

Fermi, Heisenberg y Lawrence

Francisco J. Ynduráin

Arbor CLXXI, 673 (Enero), 75-86 pp.

Los azares de las onomásticas hacen coincidir en este año el centenario del nacimiento de tres de los más grandes físicos del siglo XX. Dos de ellos, Fermi y Heisenberg, dejaron una marca fundamental en la ciencia (ambos, pero sobre todo el segundo) y, el primero, también en la tecnología. Lawrence, indudablemente de un nivel inferior al de los otros dos, estuvo sin embargo en el origen de uno de los desarrollos tecnológicos que han sido básicos para la exploración del universo subnuclear en la segunda mitad del siglo que ha terminado hace poco, el de los aceleradores de partículas.

Lawrence

Ernest Orlando Lawrence nació en la ciudad de Canton (Dakota del Sur, EE UU) el 8 de agosto, 1901. Comenzó su carrera científica como Profesor Asistente de Física en la Universidad de Yale (1927-1928) para incorporarse seguidamente a la Universidad de California en Berkeley, donde continuó hasta su fallecimiento, en 1958. La actividad científica de Lawrence está asociada, sobre todo, con la construcción y el desarrollo de los primeros aceleradores de partículas del tipo conocido como ciclotrón y sincrotrón, o sincro-ciclotrón.

En el primer cuarto del siglo XX se sintió la necesidad de acelerar partículas, con el objetivo principal de poderlas utilizar como proyectiles con los que penetrar en el interior de los núcleos atómicos y llegar así a estudiar su estructura. Los métodos utilizados hasta entonces (partículas alfa provenientes de desintegraciones radiactivas, o rayos cósmicos) eran limitados y erráticos.

Los primeros aceleradores que se construyeron fueron los de Cockroft y Walton en Cambridge, Gran Bretaña y el de van der Graaff en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), operativos a partir de 1933 y capaces de energías de unos pocos millones de electrón-voltios. Tanto unos como otros eran, realmente, desarrollos del tubo de rayos catódicos: por medio de campos eléctricos estáticos se aceleraban partículas con carga eléctrica, tal como electrones o protones.

Sin embargo, este método tenía como limitación obvia la de los campos eléctricos que podían crearse; y solo se dio un avance substancial con el desarrollo, en la segunda mitad del siglo, de los ciclotrones o sincrotrones. Los conceptos involucrados en la concepción de estos tipos de aceleradores fueron primeramente discutidos por el noruego Rolf Wideröe entre 1923 y 1925; aunque los diseños y construcción efectivos se deben a Lawrence, que publicó la teoría de estos artefactos en 1930 y, después de un primer fracaso, construyó (en colaboración con su doctorando Stanley Livingstone) el primer ciclotrón operativo dos años después. En este primitivo acelerador se conseguían energías de trece mil electron-voltios. La experiencia adquirida sirvió a Lawrence para construir un segundo ciclotrón que aceleraba protones a la entonces fantástica energía de 1,2 millones de electron-voltios. En la actualidad, el acelerador más potente, el Tevatron, situado en el laboratorio Fermilab, cerca de Chicago, consigue energías de un billón (español; un millón de millones) de electron-voltios; pero los principios de su funcionamiento no han cambiado mucho de los sentados por Wideröe y Lawrence.

En estos aceleradores se hace seguir a las partículas, por medio de campos magnéticos, una trayectoria circular, de donde el nombre ciclotrón (aunque en el primer diseño de Lawrence la trayectoria era de hecho helicoidal); dándoles a estas partículas, de forma sincronizada con su paso por puntos fijos de la trayectoria (de donde el nombre sincrotrón), un impulso por medio de campos eléctricos. Podemos decir que la forma de estas máquinas es la de un neumático, en cuyo interior se hace el vacío, y por donde circulan las partículas, dando más y más vueltas y recibiendo, a cada giro, la energía de los campos eléctricos sincronizados con su paso. Para mantener a las partículas en las trayectorias circulares en el interior de los aceleradores se les aplican fuertes campos magnéticos; y es precisamente este problema de mantener las partículas girando uno de los que limitan la energía máxima alcanzable con los aparatos de tipo ciclotrón. Todos los aceleradores circulares, hasta el más grande del mundo, el LEP (figura 1) pueden considerarse descendientes del primer prototipo realizado por Lawrence, de apenas 27 centímetros.

