-1891) (Whittaker, 1910), en ellas las fuerzas electromagnéticas se propagan desde un cuerpo a otro con velocidad infinita, por su parte Helmholtz desarrollo una teoría híbrida con la cual intentó conciliar las teorías de acción a distancia con la teoría de campos de Maxwell.

En 1885 Hertz es nombrado profesor del politécnico de Karlsruhe, allí contó con las condiciones ideales para desarrollar sus investigaciones que lo llevaron al descubrimiento y caracterización de las ondas electromagnéticas, que lo catapultaron a la fama de gran experimentalista, cuatro años antes de este gran logro (1883), Hertz había hecho investigaciones sobre los rayos catódicos, aconsejado por su colega E Goldstein (1850-1930), quien lo introdujo en el tema y le prestó su colaboración. Para esta época las explicaciones sobre la naturaleza y el comportamiento de los rayos catódicos todavía eran muy controvertidas, casi en líneas nacionalistas, la mayoría de los físicos ingleses y franceses pensaron que eran partículas electrificadas, mientras que los alemanes en su mayoría, pero no por unanimidad, respaldaron la idea de que eran algún tipo de ondas en el éter.

La visión de Hertz frente a los rayos catódicos se centraba en la existencia de dos fenómenos independientes, por un lado, la luz emitida por el cátodo a lo que llamó “rayo catódico puro” y por otro lado la descarga o corriente que acompañaba ese rayo.

El “rayo catódico puro” no era más que una onda y por lo tanto su naturaleza es continua, se propaga por la agitación del éter con características idénticas a la de la luz, Hertz nunca negó la existencia de partículas cargadas, por el contrario, con sus cálculos de la

continuidad de la descarga, que veremos más adelante, se puede deducir que de existir partículas cargadas serían en extremo pequeñas, Hertz no hace mención alguna acerca de este tema, pues no era el objetivo de sus investigaciones con descargas catódicas, para él era claro que las partículas eran parte del fenómeno de descarga eléctrica y no del fenómeno lumínico. (Hertz, 1886, pág. 227)

Casi todos los experimentos hechos por Hertz concernientes a los tubos de descarga fueron recopilados en *Miscellaneous Papers*, una publicación inglesa de 1896 traducida del alemán por D.E Jonesy y G.A Schott,¹³ centrada en los experimentos sobre electromagnetismo y su comportamiento en los materiales, además recopila una serie de ingeniosas construcciones de equipo para experimentación hechas por el mismísimo Hertz, las cuales al ser vistas como un todo muestran la evolución y grado de sofisticación de aquella época en los laboratorios alemanes, los *Miscellaneous Papers* no son solamente un compendio de publicaciones experimentales sino que va más allá, pues en su prefacio hay incluidas cartas de Hertz a sus colegas y familiares donde por supuesto trata temas referentes a sus experimentos y puntos de vista de sus resultados, brindando una visión más completa que involucra no sólo el quehacer científico sino que también se alcanza a apreciar el hombre detrás de la ciencia.¹⁴

Los experimentos sobre los rayos catódicos hechos por Hertz hasta 1883 y recopilados en *Miscellaneous Papers* en 1886 se desarrollaron en tres partes: una primera enfocada en determinar la continuidad de las descargas usando como fuentes pilas voltaicas, la segunda, buscaba estudiar el comportamiento de los rayos bajo efectos electromagnéticos, y la tercera enfocada en el estudio del comportamiento de los rayos bajo efectos electrostáticos.

A continuación, se hace una descripción y análisis del capítulo XIII titulado, *Experiments on the cathode discharge*¹⁵ (experimentos sobre la descarga catódica), se ha tratado de reconstruir las descripciones de los experimentos con esquemas simples que ayudan a la comprensión del funcionamiento de los montajes experimentales, en lo posible se ha omitido unidades de medida utilizadas en la época y que no fue posible su conversión al Sistema Internacional

2.1 La continuidad de la descarga en los tubos

Para iniciar sus estudios sobre los tubos de descarga, Hertz parte de unos experimentos previos donde se mostraba que las descargas de los tubos eran de carácter corpuscular, los experimentos hechos por John P Gassiot (1797-1877), en donde al interior de un tubo

¹³ Profesores de física de University College Wales, Aberystwyth del Reino Unido.

¹⁴ Los *Miscellaneous Papers* no incluyen los trabajos sobre ondas electromagnéticas, obra por la cual Hertz es reconocido mundialmente.

¹⁵ Publicado originalmente en alemán en *Wiedemanns Annalen*, 19, pp. 782-816, 1883.)

de descarga se hace incidir el rayo catódico sobre un espejo que podía rotar, y que según Gassiot, la rotación del espejo era posible ajustarla de tal manera que fuera identificable las pulsaciones del rayo catódico, mostraron que la descarga de los tubos era discontinua, sin embargo, Johann Wilhem Hitorrf (1824-1914) encuentra que bajo ciertas condiciones de la batería, no es posible reproducir los resultados de Gassiot, además, cálculos hechos por Gustav Heinrich Wiedemann(1828-1899), sugirieron que para descargas muy rápidas el método de Gassiot no era confiable, posteriormente Warren de la Rue (1815-1889), logra el mismo resultado de Gassiot pero sólo bajo condiciones especiales, en este momento, para Hertz la discontinuidad o continuidad era aún un tema no tan claro, la cuestión no era si una descarga aparentemente continua puede mostrarse en ciertas circunstancias como discontinua, no hay duda de que esto es posible, era por lo tanto necesario un planteamiento experimental diferente.

La actividad experimental debe centrarse en obtener una descarga catódica continua que no sea posible encontrarle discontinuidad bajo ningún método conocido, en palabras del propio Hertz: ¿Podemos establecer la existencia de una descarga que es indudablemente una descarga catódica, pero en la que, sin embargo, no se puede detectar ningún rastro de discontinuidad, incluso por los métodos más delicados?; en ese sentido, Hertz analiza los experimentos previos con tubos de vacío y objeto que los resultados mostrados sobre la naturaleza disruptiva de la descarga, pueden estar influenciados por el tipo de fuente utilizada en dichos experimentos, por aquella época, los equipos más populares con que se conseguía los altos voltajes necesarios para observar el fenómeno de luminiscencia en los tubos eran las bobinas de inducción o carretes de Ruhmkorff.¹⁶

Estos dispositivos utilizaban una batería de pocos voltios y dos bobinas que mediante la inducción electromagnética alcanzaban altos voltajes fácilmente, sin embargo tenían la desventaja de que el alto voltaje suministrado no era continuo sino que era una sucesión de pulsos, Hertz aseguró que estos pulsos pueden llegar a la consecución de resultados poco confiables favorables a la naturaleza disruptiva de la descarga y por lo tanto, es necesario utilizar una fuente continua constante en el tiempo para poder mostrar que el fenómeno es continuo.

Hertz reproduce los experimentos hechos por Warren De La Rue sin obtener los mismos resultados, sin embargo, esto no es un argumento fuerte a favor de la continuidad de la

¹⁶ El carrete de Ruhmkorff está formado por una bobina primaria de pocas vueltas alimentada por la corriente continua de bajo voltaje. Esta bobina, al ser recorrida por una corriente origina un campo magnético que atrae a una masa ferromagnética que forma parte del circuito por el que se alimenta, interrumpiendo así el paso de corriente. Este brusco cambio de corriente induce un alto voltaje en la bobina secundaria al estar formada por un elevadísimo número de vueltas. Tras interrumpirse la corriente en la bobina primaria, ésta deja de atraer la masa que, al volver a cerrar el circuito, vuelve a provocar un cambio brusco de la corriente que la recorre y, en consecuencia, vuelve a inducir una elevada tensión en la bobina secundaria. El ciclo descrito se repite de manera indefinida. Tomado de <https://institutosanisidoro.com/fisica-quimica/carrete-de-ruhmkorff.html>

descarga, pues como lo veremos más adelante, Hertz logra mostrar que la respuesta de los instrumentos utilizados está condicionada a la frecuencia de la descarga.

2.1.1 El primer montaje: Replicando a De la Rue.

Hertz inicia sus experimentos construyendo su propia pila conformada de varias celdas Planté, montadas en un arreglo de tal manera que suministrara la diferencia de potencial necesaria para obtener descargas en un tubo de 34 cm de largo por 2 cm de ancho; en la figura 9, se muestra un esquema de la configuración hecha por Hertz y que intentó replicar los resultados de Warren de la Rue, básicamente se tiene un circuito en serie configurado por la batería de Hertz, el tubo de descarga, y una bobina de inducción cuya bobina primaria cierra el circuito y la bobina secundaria está conectada a un galvanómetro y un dinamómetro.

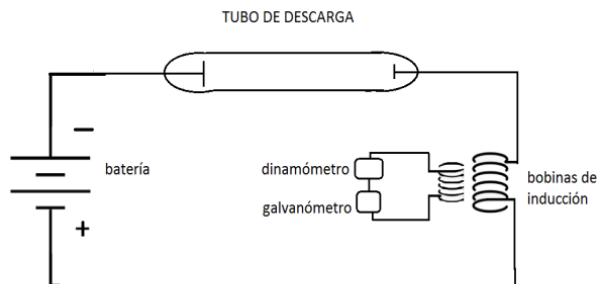


Figura 9. Montaje de Hertz basado en los experimentos de De La Rue, en él un dinamómetro y un galvanómetro son conectados a una bobina de inducción. Fuente: propia basada en la descripción de Hertz

Con este montaje Hertz no logró obtener ninguna medida en los instrumentos, esto indicaría que la descarga en el tubo es continua ya que esta configuración está hecha para que, al tener descargas discontinuas en el tubo, la corriente en la bobina primaria varíe en el tiempo, produciendo un campo magnético variable que induce una diferencia de potencial en la bobina secundaria, que a su vez generaría una corriente que en teoría debe ser detectada por los instrumentos conectados a la misma.

Ante este resultado, Hertz decidió modificar el experimento cambiando el tubo por una resistencia que completará el circuito, y remplazando la fuente por una batería Daniell, los resultados obtenidos fueron exactamente iguales a su primera prueba, solo obtiene medidas en sus instrumentos cuando se conecta y se desconecta la batería, para Hertz esto probó que la descarga es continua, sin embargo, aún no se convence y sospecha de la sensibilidad de los instrumentos y en especial de la respuesta de las bobinas.

2.1.2 El segundo montaje: La respuesta de las bobinas al cambio de la corriente

Para demostrar la respuesta de las bobinas decide hacer el siguiente montaje: reemplaza las bobinas por un puente de Wheatstone¹⁷ figura 10, el puente en tres de sus cuatro brazos tenía resistencias metálicas y en el brazo restante una pequeña bobina, además el puente tiene entre sus extremos un dinamómetro, la configuración fue calibrada de tal manera que el dinamómetro no presente ninguna deflexión cuando a través de él circule una corriente continua; pero se espera que al circular una corriente variable producto de una descarga discontinua del tubo, el dinamómetro experimentará una deflexión pues la resistencia de la bobina variará por efectos de la inductancia.

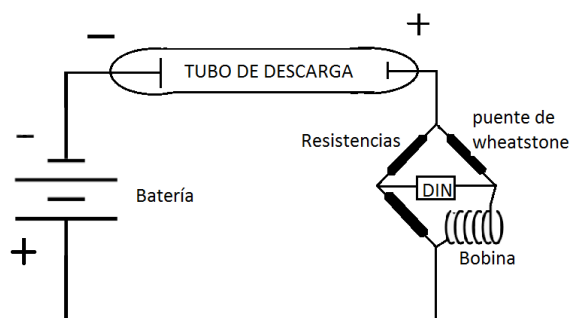


Figura 10. Circuito de tubo catódico con puente de Wheatstone, las bobinas de inducción son reemplazadas por un puente de Wheatstone con un dinamómetro, DIN, en su parte central, con la idea de verificar la sensibilidad en la detección de intermitencia en las descargas. Fuente: propia basada en las descripciones de Hertz

Los resultados obtenidos reforzaban la hipótesis de la continuidad de las descargas pues en ningún caso se dio deflexión del dinamómetro, sin embargo, Hertz supuso que, si las fluctuaciones de la descarga son muy rápidas, (cien mil por segundo)¹⁸, la respuesta de la bobina se ve limitada por la autoinducción, por eso para el siguiente experimento decide prescindir de las bobinas.

2.1.3 El tercer montaje: El condensador como sensor de discontinuidad de la descarga

Nuevamente Hertz utilizó un puente de Wheatstone, esta vez sus cuatro brazos tenían resistencias y en lugar de dinamómetro se utilizó un electroscopio de láminas de oro, adicional a esto, a uno de los brazos se le puede conectar un condensador en paralelo

¹⁷ El puente de Wheatstone es un circuito eléctrico que se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. Estos están constituidos por cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, siendo una de ellas la resistencia bajo medida. Es un instrumento de gran precisión que puede operar en corriente continua o alterna y permite la medida tanto de resistencias óhmicas como de sus equivalentes en circuitos de corriente alterna en los que existen otros elementos como bobinas o condensadores (impedancias).

¹⁸ En Miscellaneous Papers no hay claridad de cómo llega a ese cálculo.

figura 11, la configuración de las resistencias era tal que al circular una corriente continua no habrá ninguna separación de las láminas del oro.

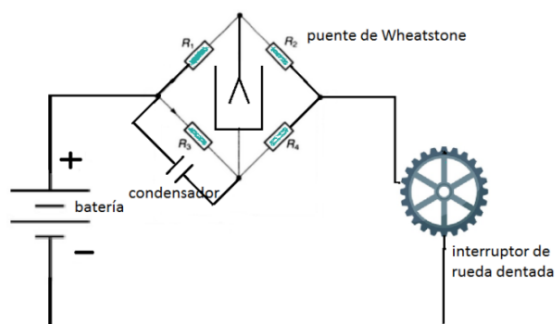


Figura 11. Circuito con interruptor de rueda dentada y condensador, en este montaje no hay presencia de bobinas, utiliza un condensador para determinar el límite de detección de discontinuidad del puente de Wheatstone. Fuente: propia, basada en las descripciones de Hertz

Cuando se conectó el condensador las láminas no presentaron alguna separación, el resultado es consecuencia de una corriente continua pues indica que el voltaje entre los brazos del puente no ha cambiado, esto puede ser explicado de la siguiente manera:

Si circula una corriente continua por el puente el condensador no conduce la electricidad pues al cargarse se comporta como un circuito abierto, el equilibrio entre los brazos del puente no se rompe por lo tanto no hay deflexión del electroscopio, si por el contrario, por el puente circula una corriente discontinua, el condensador conduce la electricidad y esto hace que la corriente que circula por el brazo del puente donde está conectado el condensador sea diferente a la de los otros brazos, rompiendo el equilibrio causando separaciones del electroscopio, por lo tanto este montaje es sensible ante los cambios de la corriente.

Para probarlo, Hertz decidió introducir una rueda dentada la cual actúa como interruptor al hacerse girar, así se obtiene artificialmente una corriente discontinua, que hizo que el electroscopio separara sus láminas de oro, sin embargo, Hertz también advirtió que si la frecuencia es demasiado alta la corriente no alcanzaría a circular por las resistencias¹⁹. implicando que hay cierto límite para el instrumento.

En lugar de considerarse como un problema Hertz decidió aprovechar esta propiedad para verificar la continuidad de la descarga.

¹⁹ En investigaciones anteriores Hertz encontró que si una corriente oscila demasiado rápido no es capaz de atravesar un metal. La corriente directa en un alambre conductor se distribuye homogéneamente sobre la sección transversal, en una corriente variable, la distribución de la corriente se concentra sobre la superficie del alambre, esto hace que la resistencia del alambre al paso de la corriente se incremente y dependiendo de la frecuencia puede llegar a evitar el paso de esta.

2.1.4 El cuarto montaje: La continuidad de la descarga verificada con un electroscopio

Un electroscopio de láminas de oro y una resistencia son utilizados como detectores, las láminas son conectadas al electrodo negativo y son suspendidas dentro de una caja metálica que puede ser conectada tanto al electrodo positivo como al electrodo negativo mediante una resistencia y un interruptor figura 12.

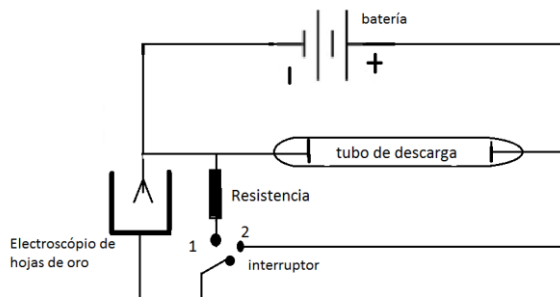


Figura 12 Circuito con electroscopio y resistencia como detector de la fluctuación de la descarga, en la posición 2 el electrómetro muestra divergencia en las láminas de oro, en la posición 1 las láminas no experimentan cambios. Fuente: propia basada en las descripciones de Hertz

Cuando la corriente circula a través del tubo y la caja está conectada al electrodo positivo, (posición 2 del interruptor), las hojas del electroscopio divergen fuertemente, sin embargo al poner la caja metálica en contacto con el electrodo negativo a través de la resistencia, (posición 1 del interruptor), las hojas del electroscopio no mostraron ningún efecto, este resultado indicaría que la descarga es continua, pues de no serlo, las láminas del electroscopio deberían separarse, ya que ellas están al mismo potencial del cátodo y seguirían sus fluctuaciones, pero la caja no podría seguir las mismas fluctuaciones por la presencia de la resistencia causando la separación de las láminas de oro, Hertz comprueba la sensibilidad y eficacia de su montaje a la variación de corriente interrumpiendo artificialmente la corriente proveniente de la batería y comprobando que el montaje en la posición 1 del interruptor presenta fluctuaciones, de esta manera confirma y calcula que la descarga es continua hasta el límite de detección que sería de 50 millones de descargas por segundo.

En todos estos experimentos podemos notar un progresivo desarrollo de la idea de continuidad de los rayos, Hertz pretendía en cada paso desarrollar un método que pudiese medir de manera más sensible la discontinuidad de la descarga en los tubos, era consciente que había un límite para dichas medidas, pero se aseguró que el instrumento fuere lo suficientemente sensible como para determinar interrupción en la descarga de hasta dos mil millones por segundo. Rango que él considera suficiente para asumir que la descarga alimentada por baterías es continua.

Analizando este resultado en retrospectiva, la inquietud de Hertz por mostrar un límite detectable de descargas pudo ser un camino alternativo para la confirmación de la existencia

de partículas cargadas en los fenómenos eléctricos, en *Miscellaneous Papers* él no profundiza acerca de la naturaleza corpuscular de la descarga, no era su objetivo, él quería mostrar que las fuentes de voltaje utilizadas en los experimentos previos para reproducir el fenómeno luminiscente, podrían alterar los resultados mostrando una falsa discontinuidad de los rayos, sin embargo, no deja de ser inquietante que su resultado sobre los límites de detección mostraban de cierta manera la existencia de partículas cargadas y que dichas partículas podrían ser de un tamaño diminuto, al parecer Hertz no lo vio así, pues al asumir que un límite de detección de descargas de dos mil millones por segundo se podría considerar como una descarga continua, muestra que no pensó en la posibilidad de que las descargas estuvieran conformadas por partículas diminutas.

2.2 El rayo catódico y la corriente viajan por diferentes caminos

En la segunda parte de sus experimentos Hertz busca estudiar las propiedades electromagnéticas de los rayos catódicos, para ese entonces era bien conocido que un imán es capaz de desviar el haz de luz en el tubo, y la opinión que solían tener los físicos acerca de los fenómenos luminosos en los tubos era la siguiente: los rayos catódicos indican el camino de la corriente, y su luz azul surge del brillo o la fosforescencia de las partículas de gas bajo la acción de la corriente. (Hertz, 1886, pág. 238).

