

# Generaciones cuánticas

UNA HISTORIA DE LA FÍSICA EN EL SIGLO XX

HELGE KRAGH

*Traducción*

Daniel Duque Campayo  
Ana Granados Sanandrés  
Manuel Sangüesa Lazcano

*Revisión científica de*  
José Alberto Pérez Díez

-akal-

# Índice

## Prólogo vii

*Primera parte: de la consolidación a la revolución*

- |   |     |
|---|-----|
| 1 Física finisecular: un modelo cambiante del mundo | 3   |
| 2 El mundo de la física                             | 13  |
| 3 Descargas en gases y lo que siguió                | 27  |
| 4 Arquitectura atómica                              | 44  |
| 5 La lenta ascensión de la teoría cuántica          | 58  |
| 6 Física a bajas temperaturas                       | 73  |
| 7 La relatividad de Einstein y de otros             | 86  |
| 8 Una revolución fallida                            | 103 |
| 9 La física en la industria y en la guerra          | 118 |

*Segunda parte: de la revolución a la consolidación*

- |  |     |
|--|-----|
| 10 Ciencia y política en la República de Weimar      | 135 |
| 11 Saltos cuánticos                                  | 150 |
| 12 El surgimiento de la física nuclear               | 168 |
| 13 De dos partículas a muchas antipartículas         | 184 |
| 14 Implicaciones filosóficas de la mecánica cuántica | 199 |
| 15 El sueño de Eddington y otras heterodoxias        | 211 |
| 16 La física y las nuevas dictaduras                 | 222 |
| 17 Fuga y ganancia de cerebros                       | 237 |
| 18 Del enigma del uranio a Hiroshima                 | 249 |

*Tercera parte: progreso y problemas*

- 19** Temas nucleares 269
- 20** Militarización y megatendencias 285
- 21** Descubrimientos de partículas 302
- 22** Teorías fundamentales 322
- 23** La cosmología y el renacimiento de la relatividad 339
- 24** Elementos de la física del estado sólido 356
- 25** Física de ingeniería y electrónica cuántica 371
- 26** La ciencia atacada, ¿la física en crisis? 384
- 27** Unificaciones y especulaciones 399

*Cuarta parte: una mirada atrás*

- 28** La física Nobel 417
- 29** Un siglo de física en retrospectiva 431

Apéndice. Lecturas recomendadas 443

Bibliografía 453

nes en 1920; en 1926 los gastos fueron 16,6 millones y en 1930 la cifra se incrementó a 31,7 millones. (A pesar de que las cifras sean tan altas, son sólo un preludio al desarrollo aun más explosivo que ocurrió después de 1945. En 1981, poco después de que AT&T fuera sentenciada a descomponerse en varias compañías menores e independientes, el número de empleados de Bell Laboratories era de 24.078, de los cuales 3.328 tenían grado de doctor. En ese año, AT&T proporcionó a Bell Laboratories no menos de 1.630 millones de dólares.

Aunque AT&T era excepcional, era sólo una de un número creciente de compañías estadounidenses que empleaban a científicos. En 1931, más de 1.600 compañías informaron al Consejo de Investigación Nacional sobre laboratorios que empleaban casi 33.000 personas. Nueve años después, más de 2.000 empresas tenían laboratorios de investigación, que empleaban a un total de unas 70.000 personas.

Las industrias europeas siguieron la tendencia estadounidense, pero no al mismo ritmo e intensidad. Los relativamente escasos físicos de laboratorios industriales en Europa no contribuyeron mucho a la literatura de física pura. La compañía electromecánica más grande de Europa, la compañía Siemens en Alemania, reconocía el valor de la investigación científica aplicada pero no tenía un departamento central de investigación comparable a los de sus rivales estadounidenses. Sólo en 1920 se formó tal departamento, bajo el físico Hans Gerdien, formado en Gotinga. El nuevo laboratorio de investigación publicaba su propia revista, titulada *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*, similar en miras y contenido al *The Bell System Technical Journal*. Sin embargo, la revista de Siemens no tuvo la misma importancia científica que su contraparte estadounidense. Consideraremos a continuación dos importantes casos de física aplicada, los dos relacionados con aspectos de la electrónica.

## **Electrones trabajando, I: la telefonía a larga distancia**

El teléfono de Alexander Graham Bell no fue un producto de la ciencia. Durante las primeras dos décadas de la telefonía, el nuevo sistema de telecomunicaciones se desarrolló de manera empírica, guiado (muchas veces, erróneamente) sólo por la teoría telegráfica que William Thomson había introducido en 1855. Cuando resultó que era difícil conseguir una buena comunicación de voz a distancias de más de unos pocos cientos de kilómetros, los ingenieros sugirieron reducir la resistencia y capacidad del sistema de línea. La autoinductancia se consideraba generalmente de una cantidad dañina, que se podía reducir pasando de hilos de hierro a hilos de cobre; sin embargo, estos métodos para extender la distancia para hablar tuvieron un efecto bastante limitado y sobre 1895 quedó cada vez más claro que los métodos empíricos de los ingenieros telegráficos nunca producirían telefonía de calidad a largas distancias. Era el momento de aplicar procedimientos más científicos basados en la física.

