

La física y los diagramas de Feynman

En manos de la primera generación de físicos de la posguerra, un artificio de cálculo ideado para sacar a la electrodinámica cuántica del callejón sin salida en que se hallaba, acabaría transformando la física

David Kaiser

A George Gamow, el ingenioso físico teórico que tanto contribuyó a la creación de la teoría de la gran explosión (“Big Bang”), le placía explicar qué le gustaba más de su oficio: podía recostarse en un sofá y cerrar los ojos sin que nadie supiese discernir si estaba trabajando o no. Buen humor, pero mala representación del trabajo cotidiano de los físicos teóricos. Durante demasiado tiempo, físicos, historiadores y filósofos se tomaron la broma de Gamow en serio. La investigación teórica, se nos decía, se refiere a pensamientos abstractos que nada tienen que ver con esfuerzos, actividades o mañas. Las teorías, las visiones del mundo o los paradigmas parecían las unidades apropiadas de análisis; de describir el nacimiento y el desarrollo conceptual de ideas concretas se trataba.

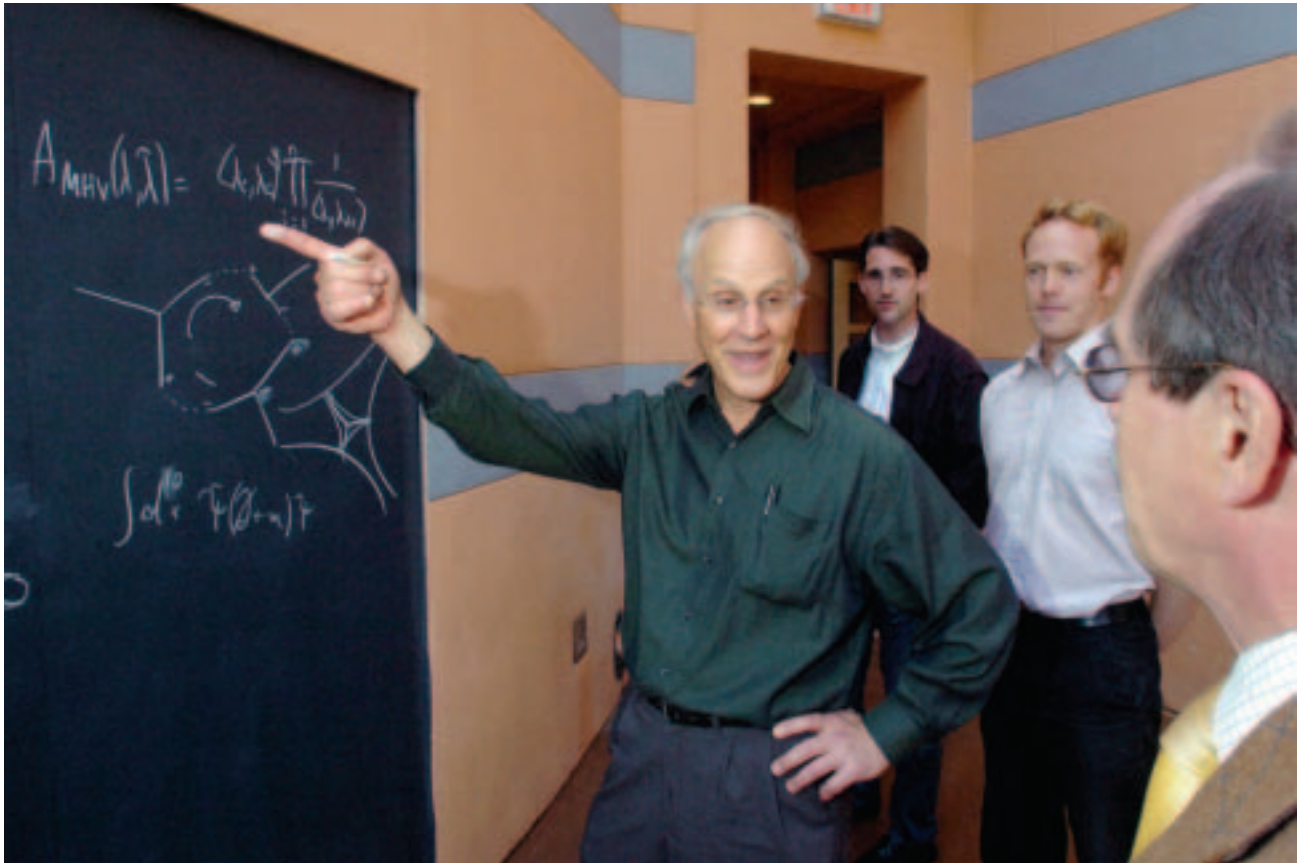
Conforme a tal punto de vista, apenas importaba el manejo experto de instrumentos. Las ideas, incorporadas a textos, pasaban fácilmente de teórico a teórico, libres de las limitaciones materiales con que pugnaban los físicos experimentales, atados a sus microscopios electrónicos, sus aceleradores o sus cámaras de burbujas. La mente contra la mano: nuestra concepción del progreso de la física, que imagina un reino de las ideas puramente cognoscitivo, separado por completo del reino manual de la acción, plasma esa contraposición.

Esta manera de entender la actividad de los teóricos, estoy convencido, aporta más obscuridad que luz. Desde mediados del siglo XX, la mayoría de los teóricos

no ha pasado sus días (ni, en verdad, sus noches) en el mundo de ensueño de los conceptos incorpóreos de algún filósofo. Su tarea principal ha sido *calcular*. Los teóricos juguetean con modelos y estiman efectos, con el objeto siempre de reducir a representaciones manejables la confusión inherente tanto a las pruebas experimentales u observables como a la posibilidad matemática. Los instrumentos de cálculo median entre diversas clases de representaciones del mundo natural y proporcionan la base del trabajo diario.

He centrado mi investigación en los útiles de trabajo de la física teórica, en particular en uno de los instrumentos más importantes con que cuentan los teóricos: los diagramas de Feynman. Desde la mitad del siglo XX, los físicos teóricos han recurrido cada vez más a esta herramienta para abordar cálculos de la mayor importancia. Los diagramas de Feynman han revolucionado casi todos los aspectos de la física teórica. Ciertamente es que ningún instrumento se aplica solo; menos aún interpreta los resultados a que conduce y saca conclusiones científicas de ellos. Cuando los diagramas de Feynman aparecieron en el utillaje de la física, los teóricos tuvieron que aprender a usarlos e interpretarlos. He estudiado, por lo tanto, los pasos que llevaron a que los diagramas de Feynman se ganaran su primacía.

Richard Feynman presentó sus diagramas a finales de los años cuarenta. Los ofrecía como un artificio contable que simplificaba cálculos muy largos en un área de la física: la electrodinámica cuántica (QED es su acrónimo).



1. LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN se idearon en 1948 para que la electrodinámica saliera del piélago de cálculos en que había encallado. Llenan desde entonces las pizarras del mundo entero; son métodos esenciales en los cálculos de la física teórica. Aquí, David Gross (*centro*) —en una fotografía tomada poco después de que le concedieran el premio Nobel de física del año 2004, junto a H. David Politzer y Frank Wilczek— utiliza un diagrama mientras

razona sobre resultados recientes de la cromodinámica cuántica obtenidos a partir de la teoría de cuerdas con Gerardus 't Hooft (*a la derecha*), premio Nobel de 1999, y los investigadores posdoctorales Michael Haack y Marcus Berg, de la Universidad de California en Santa Barbara. Gracias al descubrimiento de Gross, Politzer y Wilczek de 1973 se han podido aplicar con éxito los diagramas en cromodinámica cuántica.

nimo en inglés), o descripción mecanocuántica de las fuerzas electromagnéticas. Los diagramas se emplearían enseguida en física nuclear y de partículas. No mucho tiempo después, otros teóricos adoptaron —y sutilmente adaptaron— los diagramas de Feynman para solucionar problemas de muchos cuerpos en la teoría del estado sólido. Hacia finales de los años sesenta, se emplearon versiones de los dibujos de líneas de Feynman incluso para cálculos de física gravitacional. Gracias a los diagramas, todo un panorama de nuevos cálculos se abrió ante los físicos. Los teóricos efectuaron cálculos que antes de la Segunda Guerra Mundial pocos habrían soñado que fueran posibles. Cabe decir que la física no puede progresar más rápido que la destreza de los físicos en calcular. Así, de la misma manera que los cálculos con ordenador están propiciando hoy una revolución genómica, los diagramas de Feynman transformaron el modo en que los físicos veían el mundo y el lugar que ocupan en él.

Pegados al fango

Feynman introdujo sus nuevos diagramas durante una reunión celebrada en una posada, Pocono Manor Inn,

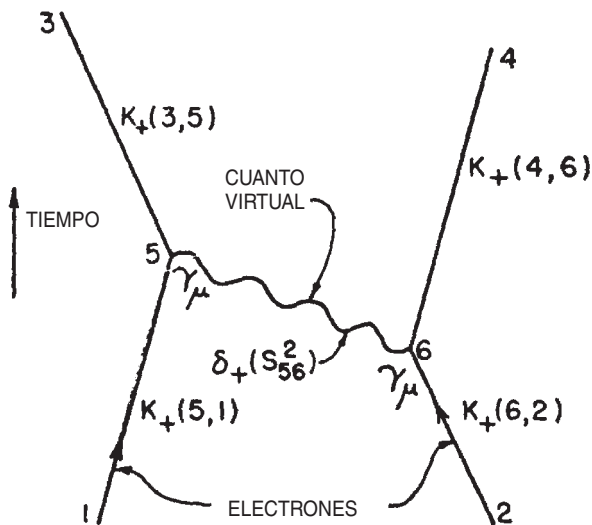
de la Pennsylvania rural. Los veintiocho físicos teóricos invitados a la reunión mantuvieron allí durante varios días de la primavera de 1948 debates muy animados. La mayoría de los teóricos jóvenes se dedicaban a los problemas de la electrodinámica cuántica. Y tales problemas eran, como dicen los físicos, “no triviales”.

La electrodinámica cuántica ofrece una explicación mecanocuántica de la fuerza electromagnética (la fuerza física por la que las cargas del mismo signo se repelen entre sí y las de signo opuesto se atraen). En la QED, los electrones y las otras partículas fundamentales intercambian fotones virtuales —fantasmagóricas partículas de luz— que sirven de portadores de esta fuerza. Una partícula virtual toma prestada energía del vacío y, por poco tiempo, existe tras salir, entendiéndose al pie de la letra, de la nada. Las partículas virtuales deben devolver rápidamente la energía tomada en préstamo y abandonar su existencia; sucede a escalas de tiempo establecidas por el principio de incertidumbre de Werner Heisenberg.

Dos problemas imponentes frustraban los cálculos de la electrodinámica cuántica. Veamos el primero: desde principios de los años treinta se sabía que la QED, en



2. RICHARD FEYNMAN Y OTROS FISICOS reunidos en junio de 1947 en Shelter Island, Nueva York. La escena se produjo varios meses antes de la conferencia de Pocono Manor Inn, en la que Feynman presentó sus diagramas. De pie están Willis Lamb (a la izquierda) y John Wheeler. Sentados, de izquierda a derecha, Abraham Pais, Richard Feynman, Hermann Feshbach y Julian Schwinger.



3. LA COLISION ELECTRON-ELECTRON se describe mediante uno de los diagramas de Feynman que primero se publicaron. Un electrón (línea continua de la parte inferior derecha) emite una partícula transmisora de la fuerza —un fotón virtual (línea ondulada)— que incide en el segundo electrón (línea continua de la parte inferior izquierda). El primer electrón retrocede y el segundo se desvía de su trayectoria original. El diagrama esquematiza así la versión mecanocuántica de la repulsión entre partículas dotadas de la misma carga. Tal y como sugiere la expresión “enfoque espaciotemporal” que da título al artículo que contenía este diagrama, Feynman dibujó diagramas donde las dimensiones eran el espacio y el tiempo; aquí, el eje horizontal representa el espacio. La mayoría de los físicos dibujan hoy día los diagramas de Feynman de una manera más estilizada, que resalta la topología de las líneas de la propagación y de los vértices.

cuanto se procedía más allá de sus grados de aproximación más simples, dejaba de ofrecer respuestas finitas; los infinitos que producía entonces carecían de sentido físico. Cuando se planteaban preguntas que parecían sencillas —por ejemplo, ¿cuál es la probabilidad de que dos electrones colisionen?—, los teóricos daban respuestas razonables con aproximaciones aceptables. Pero en cuanto intentaban llevar sus cálculos más lejos, es decir, refinar sus primeras aproximaciones, las ecuaciones fallaban. El problema era que los fotones virtuales podían tomar prestada *cualquier* cantidad de energía, incluso una energía infinita, siempre que la devolvieran con la presteza debida. Los infinitos surgían por doquier en las ecuaciones; los cálculos arrojaban resultados infinitos, no las cantidades finitas que debían responder a la pregunta que se planteaba.

Pasemos al segundo problema que acechaba las tentativas de calcular con la QED: el formalismo era a todas luces incómodo, una pesadilla algebraica con un sinfín de términos a tomar en cuenta y evaluar. En principio, los electrones podían intercambiarse un número cualquiera de fotones virtuales. Cuantos más fotones intervenían, más complicadas eran las ecuaciones correspondientes. El cálculo mecanocuántico obligaba a tomar en cuenta cada situación y sumar todas las contribuciones.

No se perdió toda esperanza, al menos al principio. Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac y los demás arquitectos de la QED de la entreguerra sabían que podían aproximar estos cálculos infinitamente complicados porque la carga del electrón (e) es pequeña: $e^2 \approx 1/137$ cuando se escogen las unidades apropiadas. La carga de los electrones gobernaba la intensidad de su propia interacción con los fotones que transmitían la fuerza: siempre que un par de electrones intercambiaban un fotón más, las ecuaciones que describían el intercambio ganaban otro factor que multiplicaba por ese pequeño número e^2 (véase el recuadro “Calcular con los diagramas de Feynman”).

El intercambio de un solo fotón entre electrones tenía como “peso” un factor e^2 , mientras que el intercambio de dos fotones llevaba el factor e^4 , mucho más pequeño. Es decir, la contribución de ese intercambio doble no será ni una centésima de la contribución del intercambio de un solo fotón. El término correspondiente a un intercambio de tres fotones (con un factor e^6) sería diez mil veces menor que el término correspondiente al intercambio de un fotón, y así sucesivamente. Aunque el cálculo completo se extiende, en principio, hasta incluir un número infinito de contribuciones distintas, en la práctica cualquier cálculo determinado podía truncarse al cabo de unos pocos términos. Esta manera de proceder lleva el nombre de “cálculo de perturbaciones”: los teóricos podían aproximarse al resultado completo guardando sólo esos pocos términos que daban la mayor contribución, ya que esperaban que los demás términos aportarían sólo correcciones numéricamente insignificantes.