Hertz duda de tal afirmación y decide que buscará las evidencias que la refuten de manera experimental; es en ese sentido que sus montajes van encaminados a responder la siguiente pregunta: ¿la corriente viaja a lo largo de los rayos catódicos antes de virar hacia el ánodo?, de ser negativa la respuesta, surge la necesidad de describir el camino real de la corriente, por eso Hertz se plantea una nueva inquietud: ¿Cuál es el camino de la corriente en un espacio en el que están abiertos varios caminos? (Hertz, 1886).

Antes de abordar las respuestas a estas inquietudes decide investigar las propiedades electromagnéticas de los rayos, con la esperanza de encontrar diferencias entre las trayectorias del haz y de la corriente, para ello, Hertz construye dos experimentos, uno donde busca observar si existe algún tipo de influencia por parte de los rayos sobre un imán en los alrededores del tubo, y otro en el cual construye un caja rectangular a manera de ventana de dos capas donde explora la trayectoria de la corriente mediante un imán.

2.2.1 La influencia de los rayos sobre un imán

En este montaje se utiliza un tubo de cristal de 300 mm de largo y 28 mm de diámetro, en donde se introduce un cátodo hecho de latón y que se ajusta al diámetro del tubo, en su parte central el cátodo es atravesado por otro tubo delgado de cristal, por donde cruza un alambre que se proyecta un poco más adelante del cátodo, convirtiéndose en el ánodo figura 13,

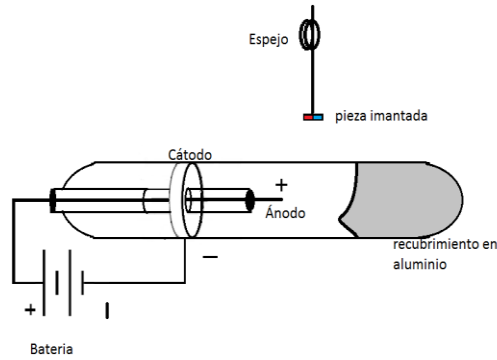


Figura 13. Tubo catódico con perforación en el cátodo, el cátodo es atravesado concéntricamente por un alambre que en su extremo funciona como ánodo. Esta configuración permite la cancelación de los efectos electromagnéticos de las descargas del cátodo, de esta manera si existe algún efecto de este tipo, solo sería producto del rayo catódico, además el tubo es recubierto por papel aluminio como blindaje a cualquier efecto electrostático externo. Fuente: propia basada en la descripción de Hertz

Con esta configuración espacial del tubo se intenta cancelar cualquier efecto electromagnético generado por la descarga, pues el flujo magnético generado por la corriente del cátodo es compensado por el flujo magnético de la corriente del ánodo que va en sentido contrario, posteriormente el tubo es recubierto por una lámina muy delgada de aluminio que se conecta a tierra con el fin de cancelar cualquier efecto electrostático.

Como instrumento de medida Hertz utiliza un pequeño resorte fuertemente imantado de 12mm de largo, que está colgando de un alambre muy delgado, en donde hay un espejo que puede reflejar una luz sobre una escala graduada, figura 14, de esta manera cualquier rotación de la pieza imantada puede ser detectada mediante el movimiento del haz de luz sobre dicha escala, esta configuración es similar en su principio de funcionamiento a un galvanómetro de espejo o de Thomson,²⁰ modificado para responder a efectos magnéticos.

²⁰ Inventado por William Thomson (Lord Kelvin) en 1858, hasta entonces uno de los instrumentos para medir corrientes más sensibles, diseñado para las comunicaciones a través de cables pues se necesitaba un detector muy sensible a los pulsos de corriente del código Morse, el galvanómetro de Thomson constaba de un espejito que colgaba de un hilo de seda, tenía adheridos cuatro imanes a su espalda e iba dispuesto en el interior de una bobina de cobre por la que circulaba corriente eléctrica. El espejo recibía un haz luminoso procedente de una lámpara y lo reflejaba como un brillante punto de luz sobre una escala numérica impresa en una pantalla. Si el instrumento no recibía corriente, el punto de luz permanecía estacionario marcando el cero en la escala. Pero al pasar electricidad, el campo magnético creado por la bobina hacía girar el espejo (de forma parecida a la aguja de una brújula). Tomado de museo virtual, Universidad Autónoma de Madrid http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Thomson,%20William.xml

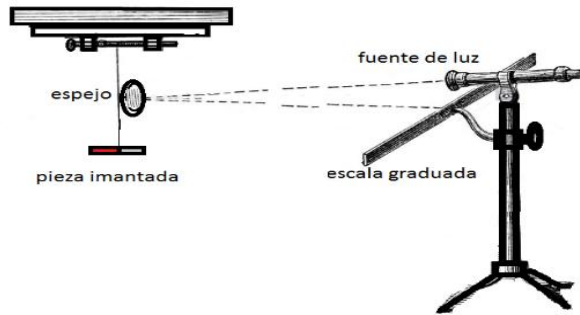


Figura 14. Instrumento de medida de los efectos magnéticos provocados por los rayos catódicos, la pieza imantada cuelga de un alambre muy delgado, cuando la pieza está en presencia de un campo magnético rotará alineándose con el mismo, tal movimiento es perceptible gracias a un espejo sujetado del alambre delgado y que refleja una luz sobre una escala graduada, esta configuración hace posible detectar con facilidad cualquier deflexión del imán en presencia de campos magnéticos, Fuente: propia basada en la descripción de Hertz.

El tubo es acercado de diferentes formas hacia la pieza imantada colgante y de ninguna manera hubo algún movimiento detectable en la escala, para Hertz este resultado confirma que los rayos catódicos no producen ningún efecto electromagnético, o si lo producen, éste es demasiado pequeño como para ser detectado por su instrumento, por lo tanto, concluye que si existiera alguna presencia de fuerza magnética sería únicamente producto de la descarga en el tubo y no del rayo catódico.

Este resultado lleva implícitamente la consecuencia de que los rayos y la descarga siguen caminos diferentes, tal como Hertz lo afirmaba, motivándolo a construir otro experimento donde pueda determinar claramente el camino que sigue la corriente (descarga), mediante líneas equipotenciales magnéticas.

2.2.2 El camino de la corriente y su relación con el rayo catódico

Dos placas de vidrio de 12cm de largo por 12 cm de ancho son unidas en sus bordes por una lámina de latón fuertemente ajustada que permite un espacio entre las placas de 1 cm, y que tiene acoplado un tubo con una válvula que facilita la extracción del aire entre ellas, figura 15, además, mediante un intrincado mecanismo es posible introducir dos conexiones móviles que sirven como cátodo y ánodo, de esta manera se configura una especie de tubo cuadrado (que llamaremos caja de descarga por su forma) con una área un poco menor a 144 cm² donde es posible rastrear el camino de la corriente mediante los efectos que produce al moverlo alrededor de un imán colgante.

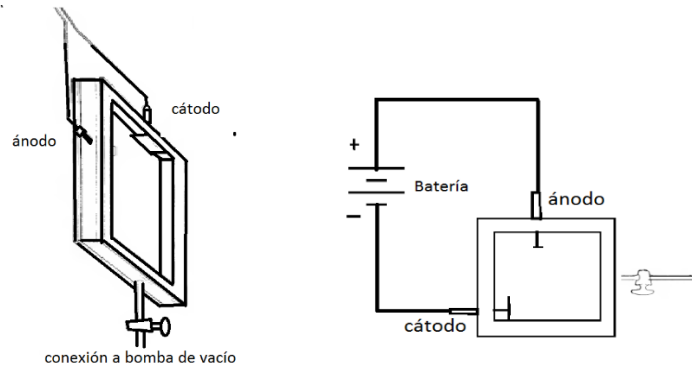


Figura 15. Izquierda: caja de descarga desarrollada por Hertz para determinar la trayectoria de la corriente. Derecha: vista superior de la caja con conexiones a la batería; la idea con esta configuración rectangular es permitir que la corriente pueda tener caminos diferentes al rayo catódico. Fuente: adaptación de *Miscellaneous Papers 1886*

Este dispositivo es montado sobre una cuadrícula de manera horizontal totalmente nivelado, la cuadrícula servirá como marco de referencia para las medidas, como instrumento de detección de la corriente se utiliza la adaptación del galvanómetro de espejo del experimento anterior, la pieza metálica cuelga a una altura de unos pocos milímetros de la caja, figura 16, de esta manera se puede determinar con cierto grado de precisión la dirección de la fuerza magnética ejercida por la corriente que fluye dentro de la caja, para posteriormente deducir la trayectoria que sigue la misma.

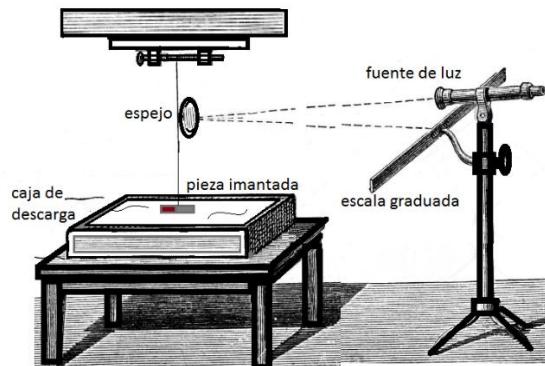


Figura 16. Montaje de líneas de corriente, aquí vemos la disposición de la caja y el imán utilizado como dispositivo detector, la caja es ubicada horizontalmente para ser movida sin que el imán se mueva, de esta manera se traza la trayectoria de la corriente al interior de la caja, cualquier movimiento de la pieza imantada es detectado por el reflejo de la luz sobre la escala graduada. Fuente: adaptación de grabado siglo XIX de galvanómetro espejo diseñado con Wilhelm Eeber, Alamy foto de stock, identificación de la imagen B41AT1

Luego de conectar la caja a una batería y generar el vacío suficiente para que se formaran con claridad los rayos catódicos en su interior, Hertz procede a mover la caja de tal forma que no haya deflexión del imán, haciéndolo de esta manera él supone que la trayectoria que debe recorrer la caja es la misma que recorrería la corriente, pues para que permanezca quieto el imán colgante no debe experimentarse ninguna variación en la fuerza magnética.

Para interpretar este procedimiento recordemos que una corriente que circula por un alambre es capaz de generar un campo magnético en sus alrededores cuya dirección es tangente a un círculo que rodea al alambre, por eso es usual representar el campo magnético por anillos en cuyo centro está el alambre conductor, figura 17 izquierda. Recordemos también, que el campo decrece con la distancia radial al alambre, y que en la actualidad este campo se expresa matemáticamente como $\beta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, en donde I es la corriente, μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío y r la distancia perpendicular del alambre al punto donde se mide el campo, la dirección del campo es determinada por la regla de la mano derecha y se representa por flechas sobre los anillos.

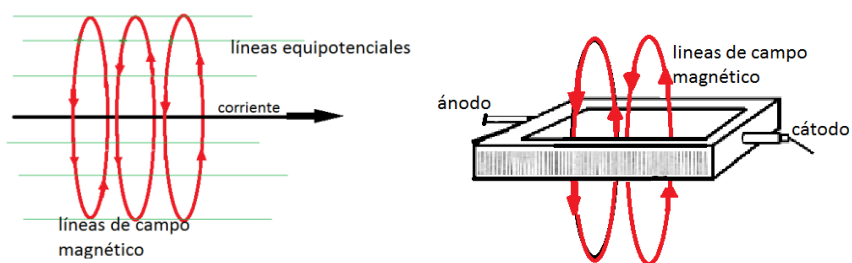


Figura 17. Líneas de campo magnético en la caja de descarga, izquierda; líneas de campo magnético para un alambre por donde circula una corriente, en verde las líneas equipotenciales donde el valor de campo y su dirección no varía. Derecha: representación de las líneas de campo magnético en la caja de descarga. Fuente propia

Por otra parte, tal como lo descubrió Oersted en su famoso experimento, cuando se acerca un imán a un alambre por donde circula una corriente éste se alinearán en dirección del campo magnético que produce la corriente. Ahora bien, existen unas trayectorias en el espacio en cercanías del alambre en donde el valor y dirección del campo magnético no cambia, dichas trayectorias pueden ser representadas por líneas y son llamadas líneas equipotenciales magnéticas, dichas líneas son paralelas a la corriente en todo punto y si un imán las recorre no experimentará deflexiones en su orientación.

En la caja de descarga la corriente que circula también generará un campo magnético de la misma manera que lo hace un alambre conductor y cuyos anillos de campo magnético entran y salen de la caja, figura 17 derecha. Cuando se mueve la caja de descarga de tal manera que el imán no cambie de dirección está implicando que la caja está recorriendo las líneas equipotenciales de campo magnético y como dichas líneas son paralelas en todo punto a la dirección de la corriente la trayectoria de la caja está trazando la trayectoria de la corriente, de esta manera, Hertz aprovechó el campo magnético de la corriente en la caja y usando como sensor de campo al imán colgante demostró que las líneas de la corriente tienen una trayectoria diferente a la del rayo catódico.

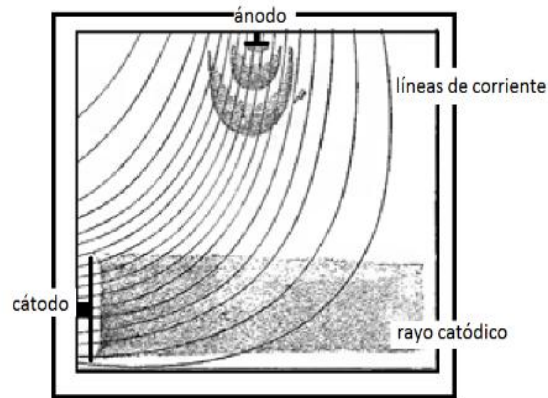


Figura 18. líneas de corriente trazadas por Hertz, la sombra grisácea es el rayo catódico, nótese que hay regiones en la caja donde hay presencia de corriente y no del haz catódico. Fuente: *Miscellaneous Papers*

En síntesis: las líneas de corriente trazadas con este método mostraban resultados que, para Hertz, fueron prueba de que los rayos y la corriente son dos fenómenos separados. Por ejemplo, en la figura 18 se observa la diferencia de trayectoria entre las líneas de corriente y la trayectoria del rayo, el rayo catódico se desplaza en línea recta en la parte inferior de la caja saliendo del cátodo, mientras que las líneas de corriente salen del cátodo en dirección al ánodo formando líneas curvas; en esta imagen es posible identificar con claridad regiones en el espacio de la caja donde hay corrientes, pero no hay rayo.

La intensidad de la corriente es determinada por la cantidad de líneas presentes en determinada región. Nótese que en cercanías de los electrodos las líneas se concentran indicando que la corriente es más intensa en dichos lugares, y, por lo tanto, va decreciendo a medida que la distancia a los electrodos aumenta, figura 19. Por otra parte, la intensidad y brillantez del rayo es homogénea proyectándose en línea recta al cátodo, por esto Hertz afirmó que existen regiones donde la luz azul es muy clara pero la corriente es muy débil, por lo tanto, concluye que no existe una relación directa entre la intensidad de la corriente y la intensidad del rayo.

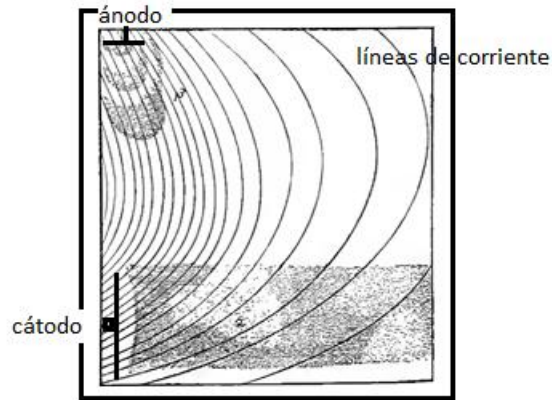


Figura 19. Líneas de corriente de Hertz con electrodos perpendiculares, las líneas trazadas por Hertz indican el camino de la corriente, la cantidad de curvas trazadas indican la intensidad de corriente en la caja, nótese que, en cercanías de los electrodos, cátodo y ánodo, la cantidad de líneas es mucho mayor. Fuente: *Miscellaneous Papers*

Hertz afirmó, también, que existen puntos en la caja en donde el rayo y la descarga tienen direcciones casi perpendiculares. En la figura 20 se ve tal resultado, los rayos se proyectan en la dirección hacia donde apunta el cátodo, mientras que las líneas de corriente se dirigen de cátodo a ánodo, aquí los electrodos están en el mismo lado de la caja, con el cátodo ligeramente inclinado en dirección opuesta al ánodo.

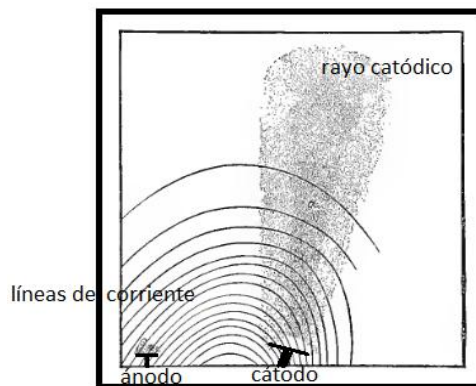


Figura 20. 1 Líneas de corriente de Hertz con electrodos paralelos, los rayos se proyectan frente al cátodo mientras que las líneas de corriente se curvan en dirección al ánodo formando regiones en donde los rayos y la corriente son casi perpendiculares. Fuente: *Miscellaneous Papers*

Las tres observaciones que se deducen de estos experimentos son: 1) que existen regiones donde la dirección de las líneas de corriente son casi perpendicular a la dirección del rayo catódico, 2) que no existe una relación directa entre la intensidad de la corriente y la intensidad del rayo, y 3) que existen zonas en donde hay líneas de corriente, pero no hay presencia del rayo catódico, estas tres observaciones a juicio de Hertz, son prueba suficiente para afirmar que el rayo y la descarga son dos fenómenos independientes, distinguibles y separables.

Con estos resultados es posible dar respuesta a las dos preguntas que Hertz se hizo referente a la similitud de las trayectorias del rayo catódico y la corriente (descarga), y sobre la verdadera trayectoria de la corriente, las configuraciones de los tubos permitieron “separar” los caminos de la descarga del rayo catódico y verificar la no existencia de propiedades electromagnéticas del rayo, además, este resultado permitió estudiar por separado el comportamiento de la corriente y trazar sus trayectorias y constatar que pueden existir lugares donde la trayectoria de corriente y del haz catódico son perpendiculares.

En relación con los resultados de estos últimos experimentos hoy días nos tendríamos que preguntar: ¿cómo es posible explicar el hecho bien conocido de que los rayos son desviados con un imán?, pues al tener el rayo una trayectoria distinta a la corriente y mostrarse que los rayos no producen ningún efecto electromagnético en sus alrededores, no existe argumento que explique la desviación del haz por la presencia de un imán.