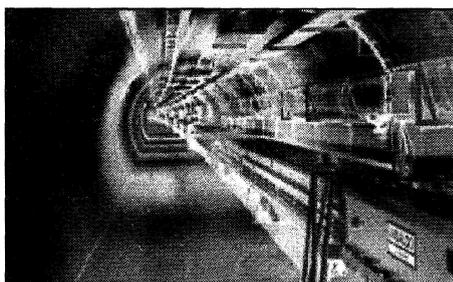


FIGURA 1

Interior del túnel del acelerador de electrones y positrones LEP (Large Electron Positron collider) en el CERN, cerca de Ginebra. Los haces de partículas se mueven en el interior de la estructura con sección rectangular que corre a lo largo del túnel. El tamaño de este acelerador (27 km) es aparente en que apenas se vislumbra su curvatura.

Lawrence continuó construyendo ciclotrones, fundando y dirigiendo el Laboratorio de Radiación, en Berkeley (que hoy lleva su nombre). Con ellos se comenzó la exploración del mundo nuclear y subnuclear siendo, como hemos dicho, instrumentos esenciales en estos estudios; pero la utilidad de los ciclotrones y sincrotrones no se limitó a ellos. Citemos, entre otras aplicaciones, la producción de radioisótopos, de utilidad en medicina, o el descubrimiento e identificación de plutonio, material utilizado en la segunda bomba atómica americana. Esto, además de la utilización de la radiación sincrotrón, producida subsidiariamente por estos aceleradores, para estudiar propiedades de sólidos. Por sus trabajos recibió Lawrence el premio Nobel (en 1939) y el premio Fermi de la U.S. Atomic Energy Commission, en 1957.

Además de sus trabajos científicos, Lawrence inventó un método para producir haces de neutrones, para el tratamiento del cáncer, y un tubo para televisión en color.

Fermi

No es casualidad que, a pesar de ser coetáneos, Lawrence recibiese el premio *Fermi*, o que el laboratorio, situado cerca de Chicago, en el que se encuentra el mayor sincro-ciclotrón del mundo se llame *Fermilab*: indudablemente, Fermi es uno de los grandes de la ciencia de todos los tiempos y su nombre da prestigio tanto un premio como un acelerador.

Enrico Fermi nació en Roma el 29 de septiembre de 1901; se doctoró en Pisa, en 1922, siendo posteriormente profesor en Florencia (1924-1926) y Roma (1927-1938). En este último año recibió el premio Nobel de física y, huyendo de la barbarie nazi-fascista (su mujer era de origen judío), se trasladó a Estados Unidos donde se nacionalizó ciudadano en 1944 y donde residió hasta su muerte, en 1954. Muerte causada por un cáncer de estómago, sin duda producido por su excesivo contacto con ra-

diaciones nucleares en una época en que el nefasto efecto de éstas aún no era bien conocido.

En este apartado discutiremos brevemente algunos campos en los que Fermi produjo contribuciones seminales: como teórico, como experimental y como constructor de aparatos. Porque lo cierto es que, si a Fermi no se le ocurría una teoría para progresar en el conocimiento de la naturaleza física, hacía los experimentos que le permitieran avanzar en este conocimiento; y si en el experimento le faltaba un aparato, lo fabricaba él mismo. Además, después de realizar el experimento, Fermi pasaba a un estudio teórico de los resultados encontrados, con lo que su capacidad para comprender rápidamente nuevos fenómenos era realmente extraordinaria.

Fermi como teórico. Las más importantes contribuciones de Fermi como teórico son las que realizó en su juventud, entre los años 26 y 33.