Este método, en apariencia tan simple, presentaba en la práctica dificultades extraordinarias. Uno de los doctorandos de Heisenberg había afrontado un cálculo en e^4 a mitad de los años treinta —sólo la primera ronda de términos correctivos—; enseguida se topó con cientos

CORTESÍA DE EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES, INSTITUTO AMERICANO DE FÍSICA (fotografía); REPRODUCCIONES DE SPACE-TIME APPROACH TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS, DE RICHARD FEYNMAN, CON PERMISO DE LA AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (esquema).

CALCULAR CON LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN

LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN son una potente herramienta para calcular en la teoría cuántica. Como en cualquier cálculo mecánico-cuántico, se trata de obtener un número complejo, o "amplitud", cuyo módulo al cuadrado da una probabilidad. Por ejemplo, $A(t, \mathbf{x})$ podría representar la amplitud de que una partícula se encuentre en el punto \mathbf{x} en el instante t ; entonces, la probabilidad de encontrar la partícula allí en aquel instante será $|A(t, \mathbf{x})|^2$.

En QED, las amplitudes se componen de algunos ingredientes básicos, cada uno de los cuales tiene una expresión matemática asociada. Como ejemplo, podría escribirse:

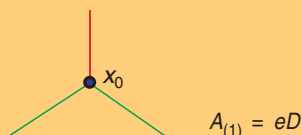
- amplitud de que un electrón virtual viaje imperturbado de x a y : $B(x,y)$;
- amplitud de que un fotón virtual viaje imperturbado de x a y : $C(x,y)$; y
- amplitud de que el electrón y el fotón choquen: eD .

Aquí e es la carga del electrón, que gobierna la intensidad con la que interaccionan los electrones y los fotones.

Feynman introdujo sus diagramas para tener en cuenta todas estas posibilidades. Las reglas de uso de los diagramas no son complicadas. En cada "vértice" se dibujan dos líneas de electrón que se encuentran con una línea de fotón. Se dibujan todas las maneras topológicamente distintas en que los electrones y los fotones pueden colisionar.

Se construye luego una ecuación: se ponen los factores $B(x,y)$ en cada línea virtual electrónica, $C(x,y)$ en cada línea virtual fotónica, eD en cada vértice y se integra sobre todos los puntos donde intervengan partículas virtuales. Como e es tan pequeño ($e^2 \sim 1/137$, en unidades apropiadas), los diagramas que tengan menos vértices tienden a contribuir más a la amplitud total que los diagramas complicados, que contienen muchos factores iguales a este pequeño número. Los físicos pueden aproximar una amplitud A construida así escribiéndola como una serie de términos cada vez más complicados.

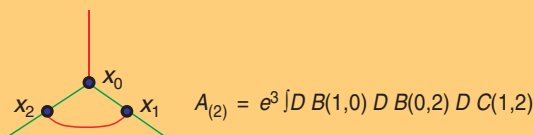
Por ejemplo, consideremos la dispersión de un electrón por un campo electromagnético. Según la mecánica cuántica, el campo se puede describir como una colección de fotones. En el caso más simple, el electrón (*línea verde*) colisionará sólo una vez con un único fotón (*línea roja*) en sólo un vértice (*el círculo azul en el punto x_0*):



$$A_{(1)} = eD$$

En este diagrama aparecen sólo partículas reales, no virtuales, de manera que la única contribución a la amplitud viene del vértice.

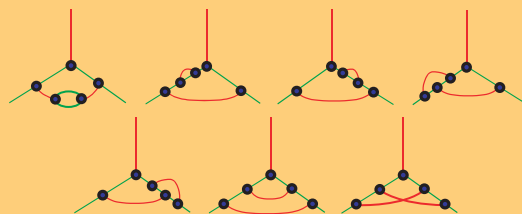
Pero al electrón pueden acaecerle otros fenómenos. En el siguiente nivel de complejidad, el electrón entrante puede desprender un fotón virtual antes de colisionar con el campo electromagnético y reabsorber el fotón virtual en un punto posterior:



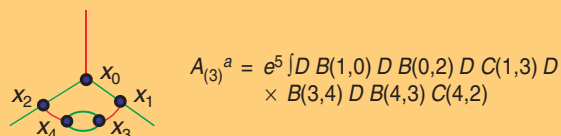
$$A_{(2)} = e^3 \int D B(1,0) D B(0,2) D C(1,2)$$

En este diagrama más complicado, las líneas del electrón y las líneas del fotón se encuentran en tres lugares y, por lo tanto, la amplitud para esta contribución es proporcional a e^3 .

Aún pueden suceder cosas más complicadas. En el nivel siguiente de complejidad, aparecen siete diagramas de Feynman distintos:



Como ejemplo, traduzcamos el diagrama superior izquierdo en su amplitud asociada:



$$A_{(3)}^a = e^5 \int D B(1,0) D B(0,2) D C(1,3) D \times B(3,4) D B(4,3) C(4,2)$$

La amplitud total de que un electrón interaccione con el campo electromagnético se escribe entonces:

$$A = A_{(1)} + A_{(2)} + A_{(3)}^a + A_{(3)}^b + A_{(3)}^c + \dots$$

y la probabilidad de esta interacción es $|A|^2$.

Robert Karplus y Norman Kroll abordaron este tipo de cálculos con diagramas de Feynman en 1949; ocho años más tarde, otros encontraron una serie de errores algebraicos en el cálculo, cuya corrección sólo afectaba a la quinta cifra decimal de su respuesta original. Desde los años ochenta, Tom Kinoshita (de Cornell) ha recorrido todo el itinerario hasta los diagramas que contienen ocho vértices, un cálculo que abarca 891 diagramas de Feynman distintos, con una precisión de hasta trece cifras decimales

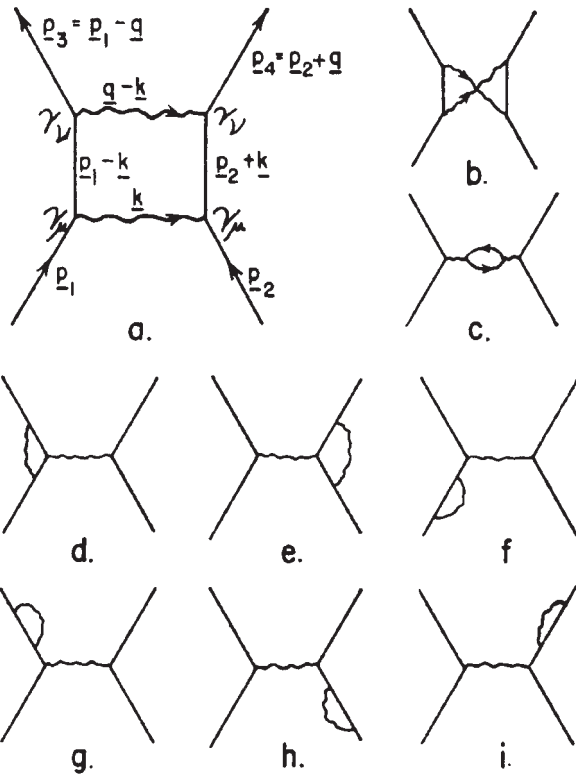
de términos distintos. Cada contribución al cálculo total ocupaba más de cuatro o cinco líneas de símbolos matemáticos. ¡Qué fácil era que en esa maraña algebraica se juntasen, o peor aún, se omitieran términos! Divergencias sin resolver y cuentas inabordables: a principios de la Segunda Guerra Mundial, la electrodinámica cuántica, refractaria al cálculo y conceptualmente confusa, parecía un embrollo maldito.