Hertz explica que las desviaciones del haz son un efecto secundario de la magnetización del medio por donde viaja, entonces, el imán no está generando un efecto directo sobre el haz mismo sino al medio circundante, y lo asocia a un efecto similar al que se experimenta cuando se cambia el plano de polarización de la luz al cruzar por un material diamagnético²¹

Por otro lado Hertz intenta explicar la naturaleza de la luz en los tubos y recurre al argumento esgrimido por Wiedemann y Goldstein en donde se afirma que la descarga consiste en una alteración del éter, por sí misma invisible, y solo se convierte en luz al impartir su energía a las partículas de gas, en opinión de Hertz esta afirmación es bastante razonable pero sugiere la corrección de la palabra descarga por rayos catódicos, porque para Hertz las dos cosas, rayo y descarga, son muy distintas aunque para Wiedemann y Goldstein no lo sean.

2.2.3 La naturaleza del rayo catódico.

En este experimento Hertz busca dar argumentos sobre la invisibilidad de los rayos en sí mismos y que solo producen luz por su absorción en el gas que aún está presente dentro del tubo, reutiliza el montaje de la sección 2.2.1, sin el recubrimiento de aluminio, al cual le agrega una gota de Mercurio en el extremo del tubo más lejano del cátodo, figura 21, al calentar esa parte del tubo el Mercurio se evapora y así aumenta la densidad del gas dentro del tubo, este hecho produce una luz carmesí que muestra el espectro de Mercurio, además, la luz verdosa producida en las paredes del tubo desaparece cuando el haz atraviesa la nube de Mercurio.

²¹ En 1845 Michael Faraday descubre que cuando un rayo de luz polarizada atraviesa un medio diamagnético transparente en presencia de campos magnéticos, la luz experimenta un cambio en la dirección de polarización. Este famoso experimento probó la relación entre la luz y los fenómenos electromagnéticos e inspiró los trabajos posteriores de Maxwell que Hertz conocía plenamente.

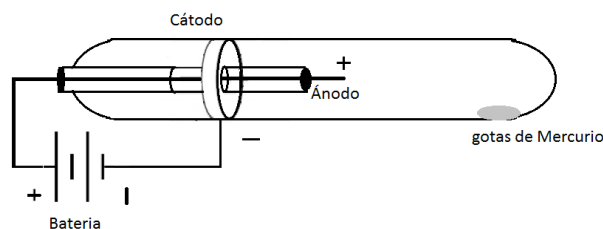


Figura 21. Tubo catódico con perforación en el cátodo, el tubo catódico está sin recubrimiento de aluminio y se le agregan gotas de Mercurio en su interior, el tubo es calentado para que el gas se evapore y se distribuya de tal forma que pueda interferir en la trayectoria del rayo catódico. Fuente propia basada en las descripciones de Hertz.

Con un imán se desvían los rayos de tal forma que se pueda restablecer la luz verdosa al hacerlos chocar contra las paredes de vidrio evitando cruzar la nube de Mercurio, calentando más el tubo se extiende el metal pesado por todo el interior limitando la luminiscencia a la cercanía del cátodo, para Hertz esto explica que los rayos excitan la luminiscencia al entrar en un medio denso y posteriormente son absorbidos por él, de esta manera se convence que la luminiscencia del haz es un efecto asociado al medio circundante y la alteración del éter, y no a la descarga.

Con estos tres experimentos que analizan los efectos electromagnéticos de los rayos catódicos y sus trayectorias, Hertz responde a sus dos inquietudes relacionadas con la trayectoria que sigue la descarga y los rayos, logra mostrar que los rayos y la descarga pueden tomar caminos diferentes, que son efectos separables y distinguibles, además logró trazar dichas trayectorias, esto confirma las ideas de Hertz sobre la naturaleza ondulatoria de los rayos catódicos.

2.3. Los efectos electrostáticos en los rayos catódicos

Hasta el momento Hertz, ya está convencido que los rayos catódicos son sólo un fenómeno que acompaña la descarga y que no ejercen efectos electromagnéticos, además la descarga puede trazar caminos distintos a la del rayo, solamente queda por analizar las propiedades electrostáticas; este análisis es decisivo para determinar la naturaleza de los rayos porque de confirmarse algún tipo de interacción ésta indicaría que los rayos portan algún tipo de carga.

Hertz sigue la misma metodología que utilizó cuando estudió con los efectos electromagnéticos, así se cuestionó primero sobre los efectos electrostáticos que producen los rayos, y luego, sobre la afectación que sufren los rayos por campos eléctricos.

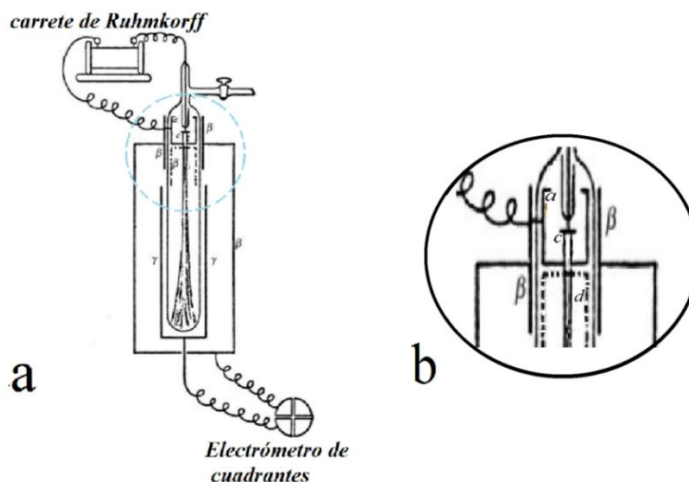


Figura 22 Dispositivo utilizado por Hertz para estudiar los efectos electrostáticos de los rayos catódicos. **Izquierda**, vista general del aparato. **Derecha**, detalle de la conexión del cátodo c , y ánodo a , y malla metálica d , que permite obtener los rayos catódicos puros. Fuente: adaptación de imagen original de *Miscellaneous Papers*

2.3.1 Los efectos electrostáticos producidos por los rayos

Al igual que en los experimentos de la sección anterior Hertz se formula dos preguntas: ¿los rayos catódicos dan lugar a fuerzas electrostáticas en su vecindario? y ¿se ven afectados por fuerzas electrostáticas externas?

Para dar respuesta a estas inquietudes Hertz construye un tubo de descarga de 25 mm de ancho por 250 mm de largo, el cátodo c está rodeado por un cilindro de latón a , que actúa como ánodo y que tiene una perforación de 10 mm de diámetro frente al cátodo, que permite el paso de los rayos catódicos figura 22, para garantizar la “pureza” del rayo hay una malla metálica d , con aberturas de 1 mm^2 por donde cruzarán los rayos catódicos, a partir de ese punto los rayos, según Hertz, son puros es decir, no van acompañados de ningún tipo de descarga. Nótese que el tubo además está recubierto casi en su totalidad por una capa metálica β , esta capa lo protege de cualquier efecto electrostático externo inclusive del mismo cátodo, la capa metálica β , la malla d , y el ánodo a , están en contacto entre sí y conectados a tierra.

Como instrumento de medida se utiliza una carcasa metálica γ , que encierra gran parte del tubo donde se supone que los rayos catódicos estarán contenidos, la carcasa se conecta a dos extremos de un electrómetro de cuadrantes²²; se entiende que Hertz busca generar

²² El electrómetro de cuadrantes es un instrumento que consta de una pieza metálica en forma de ocho suspendida entre cuatro láminas llamadas cuadrantes que cuelgan de cuatro varillas metálicas, los cuadrantes metálicos a final de cada una de las cuatro varillas verticales se conectan por parejas enfrentadas diagonalmente a cada uno de los dos polos de una pila. Cuando el objeto suspendido está cargado, tenderá a girar en un sentido u otro en función del signo de la carga a medir. Cuanto mayor sea ésta, mayor será el par de fuerzas, causando una mayor torsión en el hilo. Una escala mide el ángulo que gira el objeto suspendido, a partir del cual se medirá la carga problema. Adaptado de: <https://institutosanisidoro.com/fisica-quimica/electrometro-de-cuadrantes.html>

un efecto de inducción porque en caso de que los rayos se encuentren cargados estos inducirían algún efecto de carga sobre la carcasa γ , que sería detectada por el electrómetro.

Antes de realizar el experimento Hertz probó su montaje reemplazando el tubo de descarga por una varilla metálica que se conectó al carrete de Ruhmkorff y que se introdujo al interior de la carcasa γ figura 23, al encender el carrete y electrificar la varilla el electrómetro detectó presencia de carga, que comprobó que ocurría inducción sobre la carcasa.

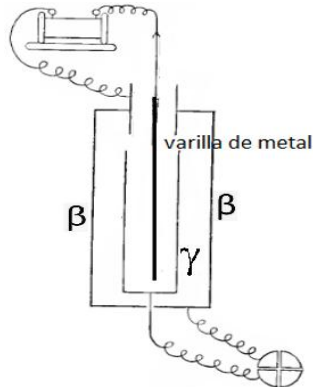


Figura 23. Prueba del montaje para determinar las propiedades electrostáticas de los rayos, Hertz introduce una varilla electrificada que ocupa el mismo espacio que la trayectoria de los rayos, esto provoca la reacción del electrómetro. Fuente adaptación de Miscellaneous Papers

Cuando el tubo se conectó al carrete de inducción generó una descarga de tono azulado que golpeó el extremo opuesto al cátodo del tubo produciendo la coloración verdosa sobre la pared de vidrio, además se pudo ver la sombra generada por la malla d y que era propicia para observar cualquier desviación del haz. Sin embargo, el electrómetro no reaccionó indicando que los rayos catódicos no producen algún efecto electrostático en sus alrededores, por lo menos en valores detectables por el instrumento.

2.3.2 Los efectos electrostáticos que experimentan los rayos.

Para responder su segunda pregunta sobre si los rayos son influenciados por campos electrostáticos, Hertz utiliza un tubo de vidrio de 26 cm de largo con un cátodo circular de aluminio de 5mm, que de igual forma que el montaje anterior, está casi completamente rodeado por el ánodo, con una pequeña abertura que permite el paso de los rayos y los dirige a la maya de alambre que los “filtra” al atravesarla, la figura 24 muestra un esquema de la configuración, a mitad del tubo hay un alambre fino que al ser alcanzado por el rayo proyecta una sombra al otro extremo del tubo y que servirá para detectar cualquier cambio en la dirección del rayo.

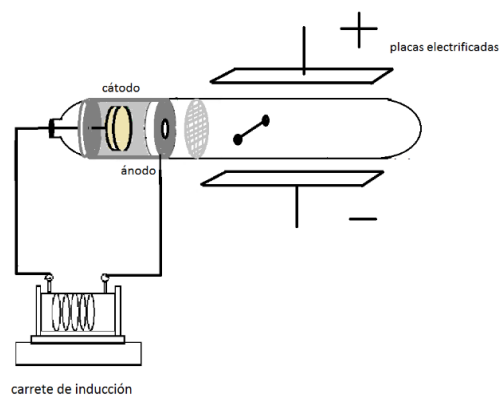


Figura 24. Montaje para determinar efectos electrostáticos en los rayos, el tubo tiene la misma configuración que el montaje anterior, en donde el cátodo está envuelto por el ánodo, los rayos luego pasan por una malla conectada a tierra que los filtra, esta configuración permite que un rayo catódico “puro” atraviese el tubo que se encuentra entre dos placas fuertemente cargadas eléctricamente. Fuente propia

Los rayos al cruzar por la región entre placas electrificadas no experimentaron ninguna desviación ni cambio notorio en su trayectoria, esto podría tomarse como una prueba de que los rayos no son afectados por presencia de campos eléctricos. Sin embargo, Hertz sospecha que es posible que el campo electrostático de las placas esté siendo neutralizado por los componentes existentes entre las mismas, (cristal o el aire circundante), por ello decide ubicar dos placas pequeñas de metal separadas 2 cm al interior del tubo y conectadas a unas celdas Daniell, los rayos viajan 12 cm entre estas placas.

A pesar de estos cambios los rayos no mostraron ninguna desviación, ni siquiera con el incremento del campo eléctrico producido al aumentar el número de celdas Daniell. Lo que si ocurrió fue que los rayos provocaron que apareciera una descarga de arco entre las placas que descargaron la batería; para evitar dicha descarga y el agotamiento de las baterías introdujo resistencias líquidas en el circuito de las placas, aun así, bajo ningún caso se experimentó desviación de la trayectoria del rayo. Para Hertz este resultado es prueba suficiente para afirmar que los rayos no experimentan fuerzas electrostáticas y que por lo tanto no poseen carga eléctrica.

Según los resultados de los experimentos de esta sección las respuestas a sus dos preguntas respecto a que, si los rayos catódicos dan lugar a fuerzas electrostáticas en su vecindario, y si se ven afectados por fuerzas electrostáticas externas, tienen respuesta negativa, Hertz no encontró en los resultados experimentales evidencias contundentes para confirmar propiedades electrostáticas de los rayos, esto sumado a los resultados negativos sobre las propiedades electromagnéticas dio pie para que concluyera que era necesario replantear la idea de que los rayos son un fenómeno eléctrico y afirma que simplemente los rayos catódicos son la consecuencia de la descarga, así como la luz es consecuencia del paso de la corriente en una lámpara incandescente.

2.4 Conclusiones respecto al trabajo experimental de Hertz

En su trabajo sobre rayos catódicos Hertz hace tres grandes conclusiones:

1. Que hasta que se presenten pruebas más fuertes de lo contrario, podemos considerar que la descarga de la batería es continua y, por lo tanto, la descarga incandescente no necesariamente es disruptiva.
2. Que los rayos catódicos son solo un fenómeno que acompaña la descarga y no tienen nada que ver directamente con el camino de la corriente.
3. Que las propiedades electrostáticas y electromagnéticas de los rayos catódicos son nulas o muy débiles.

Hertz no solo hizo estas conclusiones también dio sus concepciones de cómo es la naturaleza de la descarga luminosa:

La luminiscencia del gas en la descarga luminosa no es una fosforescencia bajo la acción directa de la corriente, sino una fosforescencia bajo la influencia de los rayos catódicos producidos por la corriente. Estos rayos catódicos son eléctricamente indiferentes y, entre los agentes conocidos, el fenómeno que más se les alía es la luz. La rotación del plano de polarización de la luz es el análogo más cercano a la curvatura de los rayos catódicos por un imán.

Si esta concepción es correcta, los fenómenos nos obligan a suponer que existen diferentes tipos de rayos catódicos cuyas propiedades se fusionan entre sí y corresponden a los colores de la luz. Se diferencian entre sí con respecto a la fosforescencia excitante, a ser absorbidos y a ser desviados por un imán.

3. Los experimentos de JJ Thomson

En la historia Joseph John Thomson es reconocido como el “descubridor” del electrón, su fama no es infundada pues sus experimentos con tubos de descarga ayudaron a trazar el camino que permitió dar pasos firmes hacia una teoría que explicara la existencia de carga en la materia, sin embargo, Thomson no fue el primero en deducir que los rayos catódicos estaban formados por algo cargado negativamente, ni fue el primero en intentar calcular una masa para ese algo, ni tampoco inventó la palabra “electrón”; esta había sido acuñada por el irlandés George Johnstone Stoney (1826-1911) en 1891, Thomson, intentaba entender la naturaleza de los rayos catódicos y sus propiedades, para Thomson la descarga catódica era la continuación de los estudios hechos sobre la conductividad eléctrica en los líquidos trasladado a los gases. (Falconer, corpuscles to electrons, histories of the electrón, 2001, pág. 85).

Uno de sus resultados más conocidos fue la relación matemática masa a carga, que comprueba la existencia de partículas cargadas en los rayos catódicos, su logro más que un ejemplo de buena experimentación y desarrollo matemático fue un triunfo de ideas acumuladas y experimentos preconcebidos en el tiempo que rara vez son conocidos o estudiados y que pueden mostrar la forma en que se concibe la ciencia, volveremos a este punto más adelante.

JJ Thomson nació en Manchester, de padres medianamente acomodados recibe educación en el Owen College, su padre quería que fuera ingeniero, no obstante, Thomson se dedica a la ciencia influenciado por sus mentores John Henry Poynting (1852-1914) y sir Arthur Schuster (1851-1934), este último un gran experimentador que había hecho importantes progresos en el estudio de la ionización y descarga de electricidad a través de medios gaseosos (Harré, 1986).

En 1876 ingresa becado al Trinity College en donde estudia matemáticas destacándose como estudiante, por su dedicación y trabajo fue puesto a cargo del instituto Cavendish, nombramiento que fue sorpresivo pues no contaba con la experiencia suficiente y su desempeño como experimentalista no era el mejor, sin embargo, su disciplina le permitió organizar el Instituto y ponerlo en la vanguardia de la experimentación en Europa. (Weinberg, 1985)

Thomson inició sus investigaciones en medio de la discusión sobre la naturaleza de los rayos catódicos, para ese tiempo las dos posturas más sobresalientes era la propuesta de

la mayoría de los científicos alemanes referente a que los rayos son algún tipo de manifestación en el éter, y la otra propuesta en donde los rayos deben trazar la trayectoria de algún tipo de manifestación material o partícula cargada (Thomson J. J., 1897)

Thomson está a favor de una teoría de partículas cargadas pues afirma tener ventajas sobre una teoría del éter, con las partículas cargadas es posible determinar su comportamiento, trayectoria y características mientras que en una teoría del éter aún no hay ninguna explicación clara.

Sus experimentos sobre rayos catódicos fueron publicados en *Philosophical Magazine*²³ Series 5, volumen 44 del año 1897, en el artículo titulado *Cathode rays* y están divididos en 4 etapas, la primera busca corroborar la existencia de carga en los rayos, la segunda determinar y verificar la desviación de los rayos en presencia de fuerzas eléctricas, la tercera buscó mostrar los efectos de los rayos en el gas circundante y la relación entre los campos magnéticos con el entorno gaseosos, y la cuarta en donde determina por dos métodos distintos la relación m/e .

3.1 La carga de los rayos catódicos

Thomson inició sus experimentos recordando los montajes hechos por Jean Perrin (1870-1942), en ellos un tubo de descarga tiene dos cilindros metálicos concéntricos b, y a, este último actúa como ánodo figura 25, los cilindros tienen una abertura enfrentada al cátodo c, por los cuales ingresa el rayo catódico, el cilindro b actúa como detector de carga al conectarse a un electroscopio de láminas de oro.

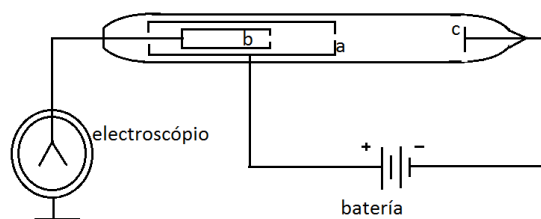
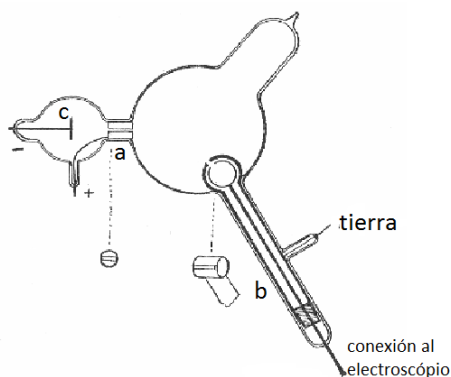


Figura 25. Experimento hecho por Perrin, en el tubo de descarga hay dos cilindros concéntricos de metal a y b, el cátodo c, está enfrente de las aberturas de los cilindros de tal manera que el rayo proveniente de c ingrese a los dos cilindros e indique en el electroscopio la presencia de carga. Fuente: adaptación de *The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments*, James Mattingly, Stud. Hist. Phil. Mod. Phys., Vol. 32, No. 1, pp. 53 75, 2001

²³ *Philosophical Magazine* es una de las más antiguas revistas científicas publicadas en inglés. Iniciado en 1798 por Alexander Tilloch, en 1822 Richard Taylor se convirtió en redactor común y se ha publicado continuamente por Taylor & Francis desde entonces, era la revista de elección para intelectuales como Faraday, Joule, Maxwell, J.J. Thomson, Rutherford y John Strutt, tercer barón Rayleigh. En efecto, el desarrollo de la ciencia desde hace más de 200 años se puede rastrear exhaustivamente en sus páginas.