Las contribuciones de Fermi a los fundamentos de la mecánica cuántica son esenciales. A la vez que Dirac descubrió (1926-1927) que cierto tipo de partículas (como los electrones o protones) tienen unas propiedades estadísticas radicalmente distintas de las que tendrían si fuesen objetos clásicos. En particular, de estas propiedades estadísticas se sigue el conocido como *principio de exclusión de Pauli*, que especifica que dos partículas de este tipo no pueden estar en el mismo estado (por ejemplo, dos protones no pueden ocupar el mismo lugar), lo que explica la incompresibilidad de la materia. Otra consecuencia de estas propiedades estadísticas descubiertas por Fermi es que en la materia condensada los electrones tienen una energía que, si no están excitados, llena todos los niveles energéticos hasta un cierto nivel (conocido como nivel de Fermi). Esta propiedad es esencial para entender fenómenos tales como la conductividad eléctrica.

Una vez establecida la mecánica cuántica, lo que podemos considerar realizado después de los trabajos de Schrödinger, Dirac y Heisenberg, y del propio Fermi, digamos en 1927, resultaba esencial intentar formular esta mecánica de forma compatible con la otra gran revolución del siglo, la teoría de la relatividad. En particular, un problema básico lo consti-

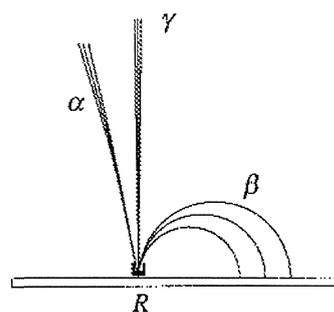


FIGURA 2

Efecto del campo magnético sobre las radiaciones α y β , lo que permite identificar sus constituyentes y medir sus energías.

(Según dibujo de Chadwick, 1921)

tuía el presentar una formulación a la vez relativista y cuántica del campo electromagnético. Fue Fermi quien primero la llevó a cabo: no es casualidad que, en su recopilación de artículos acerca del desarrollo de la teoría relativista y cuántica de las interacciones electromagnéticas, Schwinger coloque en primer lugar el artículo de Dirac de 1926 (conteniendo un tratamiento aun no completamente relativista de la emisión y absorción de radiación electromagnética), y en segundo el de Fermi de 1930. En efecto, entre 1929 y 1930 Enrico Fermi presentó una formulación cuántica completamente relativista para el fotón. Formulación que, en su versión Lagrangiana (dada por Heisenberg y Pauli en 1930),

$$L = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu} - \frac{1}{2} (\partial_\mu A_\mu)^2,$$

es la que se utiliza incluso hoy.

Aunque menos importante que lo mencionado, no es ni mucho menos despreciable la contribución de Fermi (coetánea de las de Breit y Bethe) acerca de las correcciones relativistas a los niveles atómicos, en particular su explicación de la estructura hiperfina.

La siguiente contribución de Fermi que mencionaremos se refiere a la formulación de la teoría de las interacciones débiles, que son las responsables de muchas desintegraciones radiactivas (en particular, de la desintegración beta).

La primera evidencia de la existencia de una interacción mucho más débil que la conocida interacción electromagnética fue en efecto la desintegración conocida como «Desintegración beta» de ciertas sustancias (figura 2), descubierta por Becquerel en 1898. En esta desintegración se producen directamente electrones (rayos beta) y unas partículas neutras, postuladas por Pauli en 1930 y a las que Fermi dio el nombre italiano de neutrinos, que quiere decir «pequeños neutrones». Subsidiariamente, se emiten también rayos alfa y rayos gamma. Fue precisamente Fermi el primero en proponer una teoría del proceso, en 1932. En lenguaje moderno diríamos que un quark de tipo d en el interior de uno de los neutrones del núcleo que se desintegra se convierte en un quark de tipo u, emitiendo un electrón y un neutrino (figura 3). En la teoría de Fermi la interacción (que por ser mucho menos intensa que la familiar electromagnética se conoce como interacción débil) sólo tenía lugar si las cuatro partículas, d, u, e y neutrino, se encontraban en el mismo punto. En esto se diferenciaba de la interacción electromagnética, mediada por el intercambio de fotones a distancias finitas.

Por supuesto, cuando Fermi formuló su teoría no se conocían los quarks y se pensaba que neutrones y protones eran elementales. De manera que Fermi realmente formuló su modelo como un modelo de interacciones entre protones, neutrones, electrones y neutrinos; pero las ideas básicas son, esencialmente, las mismas.