De hecho, estos procedimientos se habían aplicado ya en 1887, cuando Aimé Vaschy en Francia y Oliver Heaviside en Inglaterra analizaron teóricamente la transmisión de corrientes telefónicas a partir la teoría eléctrica fundamental. Obtuvieron fórmulas

para la variación de la atenuación y distorsión con los parámetros eléctricos de la línea y concluyeron que la autoinductancia era beneficiosa: cuanto más hubiera en una línea, mejor. Los trabajos de Vaschy y Heaviside no se materializaron en métodos prácticos sino hasta mucho después y, en Inglaterra, las recomendaciones de base científica de Heaviside encontraron la resistencia de ingenieros pertenecientes al poderoso Servicio de Correos. Fue en Estados Unidos y, en una escala menor en Dinamarca, donde la teoría de Vaschy-Heaviside se transformó en tecnología práctica por primera vez.

No se daba alta prioridad a la investigación científica en los primeros años de la Bell Telephone Company, pero Hammond Hayes, un físico formado en la universidad que era empleado de Bell, urgió a que la compañía pusiera más énfasis en la investigación. En 1897 contrató a George Campbell para que desarrollara el tipo de cables de alta inductancia que había sugerido Heaviside. En su enfoque y formación, Campbell era distinto de los ingenieros y técnicos que trabajaban entonces en telegrafía y telefonía, y esta diferencia fue de crucial importancia para su éxito. Campbell tenía una fuerte formación en física teórica, obtenida en el MIT, Harvard y tres años en Europa, donde estudió con eminentes como Poincaré, Boltzmann y Felix Klein. Totalmente familiarizado con los trabajos de Vaschy y Heaviside, Campbell utilizó sus habilidades matemáticas para desarrollar una teoría de cables (o antenas) «cargadas» con bobinas de inducción espaciadas discretamente. El resultado, completado en el verano de 1899, fue un análisis matemático de la línea cargada de bobinas, que predecía dónde colocar las bobinas en el circuito, cuánto cargarlas, y la distribución de cobre más eficaz entre el cable y las bobinas. Campbell se dio cuenta de que la solución tecnológica no podía obtenerse mediante métodos empíricos y que sería interesante para la compañía atacar el problema a través de la física teórica. Como escribió en un memorando de 1899, «por economía, hay que avanzar la teoría lo más posible y dejar lo menos posible a métodos de ensayo y error» (Kragh 1994, p. 155). La innovación de Campbell tenía un objetivo práctico, pero no era por ello menos científica. Publicó su teoría de cargas en 1903, no en una revista de ingeniería, sino en la distinguida revista de física *Philosophical Magazine*.

Michael Pupin, un profesor de ingeniería eléctrica de la Universidad de Columbia nacido en Serbia, obtuvo a la vez, e independientemente, resultados muy similares a los de Campbell. Como Campbell, Pupin tenía una fuerte formación en física teórica (había estudiado bajo Kirchhoff y Helmholtz) y no confiaba en los métodos de ensayo y error que todavía dominaban gran parte de la profesión ingenieril. Poseía la ventaja frente a Campbell de que era un investigador de universidad libre, no un hombre de empresa y, por esta razón, entre otras, consiguió en 1900 obtener una patente para su sistema de carga de bobinas (o «pupinización», como se conocería). Tras una larga disputa legal, AT&T compró los derechos para explotar la patente y la patente alemana de Pupin fue similarmente comprada por Siemens y Halske.

La primera línea cargada con bobinas se construyó en 1901; a lo largo de la siguiente década el sistema de carga se convirtió en el esqueleto de un gran número de líneas de larga distancia, tanto en América como en Europa. La innovación basada en el trabajo de Campbell y Pupin fue un gran éxito comercial y una gran propaganda

para la utilidad de la física teórica. A finales de 1907, el grupo de compañías Bell Telephone había equipado 138.000 km de circuito de cable con unas 60.000 bobinas de carga. Cuatro años más tarde, cuando el número de bobinas se había incrementado a 130.000, la compañía estimó que había ahorrado unos 100 millones de dólares con la invención de circuitos cargados de inducción. Al igual que los físicos y químicos desempeñaron un papel protagonista en la invención y desarrollo del sistema de carga en Estados Unidos, también lo hicieron en Europa, donde las compañías alemanas eran las líderes del campo. La primera línea telefónica europea equipada con bobinas Pupin la construyeron Siemens y Halske en 1902, basándose en experimentos de August Ebeling y Friedrich Dolezalek. Sus carreras indican los crecientes contactos entre físicos de la industria y académicos: Ebeling había estudiado con Helmholtz, trabajado con Werner von Siemens y pasado cinco años en el Physikalisch-Technische Reichsanstalt hasta que se convirtió en un ingeniero principal en Siemens y Halske; Dolezalek había estudiado con Nernst y, tras un periodo con Siemens y Halske, volvió al mundo académico para sustituir a su antiguo profesor como director del instituto de química física en la Universidad de Gotinga.