Cuando se enciende la máquina el rayo proveniente del cátodo ingresa a los dos cilindros causando separación de las láminas de oro, si el rayo se desvía mediante un imán y ya no ingresa a los cilindros el electroscopio no presenta separación de las láminas, para Thomson estos resultados pueden ser prueba de que hay algo cargado que sale del cátodo, viaja en línea recta y que es desviado por un imán pero deja la duda en cuanto a que sean los rayos los que producen tal efecto, recordemos que para los partidarios de que los rayos son manifestaciones del éter existe la presencia de partículas cargadas pero ellas son independientes del fenómeno lumínico.

Para no dejar dudas al respecto Thomson decide modificar el experimento de Perrin, construye un tubo de descarga configurado por dos bulbos, uno de ellos tiene en su interior el cátodo *c* y el ánodo *a*, figura 26, el ánodo está conformado por un cilindro que se ajusta al cuello del bulbo y que tiene una abertura que permite el paso de los rayos al siguiente bulbo más grande, el cual tiene un cuello delgado *b* en la parte inferior, en el cabezal de dicho cuello están ubicados dos cilindros metálicos concéntricos cuyas conexiones están al interior del cuello y van dirigidas una hacia tierra (cilindro exterior) y la otra al electroscopio (cilindro interior).



*Figura 26. Primer experimento de Thomson. 3 Hecho para determinar la presencia de carga en los rayos catódicos, el cátodo *c* está en un bulbo pequeño junto al ánodo *a*, los rayos viajan hacia el bulbo más grande y pueden ser desviados por un imán hacia el cuello *b*, en donde están dos cilindros concéntricos metálicos, el cilindro interior está conectado a un electrómetro. Fuente Philosophical Magazine, Series 5, volumen 44*

El montaje en principio tiene el mismo mecanismo de detección del experimento de Perrin, dos cilindros concéntricos metálicos y un electroscopio conectado al cilindro interno, la diferencia radica en que para que el rayo ingrese al interior de los cilindros necesita ser desviado por un imán.

Cuando Thomson conectó su tubo de descarga a una bobina de inducción, el rayo se ve viajar claramente al interior de los bulbos sin impactar ni ingresar directamente en los cilindros, de esta forma el electrómetro no marca presencia de carga porque sus hojas no presentan separación alguna, al acercar un imán al rayo, de tal manera que el haz sea desviado hacia los cilindros, el electrómetro muestra una notoria desviación.

Este resultado muestra dos cosas: primero, que los rayos pueden ser desviados por un imán y segundo, que la carga sigue indudablemente la trayectoria de los rayos, dos resultados que cuestionan los experimentos de Hertz, y que dan argumentos fuertes en favor de la existencia de cargas en los rayos; esta es una característica de los experimentos de Thomson exponer con un solo experimento varios argumentos a favor de la naturaleza corpuscular y cargada de los rayos catódicos.

En este primer experimento Thomson cuestiona directamente el trabajo de Hertz, recordemos que Hertz logra trazar con su caja de descarga las líneas de corriente que expone la diferencia entre la trayectoria de la descarga y el camino que sigue el rayo catódico.

Aquí Thomson muestra que no hay separación entre rayo y descarga y rompe con los argumentos de que el rayo es una manifestación etérea mostrando que está constituido de algún ente material cargado ya que el rayo desvía su trayectoria en presencia de campo magnético y es capaz de inducir carga sobre los objetos en los que incide.

El paso por seguir de Thomson consistió en mostrar las propiedades electrostáticas de los rayos ya que si están compuestos por cargas deben experimentar algún tipo de efecto en presencia de campo eléctrico.

3.2 Los efectos electrostáticos de los rayos catódicos.

Para determinar algún efecto electrostático de los rayos Thomson utilizó un tubo de descarga que tiene un cuello en donde hay dos cilindros metálicos agujereados A y B que coliman el haz, uno de ellos A, actúa como ánodo y el otro B, está conectado a tierra figura 27, más adelante en el tubo hay dos placas de aluminio D y E, de 5cm de largo por 2cm de ancho separados a una distancia de 1,5cm y por donde se espera que pasen los rayos, en el extremo opuesto al cátodo hay una escala adherida a la pared del tubo que sirve para medir la desviación del haz.

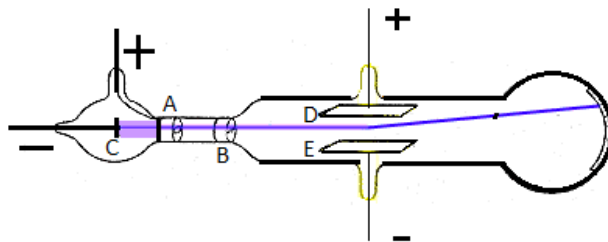


Figura 27. Segundo montaje de Thomson, hecho para determinar las propiedades electrostáticas de los rayos, los rayos provenientes del cátodo C, son colimados por el ánodo A y el cilindro B, y se dirigen hacia las placas D y E cargadas eléctricamente y que producen un campo eléctrico que se espera desvíe los rayos. Fuente: adaptación de Fuente Philosophical Magazine, Series 5, volumen 44

Las placas son cargadas eléctricamente mediante conexión a celdas voltaicas; en un principio no hubo deflexión del rayo corroborando así los experimentos de Hertz, sin embargo, Thomson hizo notar que para que la deflexión sea posible es necesario dos condiciones: una, utilizar celdas para electrificar las placas algo desgastadas porque esto retrasa que el gas al volverse conductivo por los rayos catódicos neutralice el campo generado por las placas y dos, que el vacío aplicado al tubo sea mejorado, estas dos condiciones permiten pensar que el medio por donde pasa el rayo juega un papel importante en los experimentos; más adelante se analiza este aspecto.

Los rayos se desvían hacia arriba cuando la placa superior se conecta al polo positivo y se desvían hacia abajo cuando la placa superior está conectada al polo negativo, asimismo, se encontró que la desviación es proporcional a la diferencia de potencial entre las placas, este resultado muestra que los rayos son portadores de carga y que dicha carga es negativa, además, Thomson afirmó que solamente cuando había vacío suficiente se presentaba una buena desviación,²⁴ la desviación del rayo se produce una vez se conectan las placas, pero desaparece poco a poco mostrando que la conductividad del medio (gas aun presente en el tubo) influye en el comportamiento del rayo no de manera directa sino por la anulación de la fuerza eléctrica entre las placas por la acumulación de los iones del gas en ellas, es decir, los iones positivos del gas, son atraídos a la placa negativa y los iones negativos a la placa positiva dando como resultado la cancelación de la fuerza eléctrica entre las placas, desapareciendo cualquier efecto electrostático sobre los rayos.

Otro efecto que mencionó Thomson, y que consideró prueba para mostrar que no hay desviación de los rayos cuando hay una alteración en la polaridad de las placas, consistió en aplicar una diferencia de potencial de 200V entre ellas en presencia de vacío. Con estas condiciones, aparece una descarga o chispa entre las placas que anula momentáneamente la desviación de los rayos, ya que la descarga cancela el campo eléctrico entre ellas liberando al rayo catódico de fuerzas eléctricas.

Por ahora Thomson no menciona datos de desviación de los rayos, más bien se enfocó en analizar la conductividad del gas por donde cruzan los rayos catódicos. La conductividad del gas es un fenómeno importante pues es una confirmación de que el rayo esta provisto de algún tipo de carga que está interactuando con el medio por donde cruza, además sirve como argumento para explicar los resultados de Hertz que mostraron que los rayos no producen efectos electrostáticos, porque no lograron inducir carga en el detector y no son desviados por la presencia de campos eléctricos.

²⁴ Thomson no aclara el valor del vacío utilizado, suficiente vacío podría llamarse al nivel de vacío que permite una clara formación de los rayos y una apreciable desviación por presencia de fuerza eléctrica.

3.3 La ionización de los gases por los rayos catódicos

Sin cambiar de tubo, Thomson buscó evidenciar las propiedades conductoras del gas producidas por la luz catódica, para ello conectó la placa D a una batería, la placa E a un condensador de un microfaradio y un electrómetro de cuadrantes figura 28, si el gas al interior del tubo es conductor el electrómetro indica una deflexión.

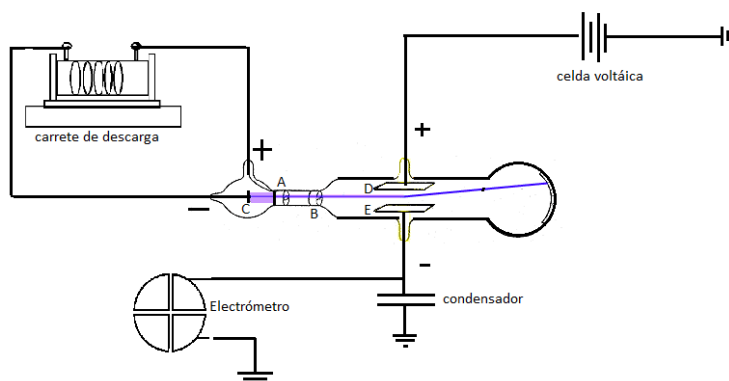
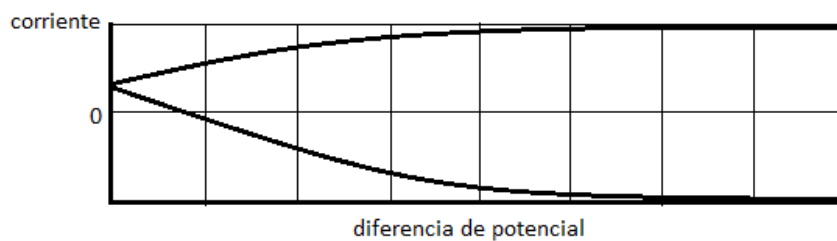


Figura 28 Montaje para determinar la conductividad del gas en el tubo por presencia de rayos catódicos, la placa D es conectada a una celda voltaica y la placa E se conecta a un electrómetro de cuadrantes y un condensador; el electrómetro indica si el gas al interior del tubo se ioniza volviéndose conductor. Fuente: adaptación Philosophical Magazine, Series 5, volumen 44

Cuando los rayos viajan en el tubo el electrómetro indica la presencia de carga en la placa E, esta carga se produce por dos fenómenos: uno gracias a la acumulación de cargas debida a la conductividad del gas y el otro a que parte de los rayos alcanzan a golpear la placa suministrándole carga, la respuesta del electrómetro indica que la conductividad del gas está relacionada con la presión del mismo, Thomson decidió variar la presión apenas suficiente para que apareciera la mancha fluorescente en el tubo y así verificar la relación entre conductividad y presión en el tubo, la gráfica 1 muestra el resultado de este experimento, aquí se observa la relación entre la corriente y la diferencia de potencial entre las placas, a medida que el voltaje entre las placas se incrementa (eje x) la corriente medida también se incrementa (eje y) hasta un punto donde se estabiliza y no aumenta más.



Gráfica 1: comportamiento de la corriente en función de la diferencia de potencial entre las placas, el incremento de la corriente se estabiliza rápidamente. La línea superior indica cuando la placa superior

D está conectada al polo positivo de la batería, y la curva inferior cuando la placa está conectada al polo negativo.

También hay que notar que la curva no inicia en cero, esto se debe a que la placa inferior E, alcanza a ser impactada por los rayos catódicos cargándola levemente, el comportamiento asintótico de la curva también es un resultado común de conducción en los gases cuando son atravesados por los rayos Röntgen²⁵, la luz ultravioleta y la radiación de uranio (Thomson J. J., 1897), dando pie para pensar que hay una relación entre estos fenómenos.

Al disminuir la presión al interior del tubo (de tal manera que se obtiene una imagen clara del rayo) también hay una disminución de la corriente, aun cuando la diferencia de potencial entre las placas llegó a ser igual a 400V, por encima de ese valor aparecen arcos de descargas que dejan marcas en las placas y liberan gas que cambia la presión dentro del tubo.

A muy bajas presiones todos los efectos concuerdan con la idea de que son producto de comportamiento de partículas cargadas que viajan a lo largo de los rayos y que dotan de conductividad al medio. (Thomson J. J., 1897)

3.4 Comportamiento de los rayos bajo efectos magnéticos en diferentes gases

El comportamiento de los rayos catódicos en presencia de campos magnéticos fue estudiado con un tubo en forma de campana. Esta campana tiene unida a una de sus paredes un pequeño bulbo, en la unión está ubicado el ánodo A conectado a tierra, y en el bulbo se ubica el cátodo C, figura 29, este dispositivo fue puesto en medio de dos bobinas paralelas similares a la configuración del galvanómetro de Helmholtz²⁶, la campana tiene en su interior una lámina de vidrio graduada que permitirá medir la desviación de la trayectoria de los rayos.

Cuando los rayos entran en la campana se ven afectados por el campo magnético de las bobinas curvándose y separándose en un abanico que deja ver ciertas líneas brillantes, además, los brillos fosforescentes de las paredes de la campana por el contacto con los rayos también se distribuyen en esas franjas.

²⁵ Así se les llamó en un principio a los rayos X

²⁶ El galvanómetro de Helmholtz es un dispositivo compuesto por dos bobinas de igual tamaño separadas una distancia igual a sus radios, con esta configuración es posible tener un campo magnético fácil de calcular y homogéneo entre las bobinas, el instrumento se completa suspendiendo un alambre y un espejo entre las bobinas, cuando circula una corriente por el alambre aparece una fuerza que mueve el alambre, este movimiento es detectado por el cambio en la posición del espejo, de esta manera una corriente es detectada por este instrumento.

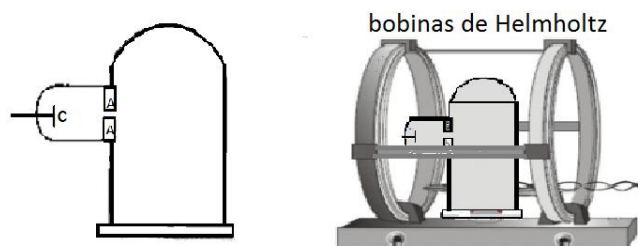


Figura 29. Campanas al vacío con campo magnético, Izquierda: campana con cátodo C y ánodo A, para determinar el comportamiento de los rayos en presencia de campos magnéticos, dichos campos son generados por las bobinas de Helmholtz en la cual se introduce la campana (derecha). Fuente propia

Es interesante notar que Thomson no se halla preguntado el ¿por qué? de esa separación en franjas, la separación del haz puede dar indicios de la estructura oculta de rayo catódico, sin embargo, solo describe el hecho para aclarar que las medidas de desviación del rayo son tomadas a partir de las líneas más brillantes, en algunas ocasiones los experimentos revelan efectos no esperados que muchas veces pasan inadvertidos o no son tenidos en cuenta, todo depende, entre otras cosas, de la intencionalidad del experimento y la visión del científico.

Lo que realmente llamó la atención de Thomson fue que los efectos del campo generado por las bobinas en los rayos eran los mismos, aunque se cambiara el gas al interior de la campana, siempre y cuando la diferencia de potencial entre los electrodos fuera la misma²⁷. Esto desligaba la naturaleza del rayo de la naturaleza del gas circundante, el cambio en la trayectoria del rayo por campos magnéticos no parece alterarse por la presencia de diferentes gases, lo que sea que fuere el rayo es independiente del gas circundante.

Los resultados del comportamiento de los rayos en presencia de campos eléctricos y magnéticos hacen suponer que los rayos estaban conformados por algún tipo de carga negativa que yacía sobre un ente material o partícula. (Thomson J. J., 1897). La pregunta que surgió para Thomson fue ¿qué tipo de partículas son estas? ¿Acaso son átomos, moléculas o algo más pequeño?

Para acercarse a una respuesta que le permita determinar un valor estimado del tamaño de dichos corpúsculos,²⁸ él hace una serie de medidas de la relación entre carga asociada a los rayos y la cantidad de materia que la sostiene, aplicando dos métodos

²⁷ Para cumplir con la condición de la igualdad en el potencial de los electrodos con diferentes gases es necesario variar la presión al interior de la campana.

²⁸ Corpúsculos, Thomson los llamó así, más adelante se determinaría que dichos corpúsculos se les llamaría electrones, sin embargo, no hay evidencia de que para Thomson los corpúsculos fueran los mismos electrones.

independientes: uno utilizando solo campos magnéticos y el otro combinando campos eléctricos y magnéticos para desviar el haz.

3.5 La relación m/e

Tal vez uno de los resultados más reconocido en los experimentos de Thomson es el valor numérico de la relación m/e , también es considerado en los libros de texto como el dato clave que prueba la existencia de los electrones, sin embargo, es muy poco difundido una de las dos formas en que llegó a él y que muestra el grado de conocimiento técnico y visión que tenía Thomson de los tubos de descarga.

3.5.1 Determinación del tamaño de los corpúsculos mediante la medida de la carga y la energía calórica de los rayos.

En este apartado, y el siguiente, se hace una descripción de los procedimientos que hizo Thomson agregando desarrollos matemáticos, y cinemáticos, en notación contemporánea con el fin de presentar con claridad y hacer un mejor seguimiento para la comprensión del lector. Las ecuaciones numeradas son las que aparecen originalmente en el artículo.

Con la certeza de que se puede determinar la cantidad de electricidad Q transportada por estas partículas, Thomson supone un haz catódico homogéneo y establece la siguiente relación:

$$Ne = Q \quad (1)$$

donde N es el número de partículas que atraviesa una sección transversal del haz en un determinado tiempo y e , es la carga de cada una de ellas²⁹. Para medir Q basta con hacer incidir los rayos sobre un cilindro metálico conectado a un electrómetro.

Como estas partículas se mueven con cierta velocidad son poseedoras de energía cinética, Thomson decidió determinar el valor de dicha energía suponiendo que se transforma en calor al incidir el rayo sobre un objeto, entonces, al medir el incremento de la temperatura de un cuerpo de capacidad calorífica conocida es posible determinar la energía de las partículas W y su velocidad v mediante la siguiente relación matemática:

$$\frac{1}{2}Nmv^2 = W \quad (2)$$

donde m es la masa de las partículas.

²⁹ Nótese que e para Thomson significa una cantidad individual de carga, un lector contemporáneo podría pensar que la relación Ne significa número de electrones, sin embargo, Ne representa el número total de carga, se utilizó la letra e por ser la letra inicial de electricidad y no por referirse a electrones, término que no fue utilizado por Thomson.

Las partículas cargadas se ven afectadas por el campo magnético H , describiendo trayectorias curvas generadas por la fuerza de Lorentz³⁰: $F = evH$, asumiendo una trayectoria circular se puede definir la fuerza central como: $F = \frac{mv^2}{r}$, con r como el radio, igualando estas dos ecuaciones llegamos a:

$$\frac{mv}{e} = Hr = I \quad (3)$$

De las tres ecuaciones anteriores podemos determinar v , y $\frac{m}{e}$ como sigue a continuación:

La ecuación (2) se divide por la ecuación (1): $\frac{1Nmv^2}{2Ne} = \frac{W}{Q}$, $\frac{1}{2} \frac{m}{e} v^2 = \frac{W}{Q}$ que se puede reescribir: $\frac{1}{2} \frac{mv}{e} v = \frac{W}{Q}$, y comparando con (3) se tiene: $\frac{1}{2} Iv = \frac{W}{Q}$, y despejar v :

$$v = \frac{2W}{IQ} \quad (4)$$

De la ecuación (3) se tiene: $\frac{m}{e} = \frac{I}{v}$ y reemplazando v de la ecuación (4) se tiene:

$$\frac{m}{e} = \frac{I^2 Q}{2W} \quad (5)$$

entonces encontrando Q , W , e $I = Hr$ se puede determinar v y $\frac{m}{e}$.

