

Richard P. Feynman

Electrodinámica cuántica

La extraña teoría de la luz
y la materia

Versión española de Ana Gómez Antón



Alianza editorial
El libro de bolsillo

Título original: *QED. The Strange Theory of Light and Matter.*

Esta obra ha sido publicada en inglés por Princeton University Press

Primera edición: 1988

Segunda edición: 2020

Diseño de colección: Estudio de Manuel Estrada con la colaboración de Roberto Turégano y Lynda Bozarth

Diseño de cubierta: Manuel Estrada

Ilustración de cubierta: Richard P. Feynman impartiendo una clase (*detalle*)

© AGE Fotostock

Selección de imagen: Carlos Caranci Sáez

Reservados todos los derechos. El contenido de esta obra está protegido por la Ley, que establece penas de prisión y/o multas, además de las correspondientes indemnizaciones por daños y perjuicios, para quienes reprodujeren, plagiaren, distribuyeren o comunicaren públicamente, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, o su transformación, interpretación o ejecución artística fijada en cualquier tipo de soporte o comunicada a través de cualquier medio, sin la preceptiva autorización.



Copyright © 1985 by Richard P. Feynman

New introduction by A. Zee Copyright © 2006 by Princeton University Press.

© Alianza Editorial, S. A., Madrid, 1988, 2020

Calle Juan Ignacio Luca de Tena, 15

28027 Madrid

www.alianzaeditorial.es

ISBN: 978-84-9181-840-3

Depósito legal: M. 110-2020

Printed in Spain

Si quiere recibir información periódica sobre las novedades de Alianza Editorial, envíe un correo electrónico a la dirección: alianzaeditorial@anaya.es

Índice

- 9 Introducción a la edición de 2006, por Anthony Zee
- 29 Prólogo, por Leonard Mautner
- 31 Prefacio, por Ralph Leighton
- 33 Agradecimiento

- QED (Electrodinámica cuántica)
- 37 1. Introducción
- 80 2. Fotones: partículas de luz
- 130 3. Los electrones y sus interacciones
- 190 4. Cabos sueltos

- 227 Índice analítico



Richard P. Feynman

Único ejemplo de uno de los famosos diagramas de Feynman dibujado y firmado por él mismo. Esta imagen es una cortesía de Jay M. Pasachoff, catedrático de Astronomía en el William College, para quien Feynman realizó el diagrama en las páginas preliminares del ejemplar de la primera edición del libro que tenía Pasadroff.

Introducción a la edición de 2006

La historia de cómo llegamos a comprender la luz es un drama cautivador, lleno de cambios, vueltas y giros del destino.

El fotón es la más visible de todas las partículas elementales: sitúate en una habitación polvorienta con una pequeña ventana abierta un día soleado y observa la multitud de minúsculas motitas que corretean por el cuarto. Newton pensaba, de forma bastante natural, que la luz consistía en una corriente de partículas («corpúsculos»), pero ya tenía algunas dudas; incluso en el siglo XVII podía observarse fácilmente la difracción de la luz. Con el paso del tiempo, la difracción y otros fenómenos parecieron demostrar sin ninguna duda que la luz era una onda electromagnética. Las ecuaciones del electromagnetismo de Maxwell, ese monumento de la física decimonónica, definían la luz completamente como una onda. Entonces llegó Einstein y explicó el

efecto fotoeléctrico interpretando la luz como una suma de pequeños paquetes («cuantos») de energía. Así nacieron la palabra «fotón» y la teoría cuántica de la luz. (No me desviaré de mi camino si recuerdo ahora la célebre incomodidad de Einstein con la mecánica cuántica, a pesar de haber contribuido a su nacimiento.) Mientras tanto, desde los años veinte hasta los cuarenta los físicos descifraron a fondo el comportamiento cuántico de la materia («átomos»). De esta forma resultaba aún más desconcertante que el comportamiento cuántico de la luz y su interacción con los electrones resistieran los esfuerzos de los mejores y más brillantes científicos, especialmente Paul Dirac y Enrico Fermi. Los físicos tuvieron que esperar a tres jóvenes –Feynman, Schwinger y Tomonoga– llenos de optimismo y pesimismo, según el caso, fruto de sus experiencias en la Segunda Guerra Mundial para producir la formulación adecuada de la electrodinámica cuántica, o QED (por sus siglas en inglés).

Richard Feynman (1918-1988) no fue sólo un físico extraordinario, sino también una figura extraordinaria, una personalidad avasalladora como nunca habían visto ni verían los físicos teóricos. De vez en cuando éstos pasan el rato comparando las contribuciones de Feynman y Schwinger, ambos unos buenos chicos judíos de Nueva York y prácticamente contemporáneos. Este debate sin sentido no tiene ningún propósito, pero es un hecho que, mientras Julian Schwinger era una persona tímida y reservada (aunque amable y cercana detrás de su aparente distanciamiento), Dick Feynman era extraordinariamente extrovertido, carne de leyenda. Con sus

bongos, sus *showgirls* y otros atrezos que le dieron una imagen cuidadosamente cultivada, alimentada con entusiasmo por una legión de idólatras, seguramente es, junto con Einstein, el más querido de los físicos teóricos.