La teoría de Fermi tuvo un gran éxito al describir con mucha precisión las desintegraciones beta de una gran variedad de núcleos. Y no sólo núcleos; sino también otras partículas. La teoría de Fermi (con los refinamientos que el descubrimiento de su estructura espacial permitió introducir, ya en los años cincuenta) proporcionó predicciones consistentes con el experimento para las desintegraciones de piones (cargados). Cuando se pudieron estudiar las desintegraciones del muón resultó que la teoría de Fermi las describía también con gran exactitud. Únicamente en los años setenta y ochenta, al realizarse experimentos a grandes energías (docenas e incluso cientos de miles de millones de electrón-voltios), tuvo que sustituirse la teoría de Fermi por la de Glashow-Weinberg-Salam, más precisa.

A diferencia de la teoría de Fermi, en la de Glashow-Weinberg-Salam las interacciones débiles no tienen lugar cuando los protones, neutrones, electrones y neutrinos se encuentran en el mismo punto, sino que vienen mediadas por unas partículas, conocidas como W y Z , descubiertas experimentalmente en 1982-1983. La teoría de Fermi resulta ser una aproximación efectiva válida a energías pequeñas en comparación con la energía en reposo de las partículas W y Z , unos cien billones de electrón-voltios; y, como tal teoría efectiva, todavía seguimos utilizándola hoy a bajas energías, por ejemplo para calcular desintegraciones nucleares.

Fermi abandonó en buena parte sus estudios teóricos cuando se dedicó, desde los primeros años treinta, a realizar experimentos sobre fisión nuclear (que discutiremos después), regresando a ellos después de la segunda guerra mundial. Aunque ya no realizó contribuciones del calibre de las anteriores, todavía llegó a ser uno de los primeros en utilizar aceleradores para estudiar colisiones entre piones y protones, detectando una resonancia (conocida como Δ_{33}) con lo cual encontró la primera evi-

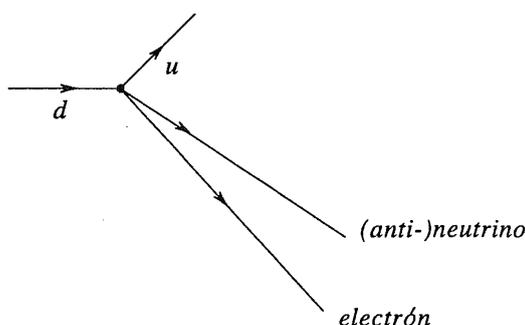


FIGURA 3

Desintegración de un quark d en un quark u y un par electrón-antineutrino en la teoría de Fermi.

dencia de que, en contra de lo que se creía hasta la fecha, estas partículas (piones y protones) no son elementales.

Fermi como físico experimental y aplicado. Pero, a pesar de estas contribuciones básicas, por lo que Fermi es universalmente conocido es por sus investigaciones experimentales sobre la fisión nuclear (por la que recibió el Premio Nobel) y su construcción del primer reactor nuclear, en la Universidad de Chicago, que alcanzó el estado crítico (producción auto-sostenida de energía) a las 2:20 de la tarde del 2 de diciembre de 1942, así como por sus estudios de reacciones de neutrones, esenciales no sólo para los reactores nucleares, sino también para la construcción de la bomba atómica. Fermi fue una pieza esencial en el Proyecto Manhattan, que nunca se hubiese podido llevar a cabo, con la celeridad que se hizo, sin la información fundamental que sus experimentos proporcionaron sobre una serie de cantidades tales como secciones eficaces, cruciales para comprender y controlar los procesos nucleares.

En los años treinta nadie era capaz de establecer un modelo teórico satisfactorio para las interacciones nucleares fuertes que, de hecho, sólo se resolvieron en el año 1973. Fermi se dedicó entonces, a su estudio experimental. Rápidamente se dio cuenta de que, debido a que los neutrones no tienen carga eléctrica y, por tanto, no son repelidos por el núcleo atómico, son instrumentos ideales para penetrar en él. El grupo de Roma se dedicó a irradiar con neutrones todos los elementos conocidos. Las medidas obtenidas con esto, y los cálculos teóricos resultantes (Fermi desarrolló lo que se llama la regla de oro y la regla de platino para calcular secciones eficaces) le llevaron a la conclusión de que las colisiones serían muy amplificadas si se utilizaban neutrones de muy poca energía (neutrones térmicos). Los descubrimientos de reacciones nucleares realizados durante estos años (34-37), en particular la fisión del uranio (aunque esta, producida por Fermi, no fue identificada por él mismo sino por los radioquímicos alemanes Hahn y Strassmann), le merecieron el Premio Nobel.