Para determinar estas cantidades Thomson usó tres diferentes tubos, el primero de ellos construido para determinar Q y W , este tubo tiene en su interior dos cilindros metálicos concéntricos D y E , figura 30, el cilindro D está conectado a tierra y E está conectado a un electrómetro, los cilindros tienen pequeñas aberturas frente al cátodo C para que ingresen los rayos, esta parte del montaje es idéntica al montaje de Perrin con el que mostró que los rayos son portadores de carga.

³⁰ La fuerza de Lorentz en su expresión moderna viene determinada por $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, para este caso de estudio no tenemos campo eléctrico E , y el campo magnético B es reemplazado por H la excitación magnética, que era como se conocía por aquella época al campo magnético, q es la carga que se representa por e y v la velocidad de las cargas. El carácter vectorial de la ecuación se puede omitir y utilizar solo magnitudes escalares debido a la configuración espacial del montaje de Thomson porque la dirección del campo H y la v del rayo permanecerán perpendiculares.

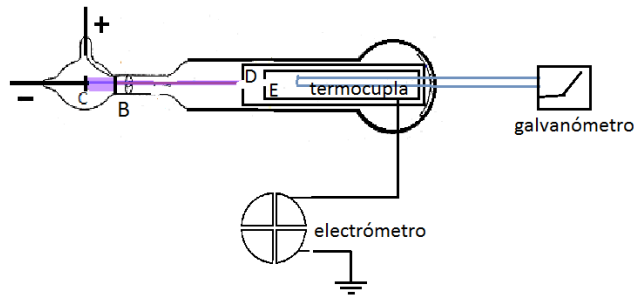


Figura 30. Tubo para hallar la relación m/e con termocupla. Para determinar la carga eléctrica Q a través del electrómetro y la energía de las partículas W con la termocupla conectada al galvanómetro. Fuente: adaptación de cathode rays JJ Thomson

Al interior del tubo E se encuentra una termocupla conformada por la juntura de dos tiras de metal, hierro y cobre, muy finos que al ser impactadas por el rayo se calientan produciendo una pequeña diferencia de potencial proporcional a la temperatura y que es detectable en el galvanómetro, de esta manera y conociendo la capacidad térmica de la juntura es posible determinar W .

Para determinar I es necesario encontrar r el radio de curvatura de la trayectoria del rayo catódico, para ello se utilizó el montaje de la figura 31, en él un tubo es ubicado en medio de dos bobinas de Helmholtz cuyo campo H es fácil de determinar conociendo la corriente que circula por ellas.

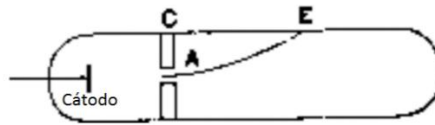


Figura 31. Deflexión del haz debido al campo magnético. Un tubo está ubicado entre las bobinas de Helmholtz encargadas de producir un campo H uniforme, conociendo la distancia AC y la distancia CE es posible determinar el radio de curvatura del rayo. Fuente adaptación de cathode ray de JJ Thomson

Los rayos al interior del tubo tienden a formar una trayectoria circular por la presencia del campo magnético golpeando la pared del tubo en el punto E, conociendo la distancia CA y la distancia CE es posible determinar el radio de curvatura por medio de la relación:

$2r = \frac{CE^2}{AC} + AC$, los resultados de estos experimentos se consignaron en la tabla 1, el experimento se repite en presencia de diferentes gases en los tubos dando resultados en el mismo orden de magnitud confirmando que las propiedades del rayo son independientes del gas circundante.

Gas.	Value of W/Q.	I.	m/e.	v.
Tube 1.				
Air	4.6×10^{11}	230	$.57 \times 10^{-7}$	4×10^9
Air	1.8×10^{12}	350	$.34 \times 10^{-7}$	1×10^{10}
Air	6.1×10^{11}	230	$.43 \times 10^{-7}$	5.4×10^9
Air	2.5×10^{12}	400	$.32 \times 10^{-7}$	1.2×10^{10}
Air	5.5×10^{11}	230	$.48 \times 10^{-7}$	4.8×10^9
Air	1×10^{12}	285	$.4 \times 10^{-7}$	$.7 \times 10^9$
Air	1×10^{12}	285	$.4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Hydrogen	6×10^{12}	205	$.35 \times 10^{-7}$	6×10^9
Hydrogen	2.1×10^{12}	460	$.5 \times 10^{-7}$	9.2×10^9
Carbonic acid	8.4×10^{11}	260	$.4 \times 10^{-7}$	7.5×10^9
Carbonic acid	1.47×10^{12}	340	$.4 \times 10^{-7}$	8.5×10^9
Carbonic acid	3.0×10^{12}	480	$.39 \times 10^{-7}$	1.3×10^{10}

Tabla 1. Resultados para diferentes gases. Fuente: cathode rays JJ Thomson

Thomson repite el experimento con otro tubo, con la misma disposición de los instrumentos, pero con aberturas de los cilindros D y E más pequeñas, de alrededor de 1,5 mm de diámetro, los resultados no difieren mucho de los primeros, solamente fue necesario utilizar un electrómetro más sensible.

Gas.	Value of W/Q.	I.	m/e.	v.
Tube 2.				
Air	2.8×10^{11}	175	$.53 \times 10^{-7}$	3.3×10^9
Air	4.4×10^{11}	195	$.47 \times 10^{-7}$	4.1×10^9
Air	3.5×10^{11}	181	$.47 \times 10^{-7}$	3.8×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	$.53 \times 10^{-7}$	3.3×10^9
Air	2.5×10^{11}	160	$.51 \times 10^{-7}$	3.1×10^9
Carbonic acid	2×10^{11}	148	$.54 \times 10^{-7}$	2.5×10^9
Air	1.8×10^{11}	151	$.63 \times 10^{-7}$	2.3×10^9
Hydrogen	2.8×10^{11}	175	$.53 \times 10^{-7}$	3.3×10^9
Hydrogen	4.4×10^{11}	201	$.46 \times 10^{-7}$	4.4×10^9
Air	2.5×10^{11}	176	$.61 \times 10^{-7}$	2.8×10^9
Air	4.2×10^{11}	200	$.48 \times 10^{-7}$	4.1×10^9

Tabla 2. Resultados experimentales obtenidos con un segundo tubo, los valores difieren muy poco de un tubo a otro, ambas tablas tienen datos en el mismo orden de magnitud. Fuente: cathode rays JJ Thomson

De los resultados se muestra que los valores de m/e no dependen del gas circundante. Así, para el primer tubo, la media para el aire es 0.40×10^{-7} , para el hidrógeno 0.42×10^{-7} y para el gas de ácido carbónico 0.4×10^{-7} . para el segundo tubo, la media para el aire es 0.52×10^{-7} , para el hidrógeno 0.50×10^{-7} y para el gas de ácido carbónico 0.54×10^{-7} (Thomson J. J., 1897)

Aunque los resultados experimentales apuntaron a la confirmación e identificación de una relación m/e que da indicios claros de que los rayos pueden estar conformados por algún tipo de partículas portadora de carga, Thomson no se conformó con ello y decidió utilizar un segundo método en el cual los efectos eléctricos y magnéticos de los rayos son combinados, a simple vista este método parece sobrar, pero el hecho de que se utilizaran los dos efectos permite confirmar sus resultados anteriores, así no deja duda de que en realidad los rayos son afectados por los campos eléctricos y magnéticos y que dichos efectos son independientes, medibles y aplicables a las partículas que conforman el rayo.

3.5.2 Medida de la relación m/e con campos eléctricos y magnéticos

Otro método descrito por Thomson para determinar la cantidad m/e y v consiste en utilizar un campo eléctrico y un campo magnético al mismo tiempo para desviar el rayo, los cálculos aplicados por Thomson se describen a continuación:

Cuando el rayo atraviesa el espacio entre las placas D y E que es la región donde hay presencia de una intensidad de fuerza eléctrica³¹ F , se ve desviado en su trayectoria (por ser portador de carga) en la misma dirección de la fuerza, esta desviación θ , se puede calcular obteniendo la velocidad V_y y V al salir de la región donde está F , figura 32.

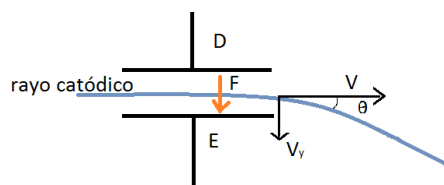


Figura 32. Esquema de la fuerza eléctrica y las velocidades que toma el rayo al cruzar por la región entre placas D y E cargadas eléctricamente. Fuente propia

De la cinemática tenemos que la velocidad final en la dirección y de una partícula que está acelerada³² es: $v_y = v_0 + at$ donde v_0 es cero y a puede ser definida como $a = \frac{F}{m}$ con m como la masa de la partícula y F la fuerza eléctrica que para este caso se define como $F = eE$, con E el campo eléctrico, el tiempo que tarda el rayo en cruzar la región

³¹ Este término se refiere en términos actuales a el campo eléctrico, al revisar los escritos originales puede aparecer una pequeña confusión con la fuerza eléctrica, Thomson utiliza la notación F para definir tal intensidad, en este texto la notación en las ecuaciones es la moderna donde E representa el campo eléctrico.

³² Aquí se desarrolla un poco más los procedimientos matemáticos del texto original basados en los principios físicos de la cinemática que eran ampliamente conocidos para la época de Thomson, también se usó la notación actual para comodidad del lector.

entre placas de longitud l es $t = l/v$ con v la velocidad en el eje x de las partículas del rayo.

Remplazando todo lo anterior en la ecuación de velocidad en y tenemos:

$$v_y = \frac{Eel}{mv} \quad (6)$$

El ángulo de desviación θ , se obtiene con: $\tan \theta = \frac{v_y}{v}$ es decir:

$$\tan \theta = \frac{E \cdot e \cdot l}{mv^2} \quad (7)$$

Un análisis similar es posible para la interacción con el campo magnético asumiendo que la dirección de los rayos es perpendicular a la del campo H, partimos nuevamente de la ecuación para la velocidad en el eje y: $v_y = v_0 + at$ donde v_0 es cero y a puede ser definida como $a = \frac{F}{m}$ con m como la masa de la partícula y F la fuerza magnética que para este caso se define como $F = evH$, con H como campo magnético, el tiempo que tarda el rayo en cruzar la región donde está presente el campo magnético entre placas de longitud l es: $t = l/v$ con v la velocidad en el eje x de las partículas del rayo.

Remplazando todo lo anterior en la ecuación de velocidad en y tenemos:

$$v_y = \frac{eHl}{m} \quad (8)$$

El ángulo de desviación ϕ , se obtiene con: $\tan \phi = \frac{v_y}{v}$ es decir:

$$\tan \phi = \frac{H \cdot e \cdot l}{mv} \quad (9)$$

De la división de (7) entre (9) se tiene el valor de la velocidad de las partículas de los rayos: $\frac{\tan \theta}{\tan \phi} = \frac{E}{veH}$ y despejando tenemos la velocidad de las partículas:

$$v = \frac{E \tan \phi}{H \tan \theta} \quad (10)$$

De la ecuación (9) despejamos la relación m/e cuyo resultado se le reemplaza v ecuación (10) para llegar a:

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l \tan \theta}{\tan^2 \phi E} \quad (11)$$

El tubo utilizado por Thomson es similar al utilizado para estudiar los efectos electrostáticos, con la novedad que un par de bobinas son puestas en la parte externa al lado y lado de las placas D y E. figura 33.

Thomson configura las bobinas y la corriente que pasa por ellas de tal forma que la dirección del campo H es tal que la fuerza resultante sobre las partículas cargadas está en el mismo plano y en dirección opuesta que la fuerza eléctrica, además las bobinas tienen el tamaño justo y la separación adecuada para producir un campo homogéneo entre las placas.

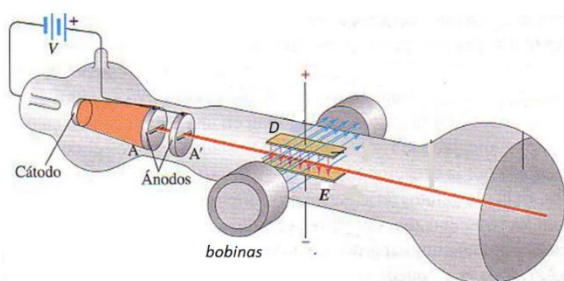


Figura 33. Tubo de Thomson para relación m/e . En este tubo es posible desviar el haz catódico con campos eléctricos y magnéticos simultáneamente, las placas E y D son conectadas a una batería que produce un campo eléctrico homogéneo al mismo tiempo las bobinas generan un campo magnético, ambos campos están concentrados en la región entre placas en donde la dirección de los campos es tal que la fuerza experimentada por ellos es en el mismo plano, pero en dirección opuesta Fuente: imagen adaptada de Química general Chang MC Graw Hill.

De esta manera se garantiza que en algún momento los ángulos ϕ y θ sean iguales permitiendo simplificar las ecuaciones (10) y (11) en

$$v = \frac{F}{H} \quad (12)$$

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{E \tan \theta} \quad (13)$$

La corriente se ajustó en las bobinas de tal forma que la deflexión magnética se compensara con la eléctrica, en este montaje no se tuvo en cuenta el campo magnético exterior a la región entre las placas, Thomson explica que dicho campo es inferior al que está entre las placas y asegura que altera los resultados levemente, y que es más preciso y menos laborioso que el método anterior donde solo usa campo magnético, sin embargo limita el trabajo a unos rangos de presión, los resultados se plasmaron en la tabla 3

Gas.	θ .	H.	F.	l .	m/e .	v .
Air	8/110	5.5	1.5×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	2.8×10^9
Air	9.5/110	5.4	1.5×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9
Air	13/110	6.6	1.5×10^{10}	5	1.2×10^{-7}	2.3×10^9
Hydrogen	9/110	6.3	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.5×10^9
Carbonic acid...	11/110	6.9	1.5×10^{10}	5	1.5×10^{-7}	2.2×10^9
Air	6/110	5	1.8×10^{10}	5	1.3×10^{-7}	3.6×10^9
Air	7/110	3.6	1×10^{10}	5	1.1×10^{-7}	2.8×10^9

Tabla 3. Resultados del experimento de deflexión de los rayos con campos eléctricos y magnéticos.
Fuente: Cathode Rays JJ Thomson

Los valores de la tabla están igual nuevamente dentro de los órdenes de magnitud 10^{-7} para la relación m/e y de 10^9 para la velocidad, los resultados son independientes del gas dentro del tubo y del material del cátodo.

El orden de magnitud para la relación m/e es de tres órdenes de magnitud menor al ya conocido para los iones de hidrogeno en la electrólisis, para Thomson esto puede indicar que los portadores de carga de los rayos catódicos son mucho más pequeños que los portadores de carga de la electrolisis, o que la carga es mucha mayor al ion de hidrogeno, además, estos portadores son los mismos independientemente del gas a través del cual pasa la descarga, y que las trayectorias medias libres dependen únicamente de la densidad del medio atravesado por estos rayos.

3.6 Conclusiones respecto al trabajo experimental de Thomson

Con estos experimentos Thomson concluye:

1. Que indudablemente los rayos son portadores de carga y que el camino del rayo es el mismo de la corriente.
2. Que el rayo si es susceptible a la presencia de campos eléctricos y puede ser desviado por los mismos.
3. Que los rayos son capaces de ionizar al medio y dotarlo de conductividad.

Por último, plantea la existencia de partículas cargadas a las que llamó corpúsculos.

4. ¿Quién tenía la razón Hertz o Thomson?

El análisis de los experimentos sobre rayos catódicos hechos por Hertz y Thomson, desde sus escritos originales, nos llevan por un viaje al interior de la ciencia, mostrándonos una faceta que pocas veces se exhibe: ¿cómo se construye un concepto? ¿cómo una idea prevalece sobre las demás o es descartada por la comunidad científica?, y ¿qué papel juega el experimento en la construcción de una teoría? Además, nos da pie para entender la persona que hay detrás del científico su cosmovisión y sus puntos de vista, no debemos olvidar que la ciencia es una empresa de construcción social y que, como tal, está ligada a todas las dimensiones y características del ser humano.

Al contrastar las investigaciones de Hertz publicadas en *Miscellaneous Papers* en 1886 y Thomson publicadas en *Philosophical Magazine* en 1897 llama la atención la aparente contradicción de los resultados, para Hertz los rayos catódicos son solo un fenómeno que acompaña la descarga y no tienen nada que ver directamente con el camino de la corriente, y que las propiedades electrostáticas y electromagnéticas de los rayos catódicos son nulas o muy débiles (Hertz, 1886), mientras que para Thomson los rayos catódicos se pueden torcer y desviar por fuerzas magnéticas, la electrificación negativa sigue la misma ruta que los rayos, y esta electrificación negativa está indisolublemente conectada con los rayos catódicos. (Thomson J. J., 1897)

Para el alemán se confirmó que el rayo catódico es algún tipo de manifestación del éter de carácter continuo con características ondulatorias similares a las de la luz, para el inglés el rayo catódico era una manifestación de algún tipo de partícula cargada, ¿acaso hubo errores en sus apreciaciones o sus procedimientos?, la respuesta va más allá de un sí o un no, ambos Hertz y Thomson abordaron con rigurosidad sus experimentos, construyeron instrumentos ingeniosos y con la suficiente sensibilidad para sustentar sus medidas, su manera de proceder siguió pasos lógicos y sus conclusiones fueron apegadas a sus observaciones, ¿entonces que hizo que sus resultados fueran tan distintos?

Lo primero que hay que observar es el punto de partida de Thomson y Hertz, ninguno de los dos parte de cero ambos inician sus investigaciones reproduciendo experimentos previos, Hertz parte de los experimentos de Warren de la Rue que mostraban resultados contrarios a sus hipótesis, mientras que Thomson parte del experimento de Jean Perrin que es favorable a sus ideas, ambos modifican los experimentos para probar sus puntos de vista, Hertz la tiene más difícil porque debe mostrar algún tipo de error en Warren de la Rue, mientras que Thomson le bastaría con repetir el experimento para reconfirmar los resultados.

Los dos abordan soluciones ingeniosas, Hertz logra mostrar que es necesario cambiar la fuente de voltaje y mejorar la sensibilidad de los instrumentos de medida del experimento de la Rue y así identificar que la descarga es continua y por lo tanto el rayo también, mientras que Thomson reacomoda los elementos de mediada del experimento de Perrin, para obtener medidas solo cuando el rayo sea desviado por un campo magnético.

Aquí se alcanza a esbozar las maneras distintas de abordar la investigación, para Hertz los resultados adversos a su hipótesis son fuente de inspiración y argumentos durante toda su investigación, utiliza una lógica de contradicción en donde cada experimento es refutado por él mismo, así los mejora poco a poco hasta que las objeciones se reduzcan o estén dentro de los valores de incertidumbre de medida, en este proceso crea nuevos aparatos para sus demostraciones, mientras que Thomson parte de experimentos que apoyan sus hipótesis, adaptándolos a sus intereses y paso a paso los hace más sofisticados, construye sus demostraciones con los resultados anteriores y de esta manera prueba sus ideas y plantea nuevas.