El brillante físico ruso Lev Landau era famoso por tener una escala logarítmica para ordenar físicos teóricos, con Einstein en la cima. También es conocido que Landau se subió él mismo medio escalón tras formular la teoría de las transiciones de fase. Yo tengo mi propia escala, una que mide la diversión, en la que coloco a los físicos teóricos que conozco en persona o en espíritu. Sí, es cierto: la mayoría de los físicos teóricos son tan aburridos como un lavavajillas y puntúan cerca del menos infinito en esta escala logarítmica. Colocaría a Schrödinger (del que hablaré más adelante) en la cima, pero seguro que Feynman quedaría muy cerca de él. No puedo decir dónde estaría yo en mi propia escala, pero intento divertirme tanto como puedo, dentro de las limitaciones del talento y los recursos que tengo a mi disposición.

Pero ¡qué divertido era Feynman! En los inicios de mi carrera, Feynman me pidió que fuera a un club nocturno con él. Uno de sus colegas me dijo que la invitación demostraba que me tomaba en serio como físico, pero, a pesar de que yo estaba ansioso por compartir con él mis pensamientos sobre la teoría Yang-Mills, a Feynman sólo le interesaba mi opinión sobre las piernas de las bailarinas que había en el escenario. Por supuesto, en la psicología de la adoración de héroes a nadie le importa un bledo un físico tontorrón que toca los bongos y al que le

gustan las coristas. Así que, de acuerdo, mi escala pondera realmente *tanto* la diversión como el talento –viene a ser la escala de Landau incluyendo el entretenimiento–, con el valor de mercado de Einstein cayendo y el de Landau en ascenso (gastó algunas buenas bromas hasta que la KGB lo cazó).

Unos treinta años después de aquella visita al club nocturno, me honra que Ingrid Gnerlich, de Princeton University Press, me pida que escriba una introducción a la nueva edición del célebre libro de Feynman *Electrodinámica cuántica. La extraña teoría de la luz y la materia*. Primero, una confesión: no había leído antes el libro. Cuando fue publicado en 1985, justo acababa de terminar de escribir mi primer libro de divulgación física, *Fearful Symmetry*, y más o menos adopté una política de no leer otros libros de divulgación por miedo a que influyesen en mi estilo. Así que leí el ejemplar que Ingrid me envió con una mirada limpia y un interés muy profundo. Lo disfruté inmensamente, anotando mis pensamientos y críticas según iba avanzando.

Me equivoqué al no haber leído este libro antes, pues no es una obra de divulgación en el sentido acostumbrado del término. Cuando Steve Weinberg sugirió en 1984 que yo publicase un libro de divulgación y dispuso que conociese a su editor en Nueva York, me dio un útil consejo. Dijo que la mayoría de los físicos que escribían este tipo de libros no podían resistir la necesidad de explicarlo todo, mientras que el público lego sólo quería tener la ilusión de entender y captar unas pocas palabras rimbombantes para lanzarlas a su alrededor en las fiestas.

Creo que la visión de Weinberg, aunque algo cínica, es en gran medida correcta. Así lo demuestra el fantástico éxito de la *Historia del tiempo* de Hawking¹ (que, de acuerdo con la política que mencioné antes, no he leído). Uno de mis antiguos colegas aquí, en la Universidad de California, un físico destacado que ahora ocupa una cátedra en Oxford, me enseñó una vez una frase de aquel libro. Los dos intentamos buscarle el sentido, pero no fuimos capaces. Por el contrario, quiero asegurar a todos los lectores perplejos que cada frase de este libro, aunque parezca completamente extravagante, tiene sentido. Pero uno debe reflexionar sobre cada una de ellas con cuidado y esforzarse en comprender lo que Feynman está diciendo antes de seguir avanzando. De otro modo, os garantizo que estaréis desesperadamente perdidos. Es la física la que es extravagante, no la exposición. Al fin y al cabo, el título promete una «extraña teoría».

Puesto que Feynman era Feynman, decidió ir completamente contra el consejo que Weinberg me había dado (un consejo que, por cierto, yo tampoco seguí del todo; véase más abajo mi comentario sobre la teoría de grupos). En los agradecimientos, Feynman criticaba los libros de divulgación de física por lograr «una simplicidad aparente al describir algo diferente, algo considerablemente distorsionado, de lo que pretenden estar describiendo». Por el contrario, se impuso a sí mismo el desafío de describir la QED al lector no iniciado sin «distorsionar la verdad». Por lo tanto, no debes pensar en este libro como un tra-

1. Stephen W. Hawking, *Historia del tiempo*, Alianza Editorial, Madrid, 2011.

bajo clásico de divulgación de física. Tampoco es un libro de texto. Es más bien un híbrido extraño.