En el caso de Alemania y la mayoría de los otros países europeos, había otro factor importante que faltaba en la escena estadounidense: instituciones gubernamentales. La tecnología de telecomunicaciones alemana estaba apoyada por el Reichpost, que tenía su propio equipo de investigadores cualificados. Su Departamento Imperial de Pruebas Telegráficas, fundado en 1888, incluía a Franz Breisig, un antiguo estudiante de Heinrich Hertz y posiblemente el principal experto europeo en teoría de comunicaciones eléctricas.

La pupinización, o carga de bobinas, era el método más importante de extender la distancia de la telefonía, pero no era el único. Para cables, y especialmente para cables submarinos, la alternativa era enrollar densamente los alambres de cobre con hierro blando. La idea de la carga continua se remontaba a Heaviside, pero hicieron falta quince años hasta que se implementó como tecnología práctica. Esto fue llevado a cabo por un ingeniero danés, Carl E. Krarup, que diseñó el primer cable submarino cargado, que se tendió entre Dinamarca y Suecia en 1902. Krarup, que había sido estudiante de investigación bajo Wilhelm Wien en la Universidad de Würzburg, pertenecía a la nueva generación de ingenieros con formación científica. Los cables continuos del tipo de Krarup se utilizaron extensivamente durante tres décadas, por ejemplo, en 1921 en el cable de Cayo Oeste a La Habana, de 190 km.

Con el éxito del método de carga, se hizo importante diseñar las bobinas Pupin lo más eficazmente posible, es decir, con una máxima permeabilidad magnética y una mínima pérdida de energía debida a corrientes de Foucault secundarias. La ciencia de los materiales empezó a ser de crucial importancia para las empresas telefónicas. Ya en 1902, Dolezalek había obtenido una patente para un núcleo de inducción compuesto de un polvo de hierro finamente mezclado con una sustancia aglutinadora aislante, pero la idea se transformó en una innovación tan sólo una década después. En 1911, AT&T había organizado una rama dentro de su departamento de Ingeniería en Wes-

tern Electric con el propósito de aplicar la ciencia básica a problemas de telefonía de manera sistemática. Uno de los primeros frutos del nuevo programa de investigación fue la invención en 1916 de un núcleo de polvo de hierro. Éstos se empezaron a producir con fines comerciales rápidamente en las plantas de fabricación de Western Electric en Hawthorne, Illinois, que en 1921 alcanzaría una producción semanal de 25.000 libras de polvo de hierro. Al mismo tiempo, los investigadores de Western Electric trabajaban para encontrar un sustituto del hierro con propiedades magnéticas superiores como material de carga. Gustaf Elmen, nacido en Suecia, desarrolló un método de calentar y enfriar aleaciones de níquel y hierro de tal manera que sus permeabilidades fueran elevadas y su pérdida por histéresis baja; el resultado fue la «permaleación» que consistía en aproximadamente 20 por 100 hierro y 80 por 100 níquel. En los 20 esta aleación reemplazó al hierro en los núcleos Pupin y, sobre 1930, las compañías AT&T producían más de un millón de núcleos de bobinas de permaleación por año.

De una importancia similar fue la aplicación de la permaleación como material de carga para telegrafía transatlántica. En Western Electric se desarrolló una teoría fiable para este propósito, principalmente por Oliver Buckley, un físico educado en Cornell que se había incorporado a la compañía en 1914 para trabajar con válvulas de vacío y materiales magnéticos. Tras mucho trabajo teórico y experimental, se obtuvo una teoría realista que podía guiar la construcción de cables telegráficos cargados de alta velocidad. Cuando en 1924 se probó el cable de 3.730 km entre Nueva York y las Azores, operado por la Western Union Telegraph Company y manufacturado por una compañía británica de cables, cumplió todas las expectativas. La velocidad operativa de 1.920 letras por minuto era de cuatro veces superior al récord de los cables convencionales de tipo Kelvin. La increíble velocidad superó la capacidad de los equipos terminales existentes e hizo necesaria la construcción de grabadoras de alta velocidad para estar a su altura. El éxito de éste y otros cables cargados con permaleación revitalizó la telegrafía transoceánica y demostró, una vez más, el valor práctico y económico de la investigación física. En 1924, reflexionando sobre su larga trayectoria como investigador en el sistema Bell, Campbell concluía que «la electricidad es ahora sobre todo un campo para las matemáticas, y todos los avances en él se logran principalmente mediante las matemáticas».

## **Electrones trabajando, II: válvulas de vacío**

El tubo de electrones (o tubo de radio, o válvula) es una de las más importantes invenciones del siglo xx. Su historia se remonta a 1880, cuando Edison se dio cuenta de que si una plancha se derretía en una de sus bombillas lumínicas recién inventadas, una pequeña corriente fluía desde el filamento a la plancha. El efecto Edison atrajo el interés de ingenieros eléctricos. Uno de ellos, el inglés John Ambrose Fleming, demostró en 1889 que las partículas emitidas por el filamento tenían carga negativa. Una década después, se llegó a la conclusión de que estas partículas eran electrones. En 1904, Fleming, entonces profesor de ingeniería eléctrica en el University College de Londres