El punto de mayor discordia surge de la respuesta de los rayos catódicos a campos electrostáticos, para Hertz los rayos no deberían reaccionar a los campos eléctricos porque, desde su punto de vista, el rayo y la descarga en un tubo catódico son dos fenómenos distintos, sus resultados confirman tal hipótesis y lo llenan de confianza para construir un tubo que más bien parece una “caja de descarga”, en donde fuese posible ver los dos fenómenos por separado. figura 34

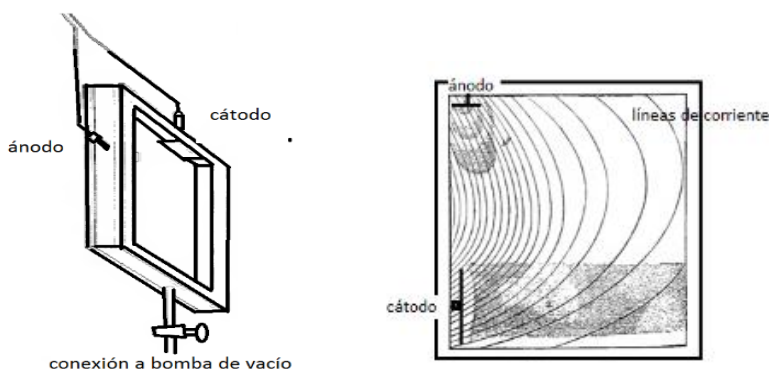


Figura 34 Izquierda, caja de descarga de Hertz, su forma rectangular favorece trazar las direcciones de la descarga mediante líneas de corriente y así mostrar que hay dos fenómenos separables y distinguibles en los tubos. Derecha, líneas de corriente trazadas por Hertz que muestra que tienen trayectorias diferentes a las del rayo de sombra gris. Fuente: Miscellaneous Papers.

La caja de descarga de Hertz es ideal para separar el fenómeno de descarga y el rayo, las líneas de corriente, trazadas al mover la caja en proximidades de un imán colgante, parecen ser una prueba contundente de la separación de la descarga y el rayo catódico, porque dichas figuras muestran con claridad regiones en donde las trayectorias de la corriente y el haz catódico de sombra gris son distintas. (Hertz, 1886, pág. 246)

Por otro lado, el tubo de Thomson alargado con un rayo colimado es ideal para mostrar la trayectoria del rayo, porque el haz fino es fácilmente visible y su trayectoria es la suficientemente larga para apreciar la desviación del rayo. Figura 35

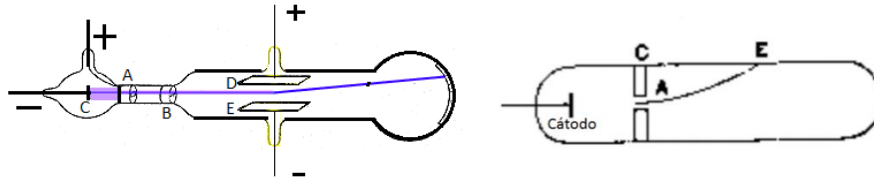


Figura 35, tubos utilizados por Thomson, la configuración alargada del tubo con un haz colimado es ideal para seguir su trayectoria y ver claramente la desviación por campos eléctricos. Fuente Cathode Rays JJ Thomson.

Thomson no tiene esa visión de dos fenómenos separados en los tubos y por lo tanto no ahonda en ella, los resultados negativos de los rayos catódicos a campos eléctricos mostrados por Hertz deben tener otra explicación, Thomson sospecha, basado también en su visión propia de los rayos catódicos como partículas cargadas, que el gas circundante en el tubo está siendo afectado por tales partículas y por eso se preocupa por mejorar las condiciones de vacío, aquí vemos un ejemplo de cómo sus concepciones previas y la visión propia del experimentador condiciona la forma en que se construye el experimento.

Otro ejemplo en donde vemos este comportamiento, es en el montaje de Thomson al utilizar colimadores del haz, figura 36, los utiliza, porque desde su punto de vista, es posible concentrar el haz para su estudio, mientras que para Hertz es mejor utilizar un filtro que separa la descarga del rayo catódico, para Hertz concentrar el haz evita que se aprecie su verdadera naturaleza pero para Thomson filtrar el haz no tiene sentido, sus puntos de vista parecen ser inconmensurables y esto influye en sus incompatibilidad en las conclusiones.

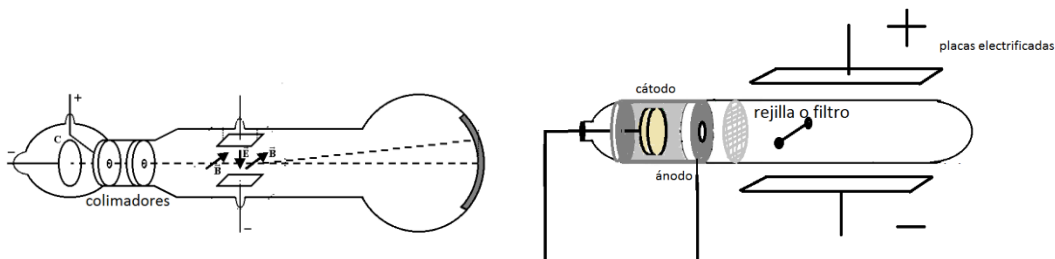


Figura 36. Tubos de Thomson VS tubos de Hertz. A la derecha tubo de Thomson para desviación del Haz mediante campos eléctricos, el Haz es colimado por dos discos con una pequeña perforación en su centro. Izquierda, tubo de Hertz para el mismo propósito, el haz es filtrado por una rejilla metálica. La diferente visión de los rayos hace que el montaje sea configurado de manera distinta.

Pero no sólo la configuración de los equipos determina los resultados, el experimentador puede omitir resultados que no esperaba o que no le son favorables, por ejemplo, Thomson no le presta importancia a que el haz se vea dispersado como un abanico en presencia de campo magnético, sus razones pueden ser diversas, desde ser un resultado de poca importancia para su demostración o que ahondar en el tema pueda dar pie para suponer hipótesis que no favorezcan su investigación.

Hertz también omite resultados, las terminaciones de algunas de sus líneas de corriente que no parten del cátodo y no terminan en el ánodo, este hecho puede derribar por completo la idea de que esas líneas trazan realmente el camino de la corriente, sin embargo, Hertz minimiza este resultado argumentando que las líneas no cierran en los electrodos por el grado de incertidumbre de la medida. (Hertz, 1886, pág. 248)

Un hecho que paso poco advertido para Hertz, y que es posiblemente el causante de que sus resultados fueran tan diferentes a los Thomson, es el nivel de vacío de los tubos, en su escrito Hertz casi ni lo menciona parece ser que es un factor de poco interés en su investigación, pero ¿cómo es posible que pase por alto este factor si es fundamental para la formación de los rayos catódicos?

Una posible respuesta, que en general se menciona en los libros de historia, es que Hertz no contaba con la bomba adecuada para producir un vacío óptimo. Sin embargo, este argumento se invalida al hacer un análisis de la tecnología de vacío del momento, entre 1886 y 1897 no hubo cambios sustanciales en la tecnología de vacío que marcará una diferencia entre los experimentos de Hertz y Thomson (Talavera & Farías , 1995), es posible que Hertz no mostrara una preocupación por el vacío debido a su idea que tenía de los rayos catódicos como manifestaciones del éter, no es necesario mejorar el vacío ya que el éter no sería afectado por las bombas.

En apariencia, los experimentos de Hertz y Thomson parecen ser demasiado diferentes como para analizarlos y compararlos, algunos de ellos y como se ha expuesto aquí, están configurados y organizados según como se pensaba la naturaleza de los rayos, sin embargo, el montaje que utiliza Hertz para determinar las propiedades electrostáticas de los rayos es la básicamente la misma que utiliza Perrin y la que utiliza Thomson figura 37.

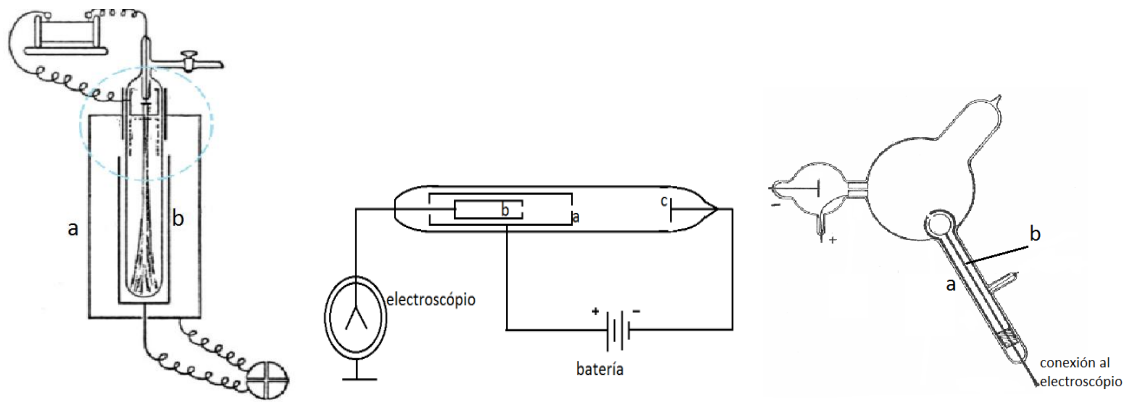


Figura 37 Montaje de Hertz, Perrin y Thomson para medir la carga de los rayos, con ellos se busca determinar la presencia de carga eléctrica en los rayos catódicos, a la izquierda el montaje de Hertz, en el centro el montaje de Perrin, y a la derecha el montaje de Thomson, en apariencia son muy distintos, sin embargo, la configuración para detectar la carga es básicamente la misma, dos cilindros concéntricos metálicos a y b, uno al interior del otro aislados entre sí, con b conectado a un electroscopio. Fuente: imagen izquierda: *Miscellaneous Papers*, imagen centro: adaptación de *The Replication of Hertz's Cathode Ray Experiments*, James Mattingly, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.*, Vol. 32, No. 1, pp. 53-75, 2001, imagen derecha: *Cathode rays JJ Thomson*

Recordemos que Thomson parte del experimento de Perrin para construir su primer montaje, pero lo que diseñó Perrin básicamente es una reconstrucción del experimento de Hertz, por lo tanto, de cierta forma Thomson estaba replicando a Hertz, y es natural que lo hiciera, pues el argumento más fuerte a favor de la hipótesis de que los rayos son un tipo de onda es la ausencia de carga en los rayos, como lo mostró Hertz con este montaje.

Los tres montajes utilizan cilindros metálicos a manera de detector de carga, los cilindros a y b para los montajes de Hertz y Perrin, figura 37, tienen las mismas conexiones, a actúa como ánodo mientras que b se conecta al electroscopio, los cilindros para el caso de Perrin y Thomson están dentro del tubo, mientras que para Hertz estaban por fuera del tubo, se podría pensar que esto pudo ser causal para que los resultados fueran diferentes, sin embargo, revisando detalladamente el proceder de Hertz, él hace una prueba con ese mismo montaje pero en lugar de usar el tubo de descarga usa una varilla y muestra que su montaje reacciona a presencia de carga, figura 38, pero más allá de eso con su prueba de la varilla también nos está mostrando que el detector funciona si estuviese dentro del tubo, porque en la prueba no hay vidrio entre los cilindros y la varilla es decir entre el detector y las cargas, Hertz conocía las propiedades electrostáticas del vidrio porque fueron parte de sus investigaciones previas, y por lo tanto entendía las consecuencias de la presencia del vidrio entre los rayos y los cilindros, Hertz puso sus detectores por fuera del tubo porque no quería que se contaminaran con alguna corriente residual de los electrodos, quería que el detector reaccionara al rayo catódico puro.

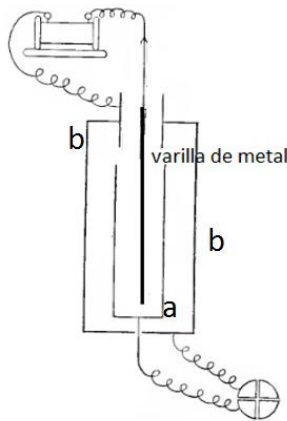


Figura 38. Prueba de montaje de Hertz con varilla utilizado para mostrar que su detector formado por los cilindros *a* y *b* reaccionan a la presencia de carga, el hecho de introducir una varilla en su montaje tenía también la intencionalidad de mostrar que no es necesario que sus detectores estuvieran dentro del tubo. Fuente propia

El montaje de Thomson tiene como novedad la separación del ánodo del cilindro *a* de detección, esto facilitó posicionar los cilindros lejos de la trayectoria de los rayos, permitiendo mostrar sin lugar a duda que los detectores reaccionan solo por la presencia del rayo al ser desviado por un imán, demostrando dos cosas a la vez: que el rayo posee carga y que lleva la misma trayectoria del rayo, y que el rayo es susceptible a las fuerzas magnéticas.

No hay claridad de porque el experimento de Hertz arrojó resultados negativos en cuanto a la presencia de carga en los rayos, desde la perspectiva actual parece ser simplemente un experimento fallido, el error si lo hubo, no es apreciable desde la lectura de su publicación original, sería necesario replicar el experimento.

Llama poderosamente la atención que el trabajo de Hertz no tiene un despliegue matemático detallado más allá de unas aproximaciones sobre sensibilidad de sus instrumentos y valores máximos y mínimos medibles detectables, obviamente utiliza la matemática presente en la teoría de Maxwell para configurar sus montajes, pero en ningún momento intenta plantear o desarrollar algún tipo de descripción matemática de sus líneas de corriente y su relación con el rayo, el porqué de esta forma "libre" de matemáticas en su trabajo de rayos catódicos al parecer surge de sus experiencias en trabajos anteriores, por eso decidió renunciar, por un tiempo, a la medición y cálculo exacto y en cambio, concentrarse en el experimento, esto le permitiría descubrir algo nuevo y, como él dijo, de "gran interés teórico" (Hertz, 1886, pág. xxii)

Hertz ya había atraído la atención como un investigador metódico que podía responder preguntas que requerían observaciones precisas, cálculos refinados y un control detallado sobre su aparato, lo que aún le faltaba por hacer era producir conocimiento cualitativamente nuevo y pensó que podría encontrar este conocimiento en una

investigación de la naturaleza de los rayos catódicos en los que según él "poco se ha hecho" (Hertz, 1886, pág. xxii).

Por otra parte, no era fácil tratar de hacer una descripción de los rayos catódicos mediante el uso de ecuaciones, pues la idea que tenía Hertz de ellos estaba involucrado el concepto de éter, la hipótesis del éter fue el tema de considerables debates a lo largo de su historia, ya que requería, entre otras propiedades, la existencia de un material invisible e infinito sin interacción con los objetos físicos (Lodge & Rayleigh, *The Ether (Aether) of Space*, 1908). A fines del siglo XIX, se cuestionaba la existencia del éter, aunque no existía una teoría física que lo reemplazara, sus descripciones matemáticas nunca fueron satisfactorias, el mismo Helmholtz trató de construir un éter con características que se amoldaran a las ideas Newtonianas y que explicase la idea de acción a distancia.

La investigación de Hertz sobre rayos catódicos a pesar de ser recordada en la historia de las ciencias como un experimento fallido, jugó un papel importante en la carrera de Hertz, sus desarrollos técnicos, y sus procedimientos de medida fueron las piedras angulares que permitieron el desarrollo de su investigación sobre las ondas electromagnéticas, recordemos que Hertz cuatro años después, en 1887 publica su trabajo sobre las ondas, que incluyó no solo la demostración experimental de su existencia, sino que también analizó las propiedades de dichas ondas, y para ello ideó el equipo para generarlas y detectarlas, la técnica utilizada para detectar las ondas es similar a la utilizada para trazar las líneas de corriente en su caja de descarga.

Hertz mueve su caja por la habitación en cercanías de su detector, un imán colgado en un delgado hilo, y sigue el movimiento de tal forma que su detector no marque valor alguno, la trayectoria seguida por la caja de descarga es la misma que sigue la corriente (Hertz, 1886, pág. 243), en el caso de su investigación con las ondas el procedimiento es similar, mueve su antena detectora por una habitación en la cual está su generador de ondas conformado por un oscilador eléctrico, la antena está conformada por un anillo de metal con una pequeña abertura, por la cual salta una chispa indicando la presencia de la onda electromagnética figura 39, al mover la antena por todo el laboratorio logra identificar la longitud de las ondas trazando trayectorias donde su detector no muestra chispas.³³

³³ Este es uno de los tantos métodos que utilizó Hertz para estudiar las ondas, su trabajo lleno de formidables e ingeniosas técnicas de medida muestran la gran habilidad en el manejo de los equipos del laboratorio y su gran destreza matemática. Los trabajos de Hertz dedicados a la comprobación existencia y naturaleza de las ondas electromagnéticas se presentan en cuatro publicaciones, los tres primeros publicados inicialmente en *Annalen*. El primero "Sobre oscilaciones eléctricas muy rápidas" (1887) en el que describe sus experimentos iniciales y explica el funcionamiento del conocido como "oscilador de Hertz". El segundo trabajo se titula "Sobre ondas electrodinámicas en el aire y su reflexión" (1888) en el que muestra las ondas electromagnéticas estacionarias producidas por interferencia entre ondas hertzianas emitidas por un oscilador reflejadas sobre una superficie metálica colocada adecuadamente. El artículo tercero es "Las fuerzas de oscilaciones eléctricas, tratadas según la teoría de maxwelliana" (1888) que representa gráficamente y calcula el proceso de formación de ondas en el seno de un campo electromagnético. El último trabajo, se puede considerar como una recopilación de los trabajos realiza dos en Karlsruhe bajo el título "Sobre rayos de fuerza eléctrica" y fue presentado en la Academia de Ciencias de Berlín en 1888. Tomado del artículo escrito por Joaquín Summers Gámez revista vida científica pág. 93

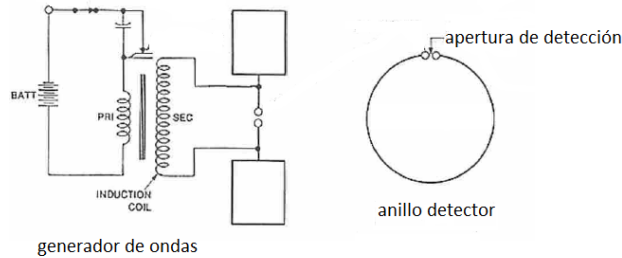


Figura 39. Esquema descriptivo del equipo usado por Hertz para la detección de las ondas electromagnéticas, el generador utiliza la misma bobina de inducción o carrete de Ruhmkorff que también se utiliza para alimentar su caja de descarga, su antena receptora es un anillo con una pequeña abertura por donde saltan las chispas. Fuente revista vida científica artículo escrito por Joaquín Summers Gámez.

Mover el montaje por el espacio da cuenta de la visión que tiene Hertz de los fenómenos eléctricos, los fenómenos, para Hertz, no están confinados en un equipo o material, sino que están en el espacio mismo, tanto las ondas electromagnéticas como los rayos catódicos son fenómenos que se propagan por el espacio, lo dotan de cualidades y características y por ello era necesario construir equipos que se pudiesen desplazar por el laboratorio, la experiencia ganada con su estudio de los rayos catódicos fue un escalón más que lo llevó a su obra cumbre sobre las ondas electromagnéticas.