El remedio de Feynman

En su charla de la Pocono Manor Inn, Feynman sostuvo que los diagramas ofrecían una nueva esperanza de superar los escollos de los cálculos electrodinámicos. Uno de los primeros ejemplos que presentó fue la colisión de dos electrones. Dibujó un sencillo diagrama en la pizarra, similar al incluido más tarde en su primer

artículo sobre las nuevas técnicas diagramáticas (véase la figura 3). El diagrama representaba sucesos en dos dimensiones: el espacio en el eje horizontal y el tiempo en el vertical.

El diagrama, explicó, proporcionaba una taquigrafía para una descripción matemática, unívocamente asociada a los elementos del grafo. Un electrón tenía una cierta probabilidad de moverse como partícula libre del punto x_1 al x_5 . Feynman llamó a esta probabilidad $K_+(5,1)$. El otro electrón entrante se movía libremente —con probabilidad $K_+(6,2)$ — del punto x_2 al x_6 . Este segundo electrón podía entonces emitir un fotón virtual en x_6 , que a su vez se movería —con probabilidad $\delta_+(s_{56}^2)$ — hasta x_5 , donde el primer electrón lo absorbería. (Aquí s_{56} representaba la distancia en el espacio y el tiempo que recorría el fotón.)



4. FEYNMAN INCLUYO EN EL ARTICULO que contiene la figura 3 una muestra de que los diagramas sirven para “contabilizar”: este conjunto de diagramas recoge las formas posibles en que dos electrones intercambian dos fotones. Cada diagrama corresponde a una integral única; todos tuvieron que ser evaluados y agregados como parte del cálculo de la probabilidad de que dos electrones colisionen.



5. FREEMAN DYSON (*derecha*), retratado con Victor Weisskopf en un barco con rumbo a Copenhague en 1952, contribuyó como nadie a la difusión de los diagramas de Feynman. La deducción y la explicación de Dyson de los diagramas indicaban su método de aplicación. Los investigadores posdoctorales a los que instruyó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, durante el tiempo que pasó allí, extendieron el uso de los diagramas a otras instituciones.

La emisión o absorción de un fotón por un electrón llevaba asociado un factor $e \gamma_\mu$, donde e era la carga del electrón y γ_μ un vector de matrices de Dirac (disposiciones de números ligados al espín del electrón). Habiendo cedido parte de su energía y de su momento, el electrón de la derecha se movería de x_6 a x_4 , de manera parecida a como un cazador retrocede al disparar el rifle. El electrón de la izquierda, mientras tanto, tras absorber el fotón y, por lo tanto, ganar algo de energía y de momento, se dispersaría de x_5 a x_3 . En manos de Feynman, este diagrama representaba la expresión matemática (escrita con las abreviaturas K_+ y δ_+):

$$e^2 \int d^4x_5 d^4x_6 K_+(3,5) K_+(4,6) \gamma_\mu \delta_+(s_{56}^2) \gamma_\mu K_+(5,1) K_+(6,2)$$

En este proceso tan sencillo, los dos electrones intercambian un solo fotón. Las líneas rectas de los electrones tocan la línea ondulada del fotón en dos puntos, o “vértices”. El término matemático asociado, por lo tanto, contiene dos factores de la carga del electrón e , uno por cada vértice. Cuando se eleva al cuadrado, esa expresión da una estimación bastante buena de la probabilidad de que dos electrones colisionen. Pero tanto Feynman como sus oyentes sabían que ahí sólo empezaba el cálculo. En principio, ya lo hemos dicho, los dos electrones podían intercambiar cualquier número de fotones.

Feynman, pues, empleó sus nuevos diagramas para describir las distintas posibilidades. Había nueve maneras diferentes de que los electrones pudieran intercambiar dos fotones, cada una de las cuales contaba con cuatro vértices (y, por tanto, sus expresiones matemáticas asociadas contendrían e^4 en vez de e^2). Como en el caso más simple (que implica sólo un fotón), Feynman podía construir la contribución matemática de cada uno de estos diagramas introduciendo K_+ y δ_+ para cada línea de electrón y de fotón, y conectándolos en los vértices con los factores $e \gamma_\mu$.

La diferencia principal con el caso de un solo fotón estribaba en que la mayor parte de las integrales de los diagramas de dos fotones, tal y como se había estado encontrando durante veinte años de cálculos sin diagramas, daban infinito en vez de un resultado finito. Feynman mostró a continuación que algunos de los infinitos molestos se podían eliminar mediante una “re-normalización”, una combinación de trucos de cálculo, algunos de su propia invención, algunos tomados de otros autores. El orden de las operaciones era importante: Feynman partía de los diagramas en cuanto ayuda mnemotécnica para escribir las integrales pertinentes, y sólo más tarde modificaba éstas para quitarles, una a una, los infinitos.

Al organizar el cálculo con los diagramas, Feynman había resuelto un viejo quebradero de cabeza que llevaba años lastrando a los mejores físicos teóricos del mundo. Podríamos esperar que sus colegas de la Pocono Manor Inn apreciaran, al menos, lo que había logrado. Pero las cosas no fueron bien en la reunión. En primer lugar, las circunstancias se acumularon en contra de Feynman: su presentación siguió a una maratónica conferencia —un día entero— de Julian Schwinger, el “niño prodigio” de Harvard. Schwinger había llegado, sin recurrir a diagramas, a un método diferente de eliminar los infinitos

REPRODUCCIONES DE SPACE-TIME APPROACH TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS, DE RICHARD FEYNMAN, CON PERMISO DE LA AMERICAN PHYSICAL SOCIETY (esquema); CORTESÍA DE EMILIO SEGRE VISUAL ARCHIVES, INSTITUTO AMERICANO DE FÍSICA (fotografía)/American Scientist

de los cálculos de la QED. Durante la exposición, los asistentes no se movieron de sus asientos, salvo una breve interrupción para comer.

Pronunciada a última hora del día, la disertación de Feynman fue precipitada y dispersa. Nadie pareció capaz de seguir lo que hacía. Sufrió interrupciones frecuentes de físicos del fuste de Niels Bohr, Paul Dirac y Edward Teller, que insistían en querer saber cómo esos garabatos encajaban en los principios de la física cuántica. Otros, exasperados, preguntaban más en general por las reglas que regían el uso de los diagramas. Según todos los testimonios posteriores, Feynman abandonó la reunión decepcionado, deprimido incluso.

Se ha recordado a menudo la frustración de Feynman por lo que le ocurrió en Pocono. Sin embargo, al contarlo se ha pasado siempre por alto que la confusión perduró hasta transcurrido mucho tiempo de aquella presentación tan poco prometedora. A los propios amigos y colegas más cercanos a Feynman les costaba entender de dónde salían los diagramas o cómo se debían usar. Ni siquiera Hans Bethe, experto de la QED reconocido en todo el mundo y compañero, ya consagrado, de Feynman en Cornell, y Ted Welton, que hizo la carrera con Feynman y por entonces también especialista de la QED, entendían lo que Feynman hacía; le pidieron repetidas veces que les ayudara a ejercitarse en el cálculo.

Otros teóricos que habían asistido a la reunión de Pocono, entre ellos Robert Marshak, de Rochester, no salieron de su desconcierto al intentar aplicar las nuevas técnicas; tuvieron que pedirle a Feynman que les hiciera las cuentas, ya que eran incapaces de emprender los cálculos diagramáticos por sí mismos. Mientras tanto, durante el invierno de 1950, un estudiante de doctorado y dos asociados posdoctorales se intercambiaron cartas cada vez más detalladas; intentaban comprender por qué estaban obteniendo respuestas diferentes al usar los diagramas para, se suponía, un mismo cálculo. Aún en 1953 —cinco años después de que Feynman hubiera revelado su nueva técnica en la reunión de Pocono—, Leonard Schiff, teórico destacado de Stanford, escribía en una carta de recomendación de un estudiante de doctorado que éste entendía las técnicas diagramáticas y las aplicaba en su tesis. Como deja claro la carta de Schiff, no se podía dar por descontado que los doctandos entendieran los diagramas de Feynman o estuviesen acostumbrados a aplicarlos. Las nuevas técnicas no eran ni automáticas, ni obvias para muchos físicos. Los diagramas no se difundieron solos.

