



LOS PRIMEROS ACELERADORES

R. O. Barrachina

1 J. J. Thomson

Uno de los primeros en estudiar los nuevos fenómenos de radiación catódica, canal y X fué Joseph John Thomson (1856 - 1940). Nacido cerca de Manchester en Inglaterra, hijo de un editor y vendedor de libros, Thomson comenzó estudiando ingeniería, pero pronto volcó sus intereses hacia la matemática y la física. A partir de los 19 años, y con ayuda de una beca, estudió en el Trinity College de Cambridge. Una vez recibido ingresó al Laboratorio Cavendish bajo las órdenes de Lord Rayleigh, quien sucedía a Maxwell como director de dicho Instituto. En 1886 comenzó a hacer sus primeros estudios sobre descargas en gases.

En 1894, con sólo 28 años de edad, Thomson fué nombrado director del Laboratorio Cavendish, cargo en el que permaneció por 25 años. En 1906 recibió el Premio Nobel de Física. Pero tal vez un hecho que destaca aún más su envergadura científica es que ocho de sus alumnos también recibieron el Premio Nobel, entre ellos su propio hijo, G. P. Thomson. En 1918 fué nombrado director del Trinity College, cargo que mantuvo hasta su muerte

en 1940, a los 84 años de edad.

Thomson atacó el problema de los rayos catódicos repitiendo una versión modificada de un experimento realizado dos años antes por el físico francés Perrin. Un electroscope conectado a una *copa de Faraday* sobre un lado del tubo de rayos catódicos, no registraba nada al producir la descarga. Sólo cuando el haz de rayos catódicos era desviado magnéticamente hacia la copa de Faraday, se observaba una carga negativa. Los experimentos sobre desviación magnética de los rayos catódicos realizados por Crookes habían aportado una evidencia *indirecta* de que estos rayos transportaban una carga negativa, ahora se lograba una completa confirmación de este hecho¹. En las propias palabras de Thomson este experimento demostraba que

“no importa como doblemos y desviemos los rayos catódicos por medio de fuerzas magnéticas, la carga negativa sigue la misma trayectoria que los rayos y esta carga negativa está indisolublemente relacionada con los rayos catódicos”.



2 Descubrimiento del electrón

Pero si los rayos catódicos transportaban carga, ¿porqué no eran desviados por campos electrostáticos?. Repitiendo el experimento de Hertz, Thomson obtuvo exactamente el mismo resultado. Sin embargo, después se le ocurrió una idea que ahora puede parecer obvia, pero que evidentemente no lo era en aquel momento. Thomson relacionó este hecho, aparentemente contradictorio, con la observación realizada por Roentgen y él mismo, de que los rayos X hacían conductor al aire. Y en efecto, repitiendo el experimento de Hertz con vacíos muy altos, logró demostrar que los rayos catódicos podían desviarse con fuerzas electrostáticas.

Y aquí es donde el genio de Thomson vió en este experimento, no sólo una clara evidencia de que los rayos catódicos eran “cargas de electricidad llevadas por partículas de materia”, sino la posibilidad de responder una pregunta aún más fundamental:

“¿Qué son estas partículas?. ¿Son átomos o moléculas, o materia en un estado de subdivisión aún más fino?. Para arrojar luz sobre este punto, he hecho una serie de medidas de la razón de la masa de estas partículas a la carga transportada por ellas”.

Midiendo la desviación de un haz de rayos catódicos al pasar entre las placas de un condensador y aplicando luego un campo magnético B que exactamente se opusiera a este campo electrostático E , Thomson pudo medir la velocidad v de las partículas del haz, así como su razón de carga y masa q/m . Un poco de álgebra permite demostrar que $v = E/B$ y $q/m = (E/B^2d) \tan(\theta)$, donde d es el largo del condensador y θ es el ángulo de desviación del haz en ausencia de campo magnético. De esta manera, Thomson obtuvo valores de la relación carga/masa entre 0.67 y 0.9×10^{11} coulomb/kg y una velocidad en el orden de la decena de la velocidad de la luz².

Este resultado, no sólo zanjaba la controversia sobre la naturaleza corpuscular de los rayos catódicos, sino que traía a la luz un nuevo ente físico, el *electrón*, con una relación carga/masa tres órdenes de magnitud mayor que la de los iones en procesos de electrólisis. Y como Lenard había demostrado

que los rayos catódicos podían penetrar en un gas hasta distancias inconcebiblemente grandes para haces de moléculas, Thomson no dudó en atribuir el valor grande de q/m a la masa. De esta manera, los rayos catódicos resultaban estar formados por partículas *subatómicas* con una masa tres órdenes de magnitud menor que la del átomo de Hidrógeno.