Visto desde esta perspectiva la experimentación de Hertz con los tubos de descarga tenían un propósito más allá de una explicación del fenómeno lumínico, tal vez buscaba a la larga ser una prueba de la existencia de las ondas electromagnéticas.

No es posible identificar desde el interior del experimento o sólo desde la investigación en el laboratorio porque una hipótesis se convierte en una teoría aceptada y difundida, el análisis de los experimentos de Hertz y Thomson por sí mismos, no muestran el por qué las ideas de Thomson prevalecieron sobre las de Hertz, no se trató de un simple error en las medidas o en el proceder del laboratorio, que dos investigaciones del mismo fenómeno tengan resultados y aceptaciones tan distintas, más bien tiene que ver más con el ámbito científico y sus facetas, a finales del siglo XIX, la ciencia europea y en especial la física estaba a punto de una revolución, inquietudes que fueron cada vez más profundas sobre la naturaleza y composición de la materia surgían desde diferentes escuelas y disciplinas, el electromagnetismo de Maxwell y su relación con la materia era un tema que movió intereses de todo tipo, inclusive fue la primera advertencia sobre la necesidad de replantear el modelo Newtoniano, pero no sólo desde el electromagnetismo surgían las inquietudes, las investigaciones en termodinámica también arrojaban dudas y nuevas hipótesis que mostraban la necesidad de entender la naturaleza de la materia, además, desde los químicos existían cada vez más indicios de la composición de la materia, la revolución industrial presionó el procesamiento de nuevos minerales, su organización en una tabla basados en sus propiedades y el análisis de reacciones propiciadas por la

electricidad arrojaban hipótesis e ideas sobre la materia que cada vez cobraba más fuerza, en esta atmósfera fértil y cargada de descubrimientos y nuevas ideas es donde los experimentos de Thomson y Hertz estaba envueltos, y es por eso que identificar por que los resultados de Thomson prevalecieron sobre otros, requiere de una visión más allá de la mostrada desde el laboratorio.

4.1 El reconocimiento de Thomson y su asociación con el electrón

Son varios los factores que inclina la balanza a favor de Thomson, por un lado, están los relacionados con su investigación con montajes claros, resultados reproducibles y con desarrollos matemáticos estructurados que describen y sustentan las observaciones, por otro lado, hay factores que son externos a la investigación de Thomson referentes a la aceptación por parte de la comunidad científica, que suelen estar condicionados al contexto político, social y económico de la época, además de controversias, disputas y conveniencias entre escuelas de pensamiento.

Parte de la aceptación de los resultados de Thomson es gracias a la utilización del lenguaje matemático para la explicación de su resultados, en las ciencias las matemáticas, por razones que no entraremos a discutir en este escrito, dan forma y consolidan una teoría, un ejemplo cercano es el de Michael Faraday y las líneas de fuerza, basado en sus observaciones, planteó la idea de líneas de fuerza magnética a manera de tubos extendiéndose por el espacio, idea que en el momento fue poco aceptada, entre otras razones, por la falta de descripciones matemáticas satisfactorias, afortunadamente Maxwell tomó las investigaciones de Faraday y las dotó de cuerpo matemático sólido que favoreció su aceptación.

La historia reconoce a Thomson como “descubridor” del electrón y su estudio de los rayos catódicos como el punto final de una controversia por la naturaleza de los rayos catódicos, sin embargo, y como lo voy a discutir a continuación, declarar a Thomson como “descubridor” trae una serie de connotaciones de descubrimiento que buscan ubicar el hecho en un lugar, identificar un autor, precisar un tiempo y equipos específicos, pero esto es contradictorio a la forma en que se construye la ciencia, las ideas no surgen de un único protagonista ni están confinadas a un día ni lugar en particular, la aceptación de una teoría, una idea o un concepto, se extiende a lo largo de varios años, involucra a una variedad de personas, lugares, academias y por lo general se convierte en un tema de debate.

En el caso de la historia del electrón hay un ejemplo claro de como una serie de factores, modificaron la forma en que se aceptó y consolidó el concepto, la historia que se cuenta hoy sobre el electrón en la mayoría de los libros no es más que una versión escrita por los “ganadores”, y como ganadores la historia se acomoda a sus intereses.

La historia del electrón proviene de una conferencia dada por el británico Oliver Lodge (1851-1940) en 1902 y que se convirtió en un libro que se publicó en 1907³⁴, el relato de Lodge, en forma cada vez más abreviada, es el que ha entrado en los libros de texto británicos desde entonces. (Falconer, 2001).

Para Lodge el papel de Thomson y su relación m/e es preponderante y es el que determina la existencia del electrón:

Lodge empieza por un recorrido por las propiedades de una partícula cargada en movimiento, repasando rápidamente el trabajo de Heaviside sobre el estado del éter circundante, el de Poynting sobre la transmisión de energía y el de Larmor sobre la energía irradiada de las partículas. Esto conduce a un capítulo sobre la formulación de JJ Thomson del concepto de masa electromagnética publicado en 1881, a continuación, Lodge pasa a trazar la idea de una unidad indivisible de carga eléctrica, comenzando con las leyes de electrólisis de Faraday. Él le da crédito a Johnstone Stoney al nombrar esta unidad como 'el electrón' y deriva la relación de masa a carga para el ion hidrógeno, citando experimentos de Stoney, Loschmidt y Kelvin. Aquí Lodge desliza implícitamente la idea de que el electrón podría ser una partícula en lugar de simplemente una cantidad fija de carga.

Lodge luego pasa a los problemas de comprensión de la naturaleza de los rayos catódicos, la creencia general era que eran partículas cargadas negativamente, pero las partículas de dimensiones atómicas serían demasiado grandes para atravesar una delgada lámina metálica, como lo hicieron los rayos catódicos, o para tener la trayectoria libre media larga observada en el aire, además, Arthur Schuster, y más tarde J S Townsend, habían observado que los portadores de electricidad negativa en un tubo de descarga eran muy móviles, lo que implica un tamaño muy pequeño, Lodge sugiere que podrían ser cargas aisladas o "electrones".

Así se preparó el escenario para los experimentos de J J Thomson de abril de 1897 en los que midió la velocidad y la relación entre la masa y la carga de los rayos catódicos Según Lodge, parecía probable que la masa asociada con la partícula de rayos catódicos fuera 1000 veces más pequeña que el átomo de hidrógeno, y las partículas podrían ser los "electrones individuales desprendidos y hasta ahora hipotéticos" Para Lodge, entonces, a fines de abril de 1897, la existencia del electrón se había establecido mediante experimentos con rayos catódicos, (Falconer, 2001, pág. 79 80)

El recorrido que nos muestra Lodge hacia la consolidación del concepto electrón deja por fuera las contribuciones de varios de los científicos continentales, Lodge privilegia los

³⁴ El libro que publicó fue llamado: *Electrons, or The Nature and Properties of Negative Electricity*,

aportes experimentales sobre los teóricos, olvida trabajos importantes como los de Hendrik Lorentz (1858-1928) en radiación electromagnética,³⁵ no toma en cuenta los planteamientos de Helmholtz en donde propone la necesidad de la existencia de un torrente molecular que consistía en partículas cargadas en los rayos catódicos (Whittaker, 1910), también omite el importante trabajo de Joseph Larmor (1857-1942),³⁶ y como si fuera poco omite por completo los trabajos de Hertz, tal vez porque Hertz se le adelantó por poco en la prueba de la existencia de las ondas electromagnéticas.³⁷

La visión de Lodge puede estar acomodada a su visión del electrón y su trayectoria como experimentalista, para Lodge los corpúsculos de Thomson son los mismos electrones de Stoney, Lodge resume: las magnitudes que necesitan determinación experimental en relación con los rayos catódicos, para resolver la cuestión y determinar su naturaleza real, son la velocidad, la carga eléctrica y, si es posible, la masa de las partículas voladoras. (Lodge, *Electrons or the nature and properties of negative electricity*, 1907), es decir casi todo lo que aportó Thomson en su investigación.

Sin embargo, Thomson no hablaba de electrones sino de corpúsculos, la unificación de estos dos criterios por parte de Thomson vino mucho después. Vale la pena señalar esta evidencia de la fidelidad de Lodge a la filosofía mecanicista Newtoniana, la creencia de que todos los fenómenos podrían reducirse a materia en movimiento y describirse por su masa y velocidad, era típico de la mayoría de los físicos británicos.

La reconstrucción de Lodge es incompleta y algo sesgada, minimiza los aportes de los científicos continentales y ubica el trabajo de Thomson como el pináculo de la investigación considerando el experimento con rayos catódicos como crucial para el nuevo concepto electrón, hecho que dejó huella en las siguientes generaciones donde se escriben versiones de la historia cada vez más cortas y simplificadas quedándose con la última parte de la historia, elevando a Thomson casi como el único artífice y protagonista de esta historia.

¿Por qué Lodge interpreto de esta manera la historia? La respuesta puede involucrar desde sus deseos nacionalistas, camaradería con sus colegas más allegados y razones emocionales o de conveniencia, pero estas razones son especulaciones, para dar respuesta

³⁵ El trabajo de Lorentz junto a Zeeman sobre la radiación electromagnética plantea la idea de cargas oscilantes que llamó iones en la materia como fuentes de radiación.

³⁶ Larmor sostuvo que la materia estaba formada por partículas elementales moviéndose en el éter, creía que la fuente de la carga eléctrica era una "partícula".

³⁷ Oliver Lodge construyó primero que Hertz un dispositivo que mostraba la existencia de las ondas electromagnéticas, sin embargo, decidió tomar unas vacaciones antes de presentarlo a la comunidad científica de Londres, y es precisamente durante ese periodo cuando Hertz publica su investigación sobre las ondas electromagnéticas, ganado el crédito que lo acomoda como el que probó la existencia de las ondas. Tomado de *La historia de la electricidad* documental BBC Londres.

a esta pregunta es más acertado aferrarnos a un análisis de la perspectiva británica de la naturaleza y sus explicaciones sobre la electricidad en la materia.

La construcción que tenía Lodge del electrón es diferente a la que pudiesen tener los científicos continentales, su concepción respondía inquietudes diferentes, basadas en la idea de materia y carga que tenían en su momento los británicos.

En Gran Bretaña, existían problemas similares a los que tenían los alemanes referentes a la incapacidad de la teoría de Maxwell para explicar algunos fenómenos, pero se trataban de manera muy distinta a como lo hacían los alemanes es decir, desde la mecánica del continuo, los alemanes tenían una visión del mundo básicamente particulada. (Buchwald J. , 1985), tenían una tradición de las teorías atomísticas de la electricidad y les preocupaban las partículas materiales incrustadas en un éter estacionario.

Para la física alemana y en general la continental era muy importante conciliar su visión particulada con el aparente éxito de la teoría del continuo de Maxwell, este es precisamente el trabajo principal de Helmholtz, desarrollando una teoría híbrida, con la cual intentó conciliar la idea de acción a distancia y la partícula con la teoría de campos de Maxwell, pero el que mejor se acercó fue el holandés Hendrick Lorentz (1853 1928) en su trabajo de 1892, sus “partículas eléctricas” o iones, que eran materiales, cargadas e incrustadas en un éter estacionario, daban una explicación aceptable, conciliando el mundo particulado con el continuo de Maxwell, porque los estudios de Lorentz proponían que la vibración de los iones eran responsables de la radiación electromagnética, estos “iones”, estaban unidos elásticamente dentro de las moléculas y mediaron la interacción entre el éter y la materia, pero el mecanismo de acoplamiento fue no se especificó y tampoco la estructura del éter.³⁸

La teoría de Lorentz tampoco dio ninguna indicación del tamaño de los iones o un método para encontrarlo. Su descripción sugiere que los pensó comparables a los iones electrolíticos, pero los nombró por un tiempo partículas "luces", distinguiéndolas así de los iones de la electrólisis, antes de cambiar a "electrones" en 1899.

El trabajo de Lorentz fue complementado por Pieter Zeeman (1865 1943)³⁹, quien pudo comprobar experimentalmente la existencia de las partículas cargadas, permitiendo por primera vez, determinar el tamaño de las cargas vibratorias. Las cargas demostraron tener una relación m/c aproximadamente 2000 veces más pequeña que el ion hidrógeno, lo que

³⁸ Los trabajos de Lorentz se centraban en esclarecer la relación entre electromagnetismo y la luz, los iones según Lorentz eran los responsables de emitir ondas electromagnéticas al vibrar intensamente, por lo tanto, sus iones son diferentes a los iones propuestos en los trabajos de la electroquímica y el fenómeno de la electrólisis.

³⁹ El trabajo de Zeeman consistió en estudiar los efectos de los campos magnéticos sobre las fuentes de luz, llevándolo a encontrar el desdoblamiento de las líneas espectrales, (efecto Zeeman) corroborando así la hipótesis de Lorentz.

obliga a relacionar estos iones con los electrones, para los físicos continentales este era un trabajo de mayor importancia hacia la construcción de la idea la existencia de partículas cargadas que los trabajos de Thomson, para los continentales y en especial a los alemanes, los experimentos de Thomson se consideraban uno más de los tantos que calcularon la relación m/e .

Lodge no consideró el trabajo de Lorentz ni el Zeeman porque su visión de la materia no era la alemana, a simple vista, la visión británica parece más atomístico que el alemán, y parecen preocupados por reducir el mundo a materia en movimiento, pero una segunda lectura muestra que, para ellos, la materia es simplemente una estructura del éter, a menudo un anillo de vórtice o un centro de tensión.⁴⁰

Lodge omite los trabajos de Lorentz y Zeeman porque tal vez conocía la visión que tenía Thomson sobre la naturaleza de la materia, Thomson era cercano a las ideas propuestas por otro británico en 1894 Joseph Larmor (1857-1942). Larmor había llegado independientemente a una teoría de las partículas eléctricas que abordaba los mismos problemas que la de Lorentz,⁴¹ pero definiéndolas como centros de tensión radial en un éter rotacionalmente elástico, Larmor asumió que sus partículas eléctricas estaban asociadas con una masa al menos tan masiva como el átomo de hidrógeno, sin embargo, en 1897 revisó esta suposición e identificó su “electrón” con las pequeñas cargas oscilantes postuladas por Zeeman y Lorentz.⁴²

Entonces para Lodge las investigaciones de Lorentz y Zeeman estaba representadas en los trabajos de Larmor que son más cercanos a las ideas británicas de la materia, porque Thomson trabajaba dentro de la misma línea conceptual de Larmor, para Lodge, la idea de un electrón había surgido de las investigaciones de la conducción gaseosa, la teoría de los electrones y la teoría de la conductividad de Thomson se apoyaron mutuamente; el éxito de uno dependía fundamentalmente del éxito del otro, desde el principio Lodge asocia los corpúsculos de Thomson con la idea de electrón que circundaba en el ambiente

⁴⁰ Durante gran parte del siglo XIX, la visión más aceptada de la materia en Inglaterra era la propuesta por William Thomson (Lord Kelvin) de átomos en forma de vórtices. La teoría de los átomos de vórtice plasmaba claramente las convicciones mecanicistas de Kelvin quien expresó: “Me parece que la manera de acercarnos a la pregunta ‘¿podemos o no entender un fenómeno particular en física?’ es respondiendo ‘¿somos capaces de hacer un modelo mecánico de él?’ Tomado de Conogasi. (2018). Los anillos de vórtice y la teoría atómica. 2020, noviembre 1, Conogasi.org Sitio web: <http://conogasi.org/articulos/los-anillos-de-vortice-y-la-teoria-atmica/>

⁴¹ J. Larmor, ‘A dynamical theory of the electric and luminiferous medium’, *Philosophical Transactions of the Royal Society Part I* 185 (1894) Larmor sostuvo que la materia estaba formada por partículas elementales moviéndose en el éter. Creía que la fuente de la carga eléctrica era una “partícula”

⁴² J Larmor, ‘On the theory of the magneto influence on spectra and on the radiation from moving ions’, *Philosophical Magazine* 44 (1897), Larmor mantuvo que el flujo de partículas cargadas constituía la corriente eléctrica (pero no era parte del átomo). Calculó la tasa de energía radiada desde un electrón acelerado. Y explicó la división de las líneas espectrales en un campo magnético por la oscilación de electrones.

científico. (Falconer, Corpuscles, Electron and cathode rays: JJ Thomson and the "discovery of electron", 1987)

Sin embargo Thomson a diferencia de Larmor y Lorentz identificó algunos aspectos de la electroquímica que fueron determinantes para la comprensión de la materia, Thomson pensaba que no solo desde el electromagnetismo y la termodinámica fuese posible determinar la naturaleza de la materia, sino que era necesario estudiar los fenómenos de separación de sustancias, por eso asume el estudio de los rayos catódicos no como un fenómeno lumínico y de carácter electromagnético sino como la continuación de los estudios hechos por los ionistas sobre conducción en los líquidos extendidos a los gases.

Thomson estudia los rayos catódicos y desde el principio plantea la idea de corpúsculos como entes materiales de naturaleza puramente eléctrica, su visión está centrada en estudiar la continuidad de los gases y eso determinó los experimentos que realizó, siguiendo procedimientos similares a los hechos en la electrolisis, como por ejemplo, probar con diferentes líquidos o electrolito, que en el caso de Thomson es probar la deflexión del rayo en diferentes gases, cambiar en la electrólisis el material de los electrodos que es similar a cambiar el material del cátodo y el ánodo en los tubos de descarga, esto de alguna manera muestra la visión que tuvo acerca de los rayos catódicos, como un fenómeno de conducción en los gases y su visión electroquímica del fenómeno y no un fenómeno luminoso relacionado con el electromagnetismo de Maxwell.

En este aspecto la visión de Thomson sobre los rayos catódicos se separa de la de Hertz sustancialmente por eso no es posible que sus resultados coincidan, la manera de abordar el estudio de los rayos catódicos no solo es diferente por estar en academias distintas con tradiciones distintas, es porque para Hertz los rayos catódicos son un fenómeno de radiación electromagnética similar a luz y separable de la descarga, mientras que para Thomson es un fenómeno de conducción en gases.

Y es en ese sentido que no es posible que sus resultados sean motivo de existencia de una controversia entre estos dos científicos, los dos analizaban el mismo fenómeno, pero abordaron desde diferente punto de vista, es natural que sus conclusiones estuviesen relacionadas con sus visiones y por lo tanto no puede afirmar que unos resultados corrigieron los otros, o que unos son correctos y la otros no.

La visión de Thomson de los rayos tenía la ventaja de que unificaban ideas de la electroquímica, aplicadas a un instrumento, el tubo catódico que era muy afín a los electricistas y la naciente industria eléctrica, amalgamando estas dos tendencias, además, la visión electroquímica de Thomson, le llevaron en 1904, a proponer a sus corpúsculos como constituyentes de los átomos, ya como electrones propiamente dicho, su modelo atómico servía como explicación al comportamiento de los iones.

Los experimentos de Thomson a la larga fueron aceptados porque unificaba criterios entre los científicos continentales y británicos, la existencia de los fenómenos demostrados por Thomson fue evidencia suficiente para Lorentz y especialmente para Larmor, pero la calidad de los experimentos no fue suficiente para establecer la propia teoría corpuscular de Thomson en oposición a las teorías de los electrones. El poder unificador de la visión electromagnética de la naturaleza concentró la atención en la carga y la masa del electrón, y estas se convirtieron en sus características definitorias. (Falconer, 2001, pág. 80).