Dyson y los posdoctorales apostólicos

Su uso se extendió gracias, sobre todo, a los esfuerzos de un joven cercano a Feynman, Freeman Dyson. Dyson estudió matemáticas en Cambridge, antes de trasladarse a Estados Unidos para seguir cursos de doctorado de física teórica. Llegó a Cornell en el otoño de 1947 para estudiar con Hans Bethe. En el transcurso de aquel año también empezó a encontrarse con Feynman, justo cuando éste trabajaba en su nuevo enfoque de la QED. Dyson y Feynman hablaron a menudo durante la primavera de 1948 de los diagramas de Feynman y de cómo podían usarse, conversaciones que prosiguieron con mayor intensidad cuando los dos hicieron un viaje en coche por el

país aquel verano, unos meses después de la exposición de Feynman en Pocono Manor.

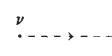
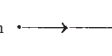
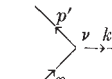
Más avanzado el estío, Dyson asistió a la escuela de verano de física teórica de la Universidad de Michigan, donde destacaron las detalladas conferencias de Julian Schwinger acerca de su propia aproximación no diagramática a la renormalización. La escuela de verano ofreció a Dyson la oportunidad de hablar de manera informal y extensa con Schwinger tal y como ya había hecho con Feynman. Así, hacia septiembre de 1948, Dyson, y sólo Dyson, había pasado un tiempo intenso y concentrado hablando con ambos, Feynman y Schwinger, sobre sus respectivas nuevas técnicas. Al final del verano, marchó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en Nueva Jersey.

Poco después de su llegada a Princeton, envió un artículo a *Physical Review* que comparaba los métodos de Feynman y Schwinger. (También analizaba los métodos del teórico japonés Sin-itiro Tomonaga, quien había trabajado sobre el problema durante y después de la guerra; poco después de la guerra, Schwinger llegó, por su lado, a un enfoque muy similar al de Tomonaga.) Más que compararlos, Dyson demostró la equivalencia matemática de los tres métodos, y ello antes de que Feynman hubiera escrito un solo artículo sobre sus nuevos diagramas. El temprano artículo de Dyson, y un extenso artículo que lo continuaba, remitido aquel invierno para su publicación, aparecieron meses antes que los propios trabajos de Feynman. Incluso años después de que los artículos, ya famosos, de Feynman saliesen impresos, el par de artículos de Dyson se citaba más a menudo que los de Feynman.

En estos primeros trabajos, Dyson dedujo reglas para el empleo de los diagramas, precisamente lo que los frustrados oyentes de Feynman en la reunión de Pocono habían encontrado a faltar. Los artículos de Dyson ofrecieron una guía de “uso” que incluía las instrucciones, paso a paso, de cómo debían dibujarse los diagramas y traducirse en sus expresiones matemáticas asociadas. Además de sistematizar los diagramas de Feynman, Dyson dedujo la forma y el uso de los diagramas a partir de principios básicos, asunto que Feynman no había aborda-

TABLA 8-2

Correspondencia entre diagramas y elementos de la matriz S en el espacio de momentos

Componente del diagrama	Factor en el elemento de matriz S
Línea interna de fotón 	$g_{\lambda\lambda} \frac{1}{k^2 - i\mu}$ función de propagación del fotón
Línea interna de electrón 	$\frac{i\not{p} - m}{p^2 + m^2 - i\mu}$ función de propagación del electrón
Vértice 	$\gamma^\nu \delta(p - p' - k)$

6. A MEDIADOS DE LOS AÑOS CINCUENTA, corrían tablas prácticas como ésta; en ellas, los físicos jóvenes aprendieron a traducir cada pieza de sus diagramas de Feynman en la expresión matemática correspondiente.



7. DESPUES DE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, la escala del equipamiento utilizado por los físicos de altas energías en los Estados Unidos creció enormemente. Aquí, E. O. Lawrence y su grupo posan con el recién renovado sincrociclotrón de 4,67 metros del Laboratorio de Radiación de Berkeley, en 1946. Tales aceleradores de partículas atrajeron grandes equipos de físicos experimentales, que enseguida se encontraron con todo un “zoo” de nuevas partículas. Estudiar su comportamiento se convirtió en tarea rutinaria.

do en absoluto. Más allá de todas estas explicaciones y deducciones, Dyson demostró cómo, diagramas en mano, se podían eliminar sistemáticamente los preocupantes infinitos de la QED de *cualquier* cálculo, por complicado que fuera. Hasta entonces, Tomonaga, Schwinger y Feynman habían trabajado sólo con la primera ronda de términos de corrección perturbativos, y sólo en el contexto de unos pocos problemas específicos. A partir de la topología de los diagramas, Dyson generalizó los ejemplos analizados y demostró que los problemas de la QED se podían renormalizar.

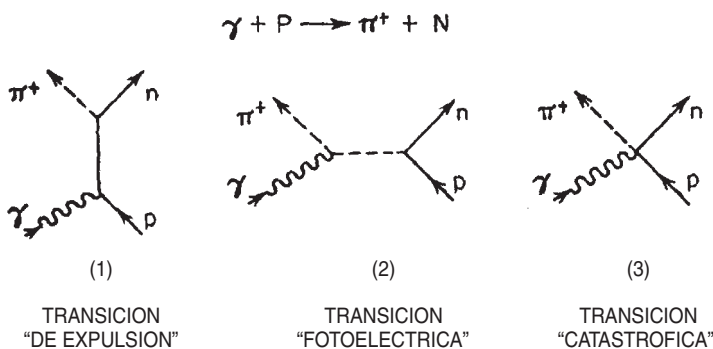
Mayor importancia que sus artículos tuvo el que Dyson convirtiera el Instituto de Estudios Avanzados en una fábrica de diagramas de Feynman. Para entender ese proceso, resulta obligado retroceder y considerar los cambios en la educación posdoctoral de los físicos durante este período. Antes de la Segunda Guerra

Mundial, sólo una pequeña parte de los físicos que acababan su doctorado en los Estados Unidos seguían una educación posdoctoral; por entonces, era todavía corriente empezar a trabajar en la industria o en la universidad nada más terminar el doctorado. En el caso de los físicos teóricos —antes de la guerra, todavía una pequeña minoría entre los físicos estadounidenses—, los que continuaban su educación posdoctoral viajaban, por lo general, a reputados centros europeos. Sólo era en Cambridge, Copenhague, Gotinga o Zúrich donde estos jóvenes teóricos norteamericanos “aprendían la música”, según la frase famosa de I. I. Rabi, y no sólo “il libretto” de la investigación en física. Al volver, muchos de estos físicos —entre ellos Edwin Kemble, John Van Vleck, John Slater y J. Robert Oppenheimer, así como el propio Rabi— se dedicaron a organizar en su país los fundamentos de la educación posdoctoral de los teóricos jóvenes.