A partir de 1938, primero en la Universidad de Columbia y luego en la de Chicago, Fermi continuó con experimentos de reacciones nucleares. Su estudio de reacciones con neutrones (medidas experimentales y cálculos teóricos) le convencieron de que el mejor método para obtener una reacción nuclear sostenida era frenando los neutrones con grafito. Efectivamente, Fermi consiguió, en los sótanos de la Universidad de Chicago, llevar a cabo una reacción nuclear sostenida en una *pila* de capas de uranio y grafito, controladas por barras de cadmio (que absorbían neutrones) en un delicado equilibrio.

Tal vez al más impresionante homenaje a la capacidad mental de Fermi sea el que le rinde Feynman (una persona que no se caracterizaba por

su modestia) en su libro autobiográfico *Surely you are joking, Mr. Feynman!* En la página 114 de la edición Bantam de 1986 se puede leer:

... Enrico Fermi vino de Chicago [a Los Alamos; cuando Feynman estuvo en el Proyecto Manhattan] para ayudarnos... Yo había hecho algunos cálculos [para el Proyecto Manhattan]... los cálculos eran complicados y era muy difícil [obtener resultados]. Así que le dije a Fermi lo que había estado haciendo, y comencé a explicarle los resultados. «Espera, me dijo, antes de decirme los resultados déjame pensar. Bueno, vas a obtener algo así y asado, por esto y aquello (tenía razón). Y además hay una explicación evidente, etc.»

Fermi estaba haciendo aquello en que se suponía que yo era especialista, y lo hacía diez veces mejor que yo. Fue una buena lección para mí.

Heisenberg

Werner Karl Heisenberg es, desde más de un punto de vista, un científico maldito. A pesar de su esencial contribución a la mayor revolución en física de nuestro siglo, y la que tiene mayores implicaciones filosóficas (la mecánica cuántica y, en especial, el principio de incertidumbre) su colaboración con el gobierno Nazi, en particular en investigación nuclear, han oscurecido su fama. Hasta el punto de intentarse minimizar su papel en la formulación de los fundamentos de la mecánica cuántica en favor de Niels Bohr: aunque lo cierto es que los principios de la llamada «interpretación de Copenhague», desarrollada por ambos, tiene su expresión esencialmente definitiva en el texto de Heisenberg, *Principios físicos de la mecánica cuántica*, publicado en 1930 a partir de unas conferencias dadas en la Universidad de Chicago en 1929.

Heisenberg nació en Munich, el 5 de diciembre, consiguiendo el doctorado en la Universidad de esta misma ciudad, en 1923. Posteriormente, y después de una temporada en Copenhague (colaborando con Bohr), fue profesor en la universidad de Leipzig (1927-1941) para pasar a dirigir el Instituto Kaiser Wilhelm en Berlín y, después de la II Guerra Mundial, el Instituto Max Planck en Munich, ciudad donde murió en 1976.

Teórico de principio a fin, Heisenberg tuvo serios problemas a la hora de obtener el título de Doctor. Este incluía, en Alemania, un examen de física del candidato: examen en el que Heisenberg mostró un desconocimiento total de todo lo que no fuese la más pura teoría. Wien, que estaba en el tribunal, era partidario de suspenderle, pero, aparentemente, Sormmerfeld le convenció del error que sería no pasar a una persona tan brillante. Finalmente llegaron a un compromiso y Heisenberg recibió su

doctorado, pero con la calificación más baja posible. Es probable que este desinterés de Heisenberg por la experimentación fuera una más de las (muchas) causas del fracaso del programa alemán de fisión nuclear, encomendado en particular a un grupo en el que se integraba él y que, intentando bajo su recomendación utilizar agua pesada (en lugar de grafito, como el grupo de Fermi), y con un importante desconocimiento de secciones eficaces y ritmos de producción de neutrones, no pasó de construir prototipos de laboratorio, ninguno de los cuales funcionó.