Simultáneamente con la publicación del trabajo de Thomson, Pieter Zeeman (1865 - 1943) de la Universidad de Leiden había observado el desdoblamiento de las líneas D del espectro del sodio en presencia de campos magnéticos. Elaborando este resultado, H. A. Lorentz (1853 - 1928) desarrolló una teoría que relacionaba la magnitud de dicho efecto con la razón carga/masa de las cargas en movimiento en los átomos de Sodio. Y el valor calculado coincidía con el obtenido por Thomson para los rayos catódicos. Esto demostraba que los electrones no sólo se encontraban en estado libre en los rayos catódicos, sino en la misma estructura de los átomos.

3 Haces de iones

Esta identificación de los rayos catódicos como partículas subatómicas cargadas negativamente, implicaba que, al separarse de átomos inicialmente neutros, dejaban a estos cargados positivamente, es decir que creaban un ión positivo. La conclusión era obvia: Los rayos canales observados por Goldstein una década antes, debían estar formados por estos iones residuales. Wilhelm Wien fué el primero en advertir esta posibilidad:

“Después de que se demostró que la carga de los rayos catódicos era negativa, tuve la idea de que los rayos canales observados por Goldstein, los cuales no pueden ser desviados apreciablemente por imanes ordinarios y que avanzan en sentido inverso a través de un cátodo perforado, podrían llevar carga positiva.”

Wien supuso que el fracaso de Goldstein por desviar los rayos canales se podría haber debido a no haber utilizado campos eléctricos y magnéticos suficientemente intensos. Así que el decidió repetir el mismo experimento pero usando los máximos campos disponibles en aquella época. Así que, elevando el campo magnético cuatro órdenes de magnitud por encima del usado por



Thomson, y aplicando la misma técnica que para los rayos catódicos, pudo demostrar que -en efecto- los rayos canales estaban formados por partículas cargadas positivamente. Sin embargo, no constituían una única especie, sino una mezcla con velocidades en el rango de la milésima de la velocidad de la luz, y con relaciones carga/masa en el rango atómico.

Combinando este resultado con los anteriores referidos a los rayos catódicos y al efecto Zeeman, quedó inmediatamente claro que los rayos canales eran iones positivos producidos por la ionización del gas residual en la cámara de descarga por acción de los rayos catódicos y, eventualmente, los rayos X.

El concepto de ión no era nuevo. De hecho este término había sido introducido por Faraday en 1839 para designar a los portadores de carga eléctrica en líquidos y gases. Pero ahora, por primera vez, las partículas atómicas y moleculares resultaban accesibles a la investigación física directa. Wien estaba dando nacimiento a la física de colisiones. Esto resulta evidente al leer el siguiente fragmento de su trabajo.

“La mayor masa de las partículas individuales no es la única diferencia en comparación con los rayos catódicos. A diferencia de lo que ocurre con los rayos catódicos, si uno aplica sobre los rayos canales un campo magnético, ellos no sufren una desviación uniforme como un único rayo, sino que se separan en un rango de diferentes direcciones. Además, una parte del haz no es deflectada. Si esta porción del haz es sujeta a un segundo campo magnético, nuevamente se observan las mismas desviaciones que con el primer campo magnético. Estas observaciones sólo pueden entenderse si se supone que los rayos canales se componen de átomos cargados y sin carga, que en su camino se cargan y descargan alternativamente. *El intercambio de carga, que es causado por colisiones del átomo en movimiento con moléculas del gas, cambia el estado de carga de la partícula pero no afecta su velocidad significativamente.* Si un átomo en vuelo pierde un electrón durante una colisión, continúa su movimiento como un ión positivo; si un ión positivo captura un electrón, continúa su

camino sin carga neta, si un átomo neutro captura un electrón, se transforma en un ión negativo. A medida que la presión del gas se reduce, el número de colisiones disminuye, y el átomo retiene su estado de carga por más tiempo. La distancia media que recorre sin cambiar su estado de carga se denomina camino libre medio. Es diferente para átomos neutros y cargados positivamente. Los primeros pueden recorrer una distancia más larga antes de cargarse nuevamente.”

4 Wilhelm Wien

Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien nació en 1864, único hijo de un agricultor del este de Prusia. Estudió primero en Göttingen y luego en Berlín bajo la dirección de Helmholtz. Allí escribió su tesis doctoral sobre la difracción de la luz. Helmholtz, quien estaba por convertirse en el primer presidente de la recientemente creada *Physikalisch - Technische Reichsanstalt*, aconsejó al joven Wien que volviera a la finca de su padre, abandonando la Física ó, al menos, tomándola sólo como un pasatiempo. Por muchos años, Wien estuvo luchando interiormente entre sus “deberes de hijo” y su pasión por la física. Por suerte, la finca fué vendida y él pudo regresar a Berlín. Después de pasar pequeños períodos en Aachen y Giessen durante 1896, se radicó en Würzburg en 1890 donde reemplazó a Röntgen quien se había trasladado a Munich. Cuando en 1920 Röntgen se retiró, Wien tomó su posición en Munich. Aún cuando su identificación de los rayos canales representa un descubrimiento de la máxima importancia, en la actualidad Wien es mejor conocido por sus trabajos sobre la radiación del cuerpo negro (1893), por los cuales recibió el premio Nobel en 1911.