Poco después de la guerra, el Instituto de Estudios Avanzados, bajo la dirección de Oppenheimer, se convirtió en uno de los centros clave para que los teóricos jóvenes completasen el trabajo posdoctoral. Con la fama mundial que tenía por haber dirigido el laboratorio de guerra de Los Alamos, Oppenheimer se había convertido en una persona muy solicitada. Dejó su plaza de Berkeley en 1947 para dirigir el Instituto de Princeton, en parte porque así podría atender desde más cerca sus nuevos deberes de consultor en Washington. Puso como condición para aceptar el puesto que se le permitiera aumentar el número de miembros jóvenes, temporales, de la plantilla de física; es decir, quería convertir el Instituto en un centro de educación posdoctoral de los físicos teóricos. No tardó el centro en constituirse en el lugar deseado por los teóricos jóvenes para cumplir dos años de estancia posdoctoral.

Este “hotel intelectual”, así lo llamó Oppenheimer, de investigadores posdoctorales, sería crucial para la difusión de los diagramas de Feynman. Cuando Dyson llegó en el otoño de 1948 —justo un año después de que se nombrara a Oppenheimer director y empezase a poner en práctica su proyecto de que en el instituto se impartieran estudios posdoctorales—, encontró allí a otros once teóricos en ciernes. Uno de los nuevos edificios del Instituto, el que, se suponía, contendría los despachos de esos visitantes, no se acabó a tiempo, y el equipo de posdoctorales hubo de pasar la mayor parte de aquel semestre en mesas contiguas de un solo despacho. Tanta cercanía alentó la colaboración. Dyson destacó muy pronto; enseñó a sus compañeros la técnica de los diagramas y coordinó una serie de cálculos que se efectuaron en colaboración por medio de los diagramas.

Entre esos cálculos sobresalió el que publicaron Robert Karplus y Norman Kroll, del Instituto. Una vez los hubo Dyson iniciado en el método, emprendieron las correcciones en e^4 del momento magnético del electrón; es decir, calcularon la intensidad con que un campo electromagnético externo afectaba a un electrón con espín. Se trataba de un cálculo monumental que abarcaba una larga lista de complicados diagramas de Feynman. Al construir cada pareja de diagramas e integrales como Dyson les había enseñado, demostraron que un electrón debería tener un momento magnético de 1,001147 en



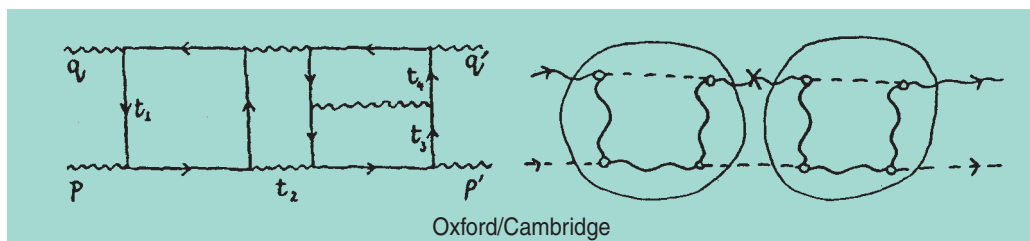
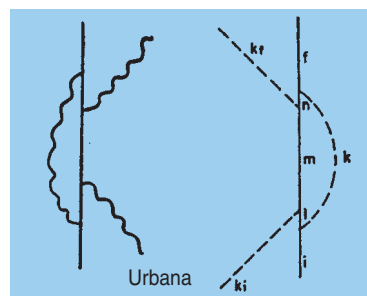
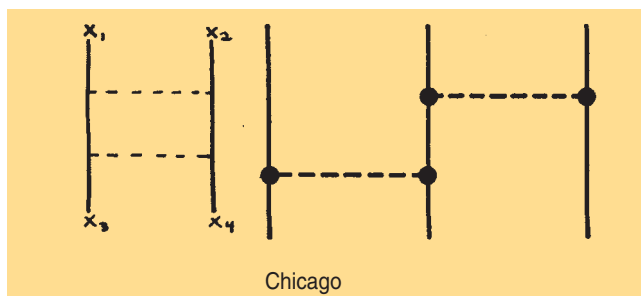
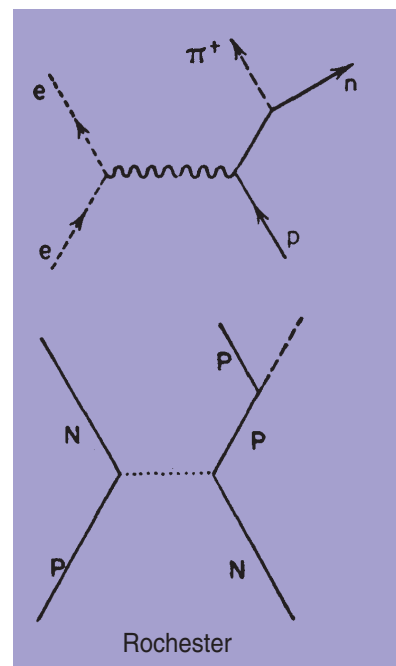
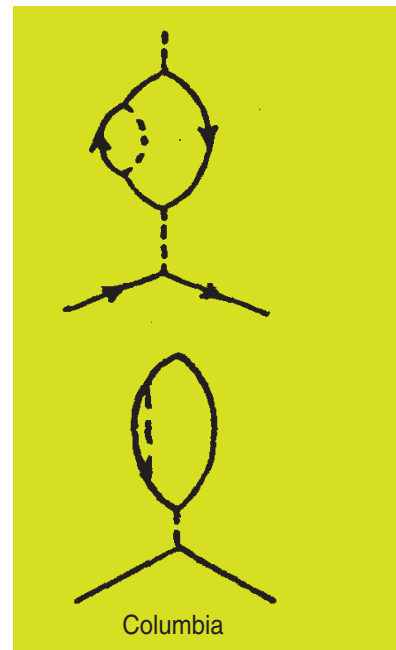
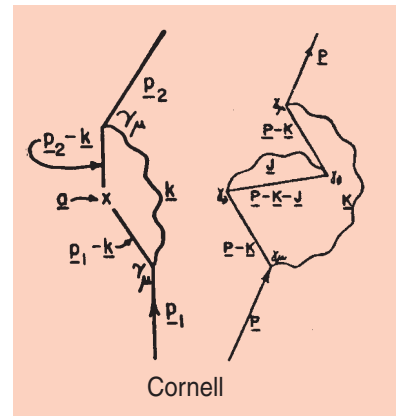
8. ENFRENTADOS CON LA AFLUENCIA de nuevas partículas e interacciones, algunos físicos teóricos comenzaron a utilizar los diagramas de Feynman para representar procesos físicos. Confían en que los diagramas de Feynman les ayudarían a clasificar las nuevas reacciones nucleares, aun cuando ya no se pudieran realizar cálculos perturbativos.

vez de 1 (en las unidades apropiadas), una respuesta con una exactitud de seis cifras que concordaba increíblemente bien con las últimas mediciones experimentales. Tras “muchas y provechosas discusiones con F. J. Dyson”, Karplus y Kroll mostraron así que gracias a los diagramas de Feynman se llevaban a cabo cálculos de los que nadie había soñado que fueran factibles.

Los posdoctorales de Princeton, formados por Dyson en los cálculos diagramáticos, pronto dejaron el Instituto para ocupar puestos docentes. Más de las cuatro quintas partes de los artículos que usaron diagramas de Feynman en la principal revista norteamericana de física, *Physical Review*, entre 1949 y 1954 llevaban la firma de estos posdoctorales, de doctorandos o de otros colegas, a quienes ellos, ya en sus nuevas plazas, habían instruido. La gran mayoría de los 114 autores que utilizaron los diagramas en *Physical Review* durante este período habían aprendido de Dyson las técnicas, o de alguien a quien Dyson había enseñado. (Los demás

autores, excepto dos, habían tenido alguna relación directa con Feynman.) El capítulo de reconocimientos en las disertaciones de los doctorandos de departamentos de Berkeley, Chicago, ciudad de Iowa, Bloomington, Madison, Urbana, Rochester e Ithaca confirman el papel de los posdoctorales del Instituto en la propagación de las nuevas técnicas y en la enseñanza de su aplicación a sus propios alumnos. Los diagramas de Feynman se extendieron así por todos los EE.UU. gracias a la cascada de posdoctorales que salían del Instituto de Estudios Avanzados.