Usaré una analogía del propio Feynman, aunque algo modificada, para explicar ante qué tipo de libro estamos. De acuerdo con Feynman, para aprender QED se tienen dos opciones: puedes pasar siete años de formación en física o leer este libro. (Su cifra es un poco exagerada: en estos días un graduado de instituto brillante probablemente podría hacerlo en menos de siete años con la guía adecuada). Así que realmente no tienes demasiadas opciones, ¿no? ¡Deberías escoger leer este libro, por supuesto! Aunque reflexiones sobre cada frase como he sugerido, no deberías tardar más de siete semanas, y mucho menos siete años.

Así que, ¿en qué se diferencian estas dos opciones? Aquí llega mi versión de la analogía: un sumo sacerdote maya anuncia que a cambio de un módico precio podría enseñarte a ti, un cualquiera en la sociedad maya, cómo multiplicar dos números, por ejemplo 564 por 253. Te hace memorizar una tabla de 9 por 9 y entonces te dice que mires los dos dígitos más a la derecha en los dos números que tienes que multiplicar, es decir, 4 y 3, y digas lo que pone en la cuarta fila y tercera columna de la tabla. Tú dices 12. Entonces aprendes que deberías escribir 2 y llevarte 1, signifique eso lo que signifique. Después tienes que decir lo que pone en la sexta fila y tercera columna, es decir, 18, a lo que se te dice que debes sumar el número que te llevaste. Por supuesto, tendrías que pasar otro año aprendiendo a «sumar». Bueno, te haces a la idea. Esto es lo que aprenderías después de pagar la matrícula de una universidad prestigiosa.

Por el contrario, un listillo llamado Feynman se te acerca diciendo: «¡Shh, si sabes contar, no tienes que aprender toda esta parafernalia de llevarte y sumar! Todo lo que tienes que hacer es conseguir 564 tarros. Entonces pones en cada uno de ellos 253 guijarros. Finalmente, los vuelcas todos en una gran pila y los cuentas: ¡ésa es la respuesta!».

Así que ya ves, ¡Feynman no sólo te enseña cómo multiplicar, sino que también te da una comprensión profunda de lo que están haciendo los sumos sacerdotes y sus estudiantes, esa gente que está a punto de obtener doctorados de universidades prestigiosas! Pero, por otro lado, si aprendes a multiplicar a la manera de Feynman no podrías aspirar a trabajar como contable: si tu jefe te pidiera que multiplicases números grandes todo el día estarías agotado, y los estudiantes que fueron a la Universidad del Sumo Sacerdote te dejarían por los suelos.

Habiendo escrito tanto un libro de texto (*Quantum Field Theory in a Nutshell*, al que a partir de ahora me referiré como *Nutshell*) como dos de divulgación (entre los que se incluye *Fearful Symmetry*, a partir de ahora *Fearful*), siento que estoy bastante cualificado como para responder las dudas sobre qué tipo de libros leer. (Por cierto, Princeton University Press, que edita este libro, ha publicado tanto *Nutshell* como *Fearful*.)

Permíteme clasificar a los lectores de esta introducción en tres grupos: 1) estudiantes que podrían verse inspirados por este libro para ir más allá y especializarse en QED, 2) legos inteligentes que tienen curiosidad por la QED y 3) físicos profesionales como yo mismo.

Si estás en el grupo 1, este libro te inspirará y emocionará tanto que querrás salir corriendo y ponerte a leer un libro de texto sobre teoría cuántica de campos (¡y bien podría ser *Nutshell!*). Por cierto, en estos días la QED se considera un ejemplo relativamente simple de teoría cuántica de campos. Al escribir *Nutshell* defendí que un estudiante de licenciatura realmente brillante tendría una buena posibilidad de comprender la teoría cuántica de campos, y seguramente Feynman estaría de acuerdo conmigo.

Pero, al igual que en la analogía, leer tan sólo este libro no te convertirá en un profesional en ningún caso. Tienes que aprender lo que Feynman definió como la «forma difícil y eficiente» de multiplicar números. A pesar de su proclamado deseo de explicarlo todo desde cero, Feynman pierde fuelle de forma notable según va avanzando. Por ejemplo, en la figura 56, página 146, se limita a describir la extraña dependencia de $P(A \text{ a } B)$ en el «intervalo I », y tienes que confiar en su palabra. En *Nutshell* sí se explica de dónde sale todo esto. Lo mismo ocurre con la cantidad $E(A \text{ a } B)$, descrita en la nota al pie de las páginas 145 y 146.