Sin embargo, el brillo de Heisenberg como teórico no es inferior al de ningún otro físico de nuestro siglo, con la posible excepción de Einstein. En 1925, durante unas vacaciones en Helgoland (huyendo de una fuerte alergia), tuvo lo que él califica de *relámpago de intuición* y formuló, esencialmente, los fundamentos de la mecánica cuántica al postular que, a diferencia de las cantidades clásicas, que pueden multiplicarse en cualquier orden, el producto de dos variables cuánticas depende del orden en el que se realice.

Teniendo esto en cuenta, Heisenberg desarrolló una nueva mecánica, conocida como mecánica matricial, que reproducía las reglas cuánticas postuladas empíricamente por Bohr y otros. Dos años después Heisenberg mostró que su mecánica implicaba el principio conocido como *principio de incertidumbre*, o de *indeterminación*, según el cual cantidades tales como posición o velocidad no tienen, a escala microscópica, valores bien definidos. De manera que todo nuestro conocimiento acerca de ellas puede ser tan sólo de carácter estadístico: comenzando con ello una revolución cuyos fundamentos aun hoy no son completamente comprendidos y cuyas aplicaciones hacen palidecer a las obtenidas de los resultados (en principio más prácticos) de Lawrence o Fermi. Aunque Schrödinger desarrolló, casi simultáneamente con Heisenberg, una mecánica ondulatoria más sencilla de utilizar que la de éste, resultó que ambas son equivalentes y que, en el dominio relativista, es la formulación de Heisenberg la que sobrevive. No es casualidad que la Academia Sueca de Ciencias adjudicara un premio Nobel conjunto a Schrödinger y Dirac (1933), pero uno individual a Heisenberg (1932).

Aparte de estos trabajos fundacionales, Heisenberg realizó una de las primeras aplicaciones de la mecánica cuántica, al resolver el átomo de helio; fue quien primero reconoció la importancia de la matriz-S (introducida por Wheeler poco antes) en colisiones cuánticas; y, con Pauli, introdujo el método Lagrangiano en mecánica cuántica relativista. Además de esto, Heisenberg imaginó uno de los conceptos básicos de la física de partículas, el de simetría interna, con su teoría de lo que hoy llamamos isospín, y desarrolló la teoría del ferromagnetismo. Y la actividad de Hei-

senberg no se limitó al campo de la física; su contribución al renacer de la ciencia europea despues de la guerra no fue despreciable. Por ejemplo, fue uno de los promotores del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) cuyo Comité de Política Científica presidió.

Pero volvamos a la formulación de Heisenberg de la mecánica cuántica y las relaciones de incertidumbre. En mecánica clásica podemos formar la cantidad, asociada a la trayectoria de una partícula de masa m ,

$$dx \cdot v$$

producto de su velocidad v por el desplazamiento infinitesimal, dx . Si sumamos esta cantidad a lo largo de toda la trayectoria de la partícula obtenemos una entidad que se conoce como *acción* (por unidad de masa) y, según un principio descubierto por Maupertuis y Lagrange, la dinámica de Newton puede deducirse suponiendo que la trayectoria de las partículas es tal que su acción es mínima.

Pero, según Heisenberg, las cantidades x y v de la mecánica clásica deben sustituirse por otras entidades, que denotaremos con mayúsculas y circunflejos para distinguirlas: \hat{X} , \hat{V} . Estas cantidades son tales que el producto de ellas depende del orden en el que se realice: no es lo mismo $\hat{X} \cdot \hat{V}$ que $\hat{V} \cdot \hat{X}$. De hecho, se tienen las llamadas *relaciones de conmutación de Heisenberg*,

$$\hat{X} \cdot \hat{V} - \hat{V} \cdot \hat{X} = ih/2\pi m,$$

donde h es la constante característica de los fenómenos cuánticos, introducida por Planck en 1900. Esta cantidad es muy pequeña; en unidades de gramos, centímetros y segundos, el valor de h es de unos 6×10^{-27} por lo que los efectos cuánticos son difícilmente observables para objetos macroscópicos; pero estos efectos son esenciales para comprender el comportamiento de partículas tales como los electrones cuya masa, en las mismas unidades, es también de, aproximadamente, 10^{-27} (gramos).