Años más tarde, Schwinger diría con sarcasmo que los diagramas de Feynman habían “llevado el cálculo a las masas”. Los diagramas, recalca, eran un asunto, como mucho, de “pedagogía, no de física”. Ciertamente eran un asunto de pedagogía. Si se considera quiénes eran los autores de estos artículos diagramáticos, queda clara la misión pedagógica de los posdoctorales: más del 80 por ciento de tales autores estaba todavía en pleno período de formación cuando aparecieron



9. A MEDIDA QUE SE EXTENDIAN LOS NUEVOS DIAGRAMAS, mentores y alumnos los fueron dibujando con diversos propósitos. Se reconocen “semejanzas de familia” en estos pares. En cada caso, el primer diagrama (izquierda o arriba) viene de un joven instructor, y el segundo, de alguien a quien había formado. Fuentes: *Cornell*: R. Feynman, *The Theory of Positrons*, *Physical Review* 76: 749-759; R. M. Frank, *The fourth-order contribution to the self-energy of the electron*, *Physical Review* 83: 1189-1193, 1951; *Columbia*: R. Karplus y N. M. Kroll, *Fourth-order Corrections in Quantum Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron*, *Physical Review* 77: 536-549, 1950; J. Weneser, R. Bersohn y N. M. Kroll, *Fourth-order radiative corrections to atomic energy levels*, *Physical Review* 91: 1257-1262, 1953; *Rochester*: R. E. Marshak, *Meson Physics*, McGraw-Hill, 1952; A. Simon, *Bremsstrahlung in high energy nucleon-nucleon collisions*, *Physical Review* 79: 573-576, 1950; *Chicago*: M. Gell-Mann y F. E. Low, *Bound states in quantum field theory*, *Physical Review* 84: 350-354, 1951; G. Wentzel, *Three-nucleon interactions in Yukawa theory*, *Physical Review* 89: 684-588, 1953; *Urbana*: F. E. Low, *Natural line shape*, *Physical Review* 88: 53-57; 1952, G. F. Chew, *Renormalization of mesons theory with a fixed extended source*, *Physical Review* 94: 1748-1754, 1954; *Oxford y Cambridge*: A. Salam, *Overlapping divergences and the S-matrix*, *Physical Review* 82: 217-227, 1951; J. C. Ward, *Renormalization theory of the interactions of nucleons, mesons and photons*, *Physical Review* 84: 897-901, 1951.

los diagramas de Feynman. Los demás comenzaron a usar los diagramas mientras eran instructores jóvenes o profesores ayudantes, menos de siete años después de haberse doctorado. Los físicos de más edad no se “reciclaron”.

Pese a ello, los diagramas no llegaron a todas partes. Individuos, e incluso departamentos enteros, que no entraron en contacto con los posdoctorales recién dispersados prescindían de los diagramas años después de que se hubiesen impreso las instrucciones de empleo. Uno de primeros conversos de Dyson en el Instituto, Fritz Rohrlich (autor de un manual pionero sobre las nuevas técnicas diagramáticas), tuvo que aconsejar a un estudiante de doctorado de la Universidad de Pennsylvania que escogiese un tema de disertación diferente o cambiara de centro; sin ningún representante de la red de Princeton en la ciudad, el alumno no llegaría a dominar los métodos diagramáticos.

Como los físicos comprendieron, se requería mucho más que artículos de investigación publicados o textos pedagógicos para difundir los diagramas. La dirección personal en la formación y el acierto en los nombramientos de los posdoctorales constituían la clave. Mecanismos de transferencia muy similares extendieron los diagramas a jóvenes teóricos de Gran Bretaña y Japón; mientras, el endurecimiento de la guerra fría ahogaba la difusión de los diagramas entre los físicos de la Unión Soviética. Sólo con el retorno a las conferencias mixtas entre norteamericanos y soviéticos a mediados de los años cincuenta, bajo la iniciativa de “Átomos para la Paz”, empezaron los físicos soviéticos a utilizar los diagramas de Feynman con la misma soltura que los demás países.

Los diagramas dominan

Comentarios desdeñosos de Schwinger aparte, resultaba innegable la eficacia de los diagramas de Feynman en los cálculos perturbativos de la QED. Habida cuenta de la naturaleza laberíntica de los términos correctivos en estos cálculos, y de la rapidez con que podían resolverse gracias a los diagramas, cabría esperar que se hubieran difundido y aplicado ampliamente con ese fin. Pero no fue así. Sólo un grupo restringido publicó cálculos perturbativos de orden elevado semejantes a los de Karplus y Kroll, donde los diagramas llevasen la cuenta de las perturbaciones decrecientes de la QED. Menos del 20 por ciento de los artículos diagramáticos aparecidos en *Physical Review* entre 1949 y 1954 emplearon así los diagramas.

En cambio, los diagramas se usaron cada vez con mayor frecuencia para estudiar no las interacciones electrodinámicas entre electrones y fotones, sino partículas e interacciones nucleares. En los nuevos aceleradores de partículas estaban apareciendo docenas de nuevas partículas nucleares, como los *mesones*, de las que ahora se sabe que consisten en partículas compuestas, estados ligados de los quarks y sus homólogos de antimateria. Analizar el comportamiento de todas estas nuevas partículas se convirtió en un tema de sumo interés, tanto experimental como teórico.

Pero los diagramas no tenían un lugar obvio en los nuevos estudios. Feynman y Dyson habían concebido

sus técnicas diagramáticas para la electrodinámica, una interacción débil; ahora bien, las partículas nucleares se hallan sujetas a una interacción fuerte. En razón de su nimiedad, se podía explotar la carga del electrón en los cálculos perturbativos de la electrodinámica cuántica; en cambio, varios experimentos indicaron que la intensidad de la fuerza de acoplamiento entre las partículas nucleares (g^2) era mucho mayor, entre 7 y 57, no 1/137. Si se abordaba la colisión entre las partículas nucleares del mismo modo que se trataba la colisión electrón-fotón, con una larga serie de diagramas de Feynman de complejidad progresiva, cada uno de los cuales contuviese más y más vértices, los diagramas de orden superior incluirían factores adicionales del número grande g^2 . A diferencia de la situación en la QED, estos complicados diagramas, con muchos vértices y, por lo tanto, con muchos factores g^2 , superarían con creces las contribuciones de orden más bajo. De ahí que Feynman le advirtiese a Enrico Fermi a finales de 1951 de que no se creyese ningún cálculo de la teoría de mesones que usara diagramas de Feynman.

A pesar de la admonición de Feynman, numerosos teóricos jóvenes se mantuvieron ocupados (y todavía es así hoy en día) con los cálculos diagramáticos de las fuerzas nucleares. Más de la mitad de los artículos diagramáticos de *Physical Review* entre 1949 y 1954 aplicaban los diagramas a temas nucleares; entre ellos, los cuatro primeros artículos llenos de diagramas que se publicaron tras los escritos por Feynman y Dyson. En vez de descartar los diagramas cuando no eran aplicables los métodos perturbativos, los teóricos se aferraron a sus líneas escuetas e idearon nuevos usos e interpretaciones.