Persona de una gran cultura, con amplios intereses en humanidades, tecnología y política, Wien representó mejor que ningún otro científico el ideal de su época, con todas sus virtudes y defectos, y con una reconocida carga de chauvinismo nacionalista, característica de la Europa de principios de siglo.



5 Los primeros “aceleradores” de partículas

El descubrimiento e identificación de los rayos catódicos condujo rápidamente a la producción de haces de electrones para experimentos de colisiones atómicas. En cambio, aún cuando en una serie de experimentos realizados por Thomson entre 1907 y 1910 se habían identificado haces de diferentes elementos (H^+ , H_2^+ , He^+ , O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+), el camino hacia la producción de haces estables de iones no fue tan directo. Wien había sugerido la posibilidad de post-acelerar rayos canales en un buen vacío para obtener haces de iones más energéticos. Sin embargo, por un motivo que discutiremos en la siguiente sección, durante muchos años no hubo un verdadero incentivo para avanzar en el diseño de aceleradores de alta tensión. Hubo que esperar hasta fines de la década del veinte para que se desarrollara una carrera por la producción de haces de iones energéticos. Uno de los primeros esfuerzos, y -sin duda- uno de los más extravagantes, fue realizado por un grupo de físicos jóvenes, A. Brasch, F. Lange and Curt Urban, apadrinados por Walter Nernst. Con el objetivo de “capturar” la electricidad de las tormentas, se tendió un cable entre dos cumbres vecinas del Monte Generoso en los Alpes Suizos cerca de Lugano. La instalación estaba casi completa al finalizar la temporada de tormentas en el verano de 1927. Aún así, los físicos de la Universidad de Berlín pudieron aprovechar una última tormenta donde observaron descargas de más de 1.7 MeV a un ritmo de una por segundo, alcanzando tensiones del orden de 15 MeV. Sin embargo, en dicha oportunidad no operaron ningún tubo de descarga. El proyecto fue definitivamente cancelado en Agosto de 1928 cuando uno de los miembros del equipo, Curt Urban de sólo 24 años de edad, se mató al caer por una pendiente mientras trabajaba en la antena.

Hubo otros intentos, aunque no tan “aventureros”, para producir las tensiones estables necesarias para acelerar iones, pero ninguno de ellos logró el éxito hasta la invención del generador Cockcroft - Walton en 1932. En una primera experiencia desarrollada en el Laboratorio Cavendish J. D. Cockcroft y E. T. S. Walton lograron desintegrar núcleos de Litio con protones acelerados a 500 keV. Casi simultáneamente, R. J. van de Graaff diseñaba el primer generador electrostático, y E. O. Lawrence y M. S. Livingston

construían el primer ciclotrón en Berkeley, logrando acelerar protones a 1.2 MeV.

Finalmente, estos avances tecnológicos abrían la posibilidad de realizar toda una gama de experimentos de colisiones atómicas a altas energías. Sin embargo, paradójicamente, estos logros coincidieron con el descubrimiento del neutrón en 1932, provocando un vuelco masivo de interés hacia la física nuclear. Habría que esperar hasta la década del 60, para que una nueva camada de físicos “recuperara” los aceleradores de haces iónicos para las colisiones atómicas.

A pesar de todo, tal como veremos en el siguiente capítulo, la física de colisiones atómicas se había desarrollado vigorosamente, mucho antes de la aparición de los primeros aceleradores, obteniendo haces estables de iones de Helio de una fuente bastante conspicua: Los rayos Becquerel.

Preguntas y ejercicios

1. En un tubo de rayos catódicos como el diseñado por J. J. Thomson, observamos que el haz se desvía un cierto ángulo θ cuando aplicamos una tensión a las placas del condensador. Ahora utilizamos dos bobinas para generar un campo magnético B que cancele exactamente la acción de ese campo eléctrico E . Demostrar que a) la velocidad de las partículas del haz es igual a $v = E/B$, y b) la razón de carga y masa es $q/m = (E/B^2d) \tan \theta$, donde d es el largo del condensador.
2. Investigar y describir brevemente las características de funcionamiento de los aceleradores Cockcroft-Walton, van de Graaff y ciclotrón.

Notas

¹J.J.Thomson: *Philosophical Magazine* **44**, 5 (1897)

²Mediciones posteriores más precisas realizadas por Robert A. Millikan (1868 - 1953) una década después establecieron una relación carga/masa dos veces mayor, igual a $q/m \approx 1.76 \times 10^{11}$ C/kg.