De esta relación de conmutación (suplementada por el principio de superposición) puede deducirse toda la mecánica cuántica y, en particular, las relaciones de incertidumbre, descubiertas por el propio Heisenberg en 1927,

$$\Delta x \cdot \Delta v \simeq h/2\pi m,$$

y

$$\Delta t \cdot \Delta E \simeq h/2\pi.$$

h sigue siendo la constante de *Planck*. En la primera ecuación Δx , Δv representan, respectivamente, la indeterminación en la posición y velocidad de una partícula.

Asimismo, la segunda ecuación, conocida también como relación de incertidumbre de Bohr-Heisenberg, nos dice que la energía de una partícula puede fluctuar en la cantidad ΔE , con tal de que estas fluctuaciones duren un tiempo Δt .

Estas indeterminaciones pueden entenderse de distintas maneras. Por ejemplo, si intentamos medir la posición de una partícula, digamos de un electrón, con una precisión de $\Delta x = 1$ milímetro, entonces su velocidad estará indeterminada, al menos, en unos cien kilómetros por hora. Y también resulta posible la creación espontánea de energía, con tal que esta energía desaparezca en un tiempo suficientemente corto dado por la relación de Bohr-Heisenberg.

El hecho de que no estén determinadas a la vez la posición y velocidad de un objeto quiere decir que no tiene sentido la noción de trayectoria, sino tan sólo de manera aproximada: todo el universo de la mecánica newtoniana colapsa y la consiguiente revolución es tan profunda que grandes científicos y filósofos no la comprendieron. Entre los primeros podemos citar a Schrödinger y al propio Einstein, que gastó inútilmente la segunda mitad de su vida buscando una quimérica alternativa. Entre los segundos, el gran filósofo inglés Bertrand Russell quien, todavía en los años cuarenta, no la había asimilado como prueban las frases que la dedica en su monumental *History of Western Philosophy*, publicada en 1946. Así, en la p. 861 afirma Russell de la teoría cuántica que «*Su principal importancia filosófica radica en que considera que los fenómenos físicos pueden ser discontinuos*». Y a esto sigue un párrafo de irrelevancias en el que ni siquiera aparece el nombre de Heisenberg, o las relaciones de incertidumbre.*

Heisenberg siguió también intentando trabajar en física después de acabada la guerra, pero nunca se sobrepuso a su fracaso personal, el colaborar con el Tercer Reich, ni al profesional, en su faceta como experimentador, en el fiasco del programa nuclear Nazi. Aunque formó algún sucesor (varios de los más competentes teóricos alemanes de la posguerra tuvieron contacto con él) su herencia no puede ni de lejos compararse con la dejada por Fermi en los Estados Unidos.

Tampoco resultaron relevantes sus contribuciones teóricas; Heisenberg se empeñó en buscar una teoría unificada de la dinámica de las partículas elementales sobre bases muy poco sólidas, y en fundamentar la teoría de los campos cuánticos relativistas identificando la renormalización con la cuestión de la existencia de una métrica in-

definida en el espacio de los estados, algo también muy alejado de la realidad.

Personalmente, tuve un mínimo contacto con él, en un seminario suyo al que asistí en el CERN, en los años 60, y en la lectura de un folleto que editó sobre un tema que entonces me interesaba a mí (un modelo de interacción formulado por T. D. Lee), su *Einführung in die Theorie des Elementärteilchen*, 1961, que me proporcionó uno de sus discípulos de entonces. Siento decir que ambos me decepcionaron.

* Más perspicacia mostró el filósofo español Xavier Zubiri quien, ya en 1934 (en un lúcido e impresionante artículo en la revista Cruz y Raya), señala que las relaciones de incertidumbre de Heisenberg forman la base que permite dar un sentido a la mecánica cuántica. Es interesante notar que el texto de Zubiri, escrito antes de la aventura Nazi de Heisenberg, concede (correctamente) a éste la paternidad de la entonces nueva mecánica, sobre Bohr o Schrödinger.