El relato de Oliver Lodge tuvo otro aspecto que lo popularizó y es el hecho de fue más conocido por la sociedad de ingenieros eléctricos, gremio que era más numeroso que el de los físicos académicos y que estaba relacionado estrechamente con el desarrollo de las tecnologías con los tubos de descarga, haciendo que el relato de Lodge fuera aceptado con más facilidad y amplia difusión.

El trabajo de Thomson desencadenó otra serie de investigaciones en su propio laboratorio que terminó de consolidar una teoría sobre la estructura de la materia, los trabajos de Rutherford (1871-1937) continuaron el trabajo de Thomson en investigación de la nueva teoría subatómica generando cientos de estudiantes creyentes y divulgadores de su fama que lo proyecta en una posición privilegiada.

Por último hay que identificar otro factor externo al ambiente científico que determinó la forma en que se divulgó los hechos históricos, el estallido de la primera guerra mundial y la pérdida de la guerra por parte de los alemanes tuvo como consecuencia un ambiente de desconfianza y rechazo hacia todo lo proveniente de Alemania, aunque lo narrado aquí ocurrió en el siglo XIX, la publicación y divulgación científica en el siglo XX fue mayoritariamente de casas inglesas y norteamericanas y no desaprovecharon el hecho para implantar su visión de los hechos y exaltar la superioridad científica.

La forma en que se concibió la historia del concepto electrón dejó de lado los trabajos de Hertz encerrándolos bajo el rótulo de experimentos fallidos (Buchwald J. Z., 1995), sin embargo, el trabajo experimental de Hertz aportó en técnicas y equipos que favorecieron su posterior investigación sobre las ondas electromagnéticas que resultó tener implicaciones más profundas en la teoría electromagnética.

El legado de Hertz tampoco puede ser olvidado ni considerado erróneo, su visión de los rayos catódicos como continuos puede ser retomada a la luz de las teorías modernas sobre la dualidad onda partícula, los electrones desde esta visión también presentan comportamiento ondulatorio, resurge entonces la visión de Hertz de los rayos catódicos cómo si se hubiese adelantado a los hechos experimentales mostrados irónicamente por el hijo de Thomson, George Paget Thomson (1892-1975) con su experimento de difracción de electrones; a la luz de la nueva evidencia experimental el concepto electrón hoy en día debe ir más allá de la forma en que lo presentan los libros de texto, una partícula

ya no es suficiente para explicar los resultados de la teoría cuántica, nuevamente las ideas del pasado y que se habían descartado bajo el conceso científico retoman su lugar bajo nuevos puntos de vista.

5. El papel del experimento en la historia del electrón.

¿Existe realmente el electrón?, las respuestas pueden variar según el punto de vista que tengamos de la ciencia, para alguien que ve la ciencia como la colección de leyes, teorías, experimentos y técnicas, es decir, la ciencia como producto del intelecto, el electrón es un hecho y está presente en la naturaleza, y muy poco importa si hay consenso sobre él, pues tarde o temprano la evidencia experimental lo confirmará; para los que ven la ciencia como una actividad social, que se construye por una comunidad, el electrón no es un ente que está en la naturaleza listo para ser descubierto, sino que se llega a él gracias a el consenso de la comunidad científica que logra aglutinar en una idea las explicaciones sobre el comportamiento del mundo.

Estos dos puntos de vista son demasiado extremos y no tienen en cuenta que el mundo de las ideas y el mundo de los hechos está conectado, cada vez que realizamos un experimento se tiene en mente una idea previa de que quiero encontrar, si no fuese así no sabríamos que buscar en los resultados, teorías y experimentos, ideas y hechos son todos interdependientes (Harré, 1986).

Esta distinción de posiciones filosóficas es fundamental porque es claro que el éxito de una teoría depende no de uno, sino de muchos experimentos realizados por muchas personas y la importancia asignada a los diferentes experimentos depende de las diferentes orientaciones filosóficas, además de que un mismo experimento puede significar cosas diferentes en diferentes tradiciones, en este caso es claro que la línea de trabajo de filosofía natural que permite presentar como hipótesis entidades que no se ven, dieron un fruto enorme en la constitución de la muy exitosa física atómica. (Guzmán, 2005)

Aparte de la posición filosófica la existencia del electrón entonces en apariencia recae en el experimento, queda entonces la pregunta de ¿cuál es el papel de los experimentos de Hertz y Thomson en el desarrollo del concepto electrón?, los experimentos con rayos catódicos como los de otra índole involucrados, no se trataron de experimentos realizados para confirmar una teoría, por el contrario son experimentos de diversa índole que van reuniendo evidencia que eventualmente van consolidando una hipótesis de trabajo de la cual se desarrolla una teoría; las leyes y teorías nacen en la mente de los científicos, a través de un proceso intelectual que comienza con los hechos que los experimentos muestran, y son estos hechos quienes orientan a la comunidad científica en la construcción de una hipótesis y que la dotan de credibilidad. (Harré, 1986)

El proceso de construcción de conocimiento es concebido como un tránsito desde el mundo natural de los hechos y las cosas que revelan los experimentos, al mundo ideal de las creencias y teorías humanas, esta forma de ver el papel del experimento es conocida como Inductivista, sin embargo y como lo vimos a lo largo de este trabajo, esta visión de puede ser errónea, pues las teorías deducidas de los experimentos con tubos de descarga van mucho más allá de los resultados que se obtuvieron por Hertz y Thomson, la evidencia experimental proporcionada por ellos no era suficiente para proponer una teoría electrónica, entonces no sólo de los datos surgen las leyes, de no ser así, los resultados distintos entre los experimentos de Hertz y Thomson llevarían a teorías distintas, por otro lado, los datos pueden dar pie para la construcción de múltiples teorías que encajen con los resultados y sobre todo aquí en donde la percepción humana se ve limitada a la sensibilidad de los instrumentos, por ejemplo, antes de los experimentos de Hertz no había duda de que la descarga en el tubo era discontinua, fue Hertz el que mostró por medio de la refinación de los instrumentos que la descarga podría ser considerada continua.

Entonces, ¿qué papel jugó los experimentos de Hertz y Thomson en la construcción del concepto electrón?

En el caso de los experimentos de Hertz aparentemente no existe una conexión directa con la ruta de construcción de concepto, los resultados expuestos allí no dan indicio o pie para proponer la existencia de un ente material que constituya las descargas catódicas, es más, la demostración de que los rayos no reacciona a campos eléctricos sepultó la posibilidad de pensarlos como constituidos por partículas cargadas, recordemos que la visión de Hertz desde un principio separaba la luz catódica de la descarga eléctrica, por lo tanto sus estudios sobre la luz catódica o rayo catódico puro como él lo llamó no podían aportar directamente como evidencia de una teoría electrónica, sin embargo sus experimentos si son fuente de inspiración y debate para otros experimentos como los de Perrin que si buscaban comprobar la existencia de carga en los rayos.

Para entender un poco mejor las cosas utilizaremos la clasificación de los experimentos utilizada por Pierre Duhem donde plantea dos tipos los experimentos: los de prueba y los de aplicación, por un lado, los experimentos de aplicación son aquellos que no pretende reconocer si las teorías aceptadas son o no son correctas, se propone simplemente aplicar estas teorías, para efectuar esto, se usan experimentos que las mismas teorías legitiman, por otro lado, en los experimentos de prueba el científico predice un hecho experimental y creará las condiciones en que este hecho debería producirse, si el hecho experimental no se produce, la proposición que sirvió de base para la predicción es descartada. (Duhem, 1906)

Aplicando estas definiciones podemos afirmar que los experimentos de Hertz y Thomson están en ambas clasificaciones, por ejemplo, cuando Hertz estudia los efectos electrostáticos de los rayos catódicos (sección 2.3) estamos hablando de un experimento

de prueba, porque Hertz aseguraba haber separado el rayo de la descarga y su rayo no debería experimentar reacción alguna a la presencia de campos eléctricos, por lo tanto estaba probando dos de sus hipótesis, una, que el rayo efectivamente se separó de la descarga y dos, que dicho rayo no manifiesta ninguna característica electrostática.

Hertz también tiene experimentos que podríamos clasificarlos como de aplicación, por ejemplo, al construir su caja de descarga (sección 2,2), él aplica la teoría del electromagnetismo expuesta por Maxwell para ejecutar la forma en que traza el camino de la corriente, su caja moviéndose en cercanías de un imán muestra que él conocía los efectos magnéticos de las cargas en movimiento y lo aplicó a su experimento.

En el caso de Thomson tenemos una situación similar, al replicar con ciertas modificaciones el experimento de Perrin, (sección 3.1) estamos hablando de un experimento de prueba, donde con un solo experimento demuestra que los rayos tienen carga y que el rayo y la corriente siguen el mismo camino; también podemos clasificar los experimentos donde encuentra la relación m/e como de aplicación, porque él ya había probado que los rayos el comportamiento de los rayos bajo los efectos eléctricos (sección 3.2) y magnéticos (sección 3.4) y decide aplicar estos efectos combinándolos (sección 3.5.2), Thomson aquí está aplicando no sólo la teoría electromagnética sino que también la termodinámica al medir la energía cinética del rayo a partir de la temperatura del mismo (sección 3.5.1).

Aquí el papel de experimento no se trató de probar una hipótesis aislada, es imposible porque para construir los experimentos fue necesaria la convergencia de varias teorías e hipótesis que rondaban en el momento, por ejemplo, en el caso de Hertz, separar el rayo de la descarga implicó suponer que una malla de metal funcionaría como filtro, las medidas e instrumentos construidos para hacerlas llevan consigo un grupo de teorías y leyes que el experimentalista acepta.

Los experimentos de Hertz y Thomson por sí solos no demostraron o confirmaron la existencia de electrones, además ese nunca fue papel, pero si develaron características de los rayos catódicos que fueron fundamentales para proponer la existencia o no de partículas cargadas en los rayos, Hertz siempre supuso la existencia de las descargas como continuas mostradas por sus instrumentos hasta cierto grado de medida, pero no pensó que hicieran parte del fenómeno lumínico, Thomson en cambio propuso la existencia de corpúsculos que curiosamente asigna cierta naturaleza etérea y que gracias a su visión holística de la física y los factores externos que ya se expusieron ganó su aceptación y evolución a la teoría del electrón.

Conclusiones

La construcción de un concepto en ciencias lleva implícito varias facetas y hechos que muchas veces están ocultos o no tiene conexión, para reconocer estas facetas, es necesario acudir a la historia de las ciencias, porque mediante ella se muestra el carácter dinámico de la física destacando preguntas, métodos y respuestas que los físicos y pensadores se han planteado sobre los fenómenos físicos a lo largo de la historia (Ayala, 2006).

Los hechos analizados desde los escritos originales develan situaciones que fortalecen la discusión y la comprensión de la ciencia, muestran lo intrincado que puede llegar a ser la interpretación de un resultado experimental que no está ligado sólo a los datos, sino que también se condiciona a la visión del científico, el experimento por si sólo y su interpretación no son suficientes, los contextos donde se desarrollan los hechos condicionan fuertemente las implicaciones que tenga un experimento.

Una muestra de lo intrincado que puede llegar a ser la aceptación de un concepto, se puede ver en los experimentos de Hertz, que en un primer análisis basado en sus resultados, no parecen aportar al concepto electrón sin embargo, recordemos que Thomson parte del experimento de Perrin para construir su primer montaje, pero lo que diseñó Perrin básicamente es una reconstrucción del experimento de Hertz, por lo tanto, de cierta forma Thomson estaba replicando a Hertz, y es natural que lo hiciera, pues el argumento más fuerte a favor de la hipótesis de que los rayos son un tipo de onda, es la ausencia de carga en los rayos, entonces, visto de esta manera los experimentos de Hertz son un peldaño en la escalera que llevó a configurar el concepto.

La interpretación de textos históricos también permite conocer al científico, su manera de pensar y la capacidad de sustentar sus ideas, reconocer estos aspectos dan una visión holística de la ciencia, al leer los *Miscellaneous Papers* y los *Philosophical Magazine*, se alcanza a esbozar las maneras distintas de abordar la investigación, para Hertz los resultados adversos a su hipótesis son fuente de inspiración y argumentos durante toda su investigación, utiliza una lógica de contradicción, en donde cada experimento es refutado por él mismo, así los mejora poco a poco hasta que las objeciones se reduzcan o estén dentro de los valores de incertidumbre de medida, en este proceso crea nuevos aparatos para sus demostraciones, mientras que Thomson parte de experimentos que apoyan sus hipótesis, adaptándolos a sus intereses y paso a paso los hace más sofisticados, construye sus demostraciones con los resultados anteriores y de esta manera prueba sus ideas y plantea nuevas.

Los trabajos de Hertz no pueden ser considerados como un error en sus investigaciones, su visión del fenómeno lo llevó a interpretar y a construir sus propios experimentos, lo vemos como error porque su visión de la naturaleza no es la que nos llegó a nosotros, sería un buen ejercicio pedagógico replicar sus experimentos y analizarlos bajo la lupa de las nuevas concepciones de la dualidad onda partícula, si los rayos catódicos están compuestos de electrones y los electrones tienen comportamiento ondulatorio, las ideas de Hertz parecen cobrar sentido.

Analizar las publicaciones originales tiene como consecuencia pensar a fondo en el fenómeno de descarga en los tubos de rayos catódicos, abriendo un panorama sobre las interpretaciones del fenómeno que repercuten sobre lo que uno entiende por concepto electrón, surgen preguntas sobre que realmente está pasando dentro del tubo catódico y cómo es posible que se asocie esa luz con una partícula, estas reflexiones profundas modifican la forma en que se asimila el concepto en un principio, por lo general, cuando se visita el laboratorio en las clases de ciencias ya se tiene de antemano las explicaciones sobre el fenómeno a observar, esta información previa predispone al estudiante y limita su curiosidad sobre el fenómeno, y es aquí donde radica la asimilación superficial de los conceptos, es por lo tanto, pertinente plantearnos la necesidad de introducirnos en el contexto de la época, para formularnos preguntas, y plantear soluciones experimentales.

El papel del experimento no se limita a la validación o refutación de una hipótesis, en sí mismo el experimento construye ciencia, su papel encierra concepciones e ideas propias del experimentador, su alcance no depende solamente de la calidad de los datos arrojados, el desarrollo experimental mostrado por Thomson y Hertz invita a repensar el papel del experimento, ¿Thomson utilizó sus experimentos como probatorios de una hipótesis o como aplicación de una teoría? Realmente sus experimentos tenían de ambos aspectos, en un principio utilizó el experimento para probar su hipótesis, cuando replica a Perrin su intención era anular el resultado de Hertz sobre la no presencia de carga en los rayos, pero fue más allá con su montaje donde mide la relación m/c , allí sus experimentos son de aplicación pues se apoya en la teoría electromagnética para explicar y medir la deflexión del haz.

No existió controversia entre Hertz y Thomson, o entre la escuela alemana y escuela la inglesa sobre la naturaleza de los rayos catódicos, tanto el rastreo de las publicaciones inglesas por la década de los ochentas hechas por Isobel Falconer en su artículo, sobre el descubrimiento del electrón de 2001, como el seguimiento de las investigaciones con tubos de rayos catódicos indagados en este escrito mostraron el poco interés de los ingleses en el tema, las publicaciones e investigaciones con los tubos que sobresalen en la época son casi que por completo alemanas, sin embargo, muchas de ellas cayeron en el olvido por múltiples factores ajenos a la ciencia, como por ejemplo, el cambio en la perspectiva que se le dio a la cultura alemana luego de la primera guerra mundial.

Llamar a Thomson como el “descubridor” del electrón es una forma equívoca en que se reconstruye la historia de la ciencia, no podemos hablar de descubrimiento porque el concepto en sí es muy complejo, descubrir lleva implícito la ubicación de un lugar, un objeto, y unos tiempos y protagonistas determinados, que en el caso del electrón no es posible identificarlos, el concepto nace en diferentes lugares y bajo diferentes puntos de vista, evoluciona a medida que las técnicas experimentales evolucionan y arrojan nuevas evidencias, se transforma bajo la luz de nuevas teorías y se consolida bajo el consenso científico.

No existe un experimento crucial que determinara la existencia de los electrones, la versión de los libros de texto donde señalan los experimentos de Thomson como los cruciales para la conformación del concepto es demasiado simple e incurre en imprecisiones, la construcción de concepto electrón tardó varios años y múltiples experimentos, con los trabajos de Thomson el debate no concluyó, fue necesario factores externos como la campaña propagandística de Oliver Lodge que no dudó en asociar los corpúsculos de Thomson con la idea de electrones de Stoney, sin tener en cuenta que para Thomson no significaban lo mismo.

Se espera que este estudio promueva reflexiones en los maestros de ciencias, de tal forma que repercuta en la visión que tienen sobre la ciencia y en la forma en que se desarrolla, para que los motive a construir elementos didácticos que enriquezcan las actividades en el aula.

Referencias

- Ayala, M. M. (2006). Los análisis histórico-críticos y la contextualización de saberes científico. Construyendo un nuevo espacio de posibilidades. *Pro-Posições*, 19-38.
- Berkson, W. (1974). *Las teorías de los campos de fuerza, desde Faray hasta Einstein*. Madrid: Alianza editorial.
- Buchwald, J. (1985). *From Maxwell to microphysics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Buchwald, J. Z. (1995). *Scientific Practice: Theories and Stories of Doing Physics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cathode ray tube. (2021). <https://www.crtsite.com>.
- Crookes, W. (1880). On Radiant Matter. *The Polular Sciencie Monthly*, 13-24.
- Dahl, P. F. (1997). *FLash of the cathode rays, A History of J J Thomson's Electron*. Philadelphia : IOP Publishing Ltd .
- Duhem, P. (1906). *La théorie physique: son object et son structure*. Paris.
- Falconer, I. (1987). Corpuscles, Electron and cathode rays: JJ Thomson and the "discovery of electron". *The British Journal for the History of Science*.
- Falconer, I. (2001). *corpuscles to electrons, histories of the electrón*. Cambridge: Mit press.
- Ganot, a., & Atkinstone, E. (1887). *Elementary treatise on physics: experimental and applied, for use of colleges and schools*. New York: Wood and co.
- Guzmán, R. (2005). ¿Exiten los elelctrones? *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia*, vol. VI, 143 154.
- Harré, R. (1986). *Grandes experimentos científicos*. Labor SA.
- Hertz, H. R. (1886). *Miscellaneous Papers*. (D. E. Jones, & G. A. Schott, Trads.) London: Macmillan and Co .

- Lodge, O. (1907). *Electrons or the nature and properties of negative electricity*. London: George Bell and Sons.
- Lodge, O., & Rayleigh, L. (1908). The Ether (Aether) of Space. *The Royal Institution Library of Science (Friday Evening Discourses in Physical Sciences)* (pág. 5). London: The Royal Institution Library of Science.
- Segrè, E. (1980). *From x-rays to Quarks*. New York: Dover publications Inc.
- Talavera, L., & Farías, M. (1995). *El vacío y sus aplicaciones*. Mexico: Fondo de cultura económica.
- Thomson, J. J. (1913). Rays of Positive Electricity. *Proceedings of the Royal Society*, 1-23.
- Thomson, J. J. (1897). Cathode rays. *Philosophical Magazine series 5 vol 44*, 293-316.
- Volker, D., & Manz, F. (1978). *Televionen*. VGS.
- Weinberg, S. (1985). *Partículas Subatómicas*. (A. G. Sánchez, Trad.) New York: Scientific American Books.
- Whittaker, E. (1910). *A history of the theories of aether and electricity*. London: Thomas Nelson & Sons Ltd.