Algunos utilizaban los diagramas como representaciones físicas de las colisiones que se producían en los nuevos aceleradores. Rodeados en un “zoo” de partículas nucleares que surgían en esas máquinas, los teóricos recurrían a los diagramas para llevar un estadillo de las partículas y de los tipos de interacciones en que participaban, un tipo de contabilidad más próxima a la clasificación botánica que al cálculo perturbativo. Otros los usaron como un modo rápido de discriminar entre efectos físicos contrapuestos: si un diagrama contenía dos vértices de fuerza nuclear (g^2), pero sólo un vértice de fuerza electromagnética (e), podía esperarse que el correspondiente proceso físico contribuyera con un peso mayor que un diagrama con dos factores de e y sólo una g , aun cuando ninguno de los diagramas pudiera recibir una evaluación formal. A principios de los años sesenta, el grupo de Geoffrey Chew en Berkeley llevó los diagramas aún más lejos. Se afanaron por sacarlos del marco teórico apuntalado por Dyson; perseguían fundar en ellos una nueva teoría de las partículas nucleares que reemplazase al propio marco del que se los había deducido.

Durante las décadas de 1950 y 1960, no dejó de estirarse el cordón umbilical que unía los diagramas con las elegantes instrucciones, sometidas a reglas precisas, que Dyson había dictado para su empleo. Desde el primer momento, se jugó con los diagramas —añadiendo un tipo nuevo de línea aquí, abandonando una anterior convención del uso de las flechas allá, rotulando de

distintas maneras— para destacar los elementos que en cada momento se juzgasen de mayor importancia. Ese pastiche visual, sin embargo, no se compuso al azar. Fueron surgiendo escuelas locales a medida que mentores y pupilos adecuaban los diagramas para mejor satisfacer sus intereses de cálculo. Los diagramas dibujados por los doctorandos de Cornell se fueron pareciendo cada vez más entre sí y menos a los dibujados por los estudiantes de Columbia, Rochester o Chicago. La pedagogía confirió una impronta diferenciadora a los diagramas en la misma medida en que fomentó su circulación.

Los teóricos se sentían obligados a ahondar en su adaptación de los diagramas de Feynman al estudio de las partículas de interacción fuerte, aun cuando los cálculos perturbativos se habían demostrado imposibles. Un físico comparó la voluntad de usar diagramas de Feynman en la física nuclear, a pesar de la constante de acoplamiento, “al tipo de craneometría que estuvo de moda en el siglo diecinueve”; ambas cosas “venían a tener el mismo sentido”. Sólo se tuvo un patrón coherente de reglas para los cálculos perturbativos de fuerzas nucleares en 1973, cuando David Politzer, David Gross y Frank Wilczek descubrieron la “libertad asintótica” en la cromodinámica cuántica (QCD), teoría de la fuerza nuclear fuerte. (El trío recibió el premio Nobel de 2004 por ello.) Pero en el cuarto de siglo transcurrido entre la aparición de los diagramas de Feynman y ese descubrimiento, los físicos, sin ninguna teoría que los dirigiese, garabatearon diagramas de Feynman sin cesar. Otro premio Nobel, Philip Anderson, se preguntaba recientemente si Feynman “no les habría lavado el cerebro” a los físicos. No amainó el garabateo ni siquiera cuando el marco teórico de la física sufrió un cambio radical. Para generaciones de teóricos educados desde el principio en esa herramienta favorita, los diagramas de Feynman eran lo primero cuando se trataba de abordar los cálculos.

La historia de la difusión de los diagramas de Feynman revela el esfuerzo necesario para crear instrumentos de investigación y preparar a quienes los pondrían en obra. La gran mayoría de los físicos que se valieron de los diagramas durante la década posterior a su aparición lo hizo sólo después de haber trabajado estrechamente con algún miembro de la red diagramática. Los posdoctorales que pasaban por el Instituto de Estudios Avanzados participaban allí en intensas sesiones de estudio y en cálculos realizados en colaboración. Después ocuparon plazas por Estados Unidos (y en otras partes), e instruyeron a sus propios alumnos en el uso de los diagramas. En una proporción aplastante, los físicos que permanecieron fuera de esta red no adoptaron los diagramas en sus investigaciones. El contacto personal y la formación individual siguieron siendo el medio predominante de circulación de los diagramas, incluso años después de que se hubieran impreso instrucciones explícitas para su empleo. No fue la circulación de textos, sino la enseñanza directa la que proporcionó el método más eficaz de inculcar la destreza necesaria para sacar provecho de los nuevos diagramas. Las tareas que los posdoctorales asignaban a sus alumnos a menudo se limitaban a pedirles que dibujaran los diagramas de Feynman apropiados para un problema dado, sin siquiera traducirlos a expresiones matemáticas. Esos

alumnos aprendieron pronto que los cálculos empezaban por los diagramas.

Surgieron tradiciones locales. Los físicos jóvenes de Cornell, Columbia, Rochester, Berkeley y otras partes practicaron el dibujo y la interpretación de los diagramas de modos y con fines distintos. Estas apropiaciones diagramáticas guardaron cada vez menor semejanza con el proyecto original de Dyson. Su derivación a partir de principios básicos y reglas de traducción guiaron a los alumnos de Norman Kroll en Columbia, por ejemplo, pero se la consideró menos importante entre los estudiantes de Rochester; el grupo de Geoffrey Chew en Berkeley la ignoró. Los mentores eligieron los problemas en que se debía trabajar y los conocimientos que habían de adquirir sus alumnos. Como ocurre con cualquier instrumento, sólo entenderemos la difusión de los diagramas de Feynman entre los físicos si tomamos en consideración los contextos locales donde se utilizaron.

Sigue siendo imposible, por lo tanto, separar las prácticas de investigación de los medios con que se formó a los investigadores. En una generación, los diagramas de Feynman se convirtieron en la herramienta para calcular lo que fuese, de la electrodinámica y la física nuclear y de partículas a la física del estado sólido e incluso a disciplinas más alejadas de la aplicación original. Se logró con mucho trabajo pedagógico, de posdoctoral a posdoctoral, de mentor a pupilo. Los diagramas de Feynman no están en la naturaleza; los físicos teóricos no nacen, se hacen. Durante los decenios centrales del siglo XX, un mismo proceso pedagógico moldeó a aquéllos y a éstos.

El autor

David Kaiser ocupa la plaza de profesor asociado Leo Marx de historia de la ciencia del programa Ciencia, Tecnología y Sociedad del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en cuyo departamento de física enseña también. Sus investigaciones se centran en la cosmología del universo primitivo.
©*American Scientist Magazine*.

Bibliografía complementaria

- THE RADIATION THEORIES OF TOMONAGA, SCHWINGER, AND FEYNMAN. F. J. Dyson en *Physical Review*, vol. 75, págs. 486-502; 1949.
- THE S MATRIX IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS. F. J. Dyson en *Physical Review*, vol. 75, págs. 1736-1755; 1949.
- THE THEORY OF POSITRONS. R. P. Feynman en *Physical Review*, vol. 76, págs. 749-759; 1949.
- SPACE-TIME APPROACH TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS. R. P. Feynman en *Physical Review*, vol. 76, págs. 769-789; 1949.
- FOURTH-ORDER CORRECTIONS IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS AND THE MAGNETIC MOMENT OF THE ELECTRON. R. Karplus y N. M. Kroll en *Physical Review*, vol. 77, págs. 536-549; 1950.
- QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. R. P. Feynman. Princeton University Press; Princeton, N.J., 1985.
- QED AND THE MEN WHO MADE IT: DYSON, FEYNMAN, SCHWINGER, AND TOMONAGA. S. S. Schweber. Princeton University Press; Princeton, 1994.