Si estás en el grupo 2, persevera y serás recompensado, confía en mí. No te apresures. Incluso aunque sólo aguantes los dos primeros capítulos, habrás aprendido mucho. ¿Por qué es este libro tan difícil de leer? Podríamos volver a la analogía maya: es como si estuvieses enseñando a alguien a multiplicar hablándole de los tarros y los guijarros, pero él no supiese siquiera qué es un tarro o un guijarro. Feynman da vueltas hablando de cómo cada fotón lleva una pequeña flecha, y cómo tú sumas es-

tas flechas y las multiplicas, encogiéndolas y rotándolas. Es todo muy confuso; no puede uno permitirse perder ni por un instante la atención. Sucede que estas pequeñas flechas no son más que números complejos (como se explica en la nota de las páginas 113-114), y si ya sabes algo sobre números complejos (y tarros y guijarros) puede que la discusión te resulte algo menos confusa. O quizá seas uno de estos típicos lectores legos descritos por Weinberg, que se dan por satisfechos con «la ilusión de entender algo». En este caso, quizá te baste con un libro de divulgación de física «normal». Volvemos de nuevo a la analogía maya: un libro de divulgación normal no te cargaría con tablas de 9 por 9 ni con frascos y guijarros. Puede que simplemente dijese que los sumos sacerdotes tienen un método para producir un número distinto cuando se les dan dos números. De hecho, los editores de libros de divulgación insisten en que los autores escriban de este modo para no asustar al público que paga (véase más abajo).

Por último, si estás en el grupo 3 te espera un auténtico placer. Aunque yo sea un teórico de los campos cuánticos y sepa qué es lo que Feynman está haciendo, aun así me encantó ver un fenómeno familiar explicado de forma poco usual y con una originalidad deslumbrante. Disfruté que Feynman me explicase por qué la luz se mueve en línea recta o cómo funciona realmente una lente de enfoque (en la página 107: ¡«Se puede “engañar” a la naturaleza» ralentizando la luz por ciertos caminos para que las pequeñas flechas giren todas en la misma medida!).

Shh. Te diré en qué se diferencia Feynman de la mayoría de los profesores de física. Pregunta a uno que te

explique por qué, en la reflexión de la luz en una lámina de vidrio, basta con considerar la reflexión en la superficie delantera y en la trasera. Muy pocos conocerán la respuesta (véase la página 165). No es porque carezcan de conocimiento, sino porque nunca se les ha ocurrido siquiera plantearse esa pregunta. Simplemente se estudian el libro de texto estándar de Jackson, aprueban y siguen su camino. Feynman es el niño pesado que está siempre preguntando por qué, POR QUÉ, ¡POR QUÉ!

Al haber tres grupos de lectores (el estudiante ambicioso, el lego inteligente y el profesional) hay también tres categorías de libros de física (sin que se correspondan necesariamente uno a uno): libros de texto, libros de divulgación y lo que llamaré «libros de divulgación ultracomplificados». Este libro es un raro ejemplo de la tercera categoría, en cierto sentido a medio camino entre un libro de texto y uno divulgativo. ¿Por qué esta tercera categoría está tan escasamente poblada? Porque los «libros de divulgación ultracomplificados» aterrorizan a las editoriales. Es conocido que Hawking dijo que cada ecuación reduce a la mitad las ventas de un libro de divulgación. Aunque no niego que en general esto sea cierto, desearía que las editoriales no se asustasen tan fácilmente. El problema no es tanto el número de ecuaciones como si los libros de divulgación son capaces de contener una exposición honesta de problemas complejos. Cuando escribí *Fearful* pensé que hablar sobre la simetría en la física moderna sería esencial para explicar teoría de grupos. Intenté hacer los conceptos accesibles mediante el uso de pequeños símbolos: cuadrados y círculos con letras dentro.

Pero el editor me obligó repetidamente a diluir la argumentación hasta que no quedó prácticamente nada, y entonces me hizo relegar gran parte de lo que quedaba a un apéndice. Feynman, por otro lado, hacía gala de una capacidad de influencia que no puede alcanzar cualquier físico escritor.

Déjame volver al libro de Feynman con sus pasajes más complicados. Muchos lectores de este libro habrán tenido algún contacto con la física cuántica. Por lo tanto, estarán razonablemente perplejos, por ejemplo, por la ausencia de la función de onda, que aparece de forma tan destacada en otras exposiciones divulgativas de física cuántica. La física cuántica ya es lo bastante desconcertante –como algún listillo dijo una vez: «¿Quién necesita drogas teniendo física cuántica?»–. Quizá debamos ahorrar al lector futuros rascamientos de cabeza. Así que permíteme que me explique.

Casi simultáneamente, pero de forma independiente, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg inventaron la mecánica cuántica. Para describir el movimiento de un electrón, por ejemplo, Schrödinger introdujo una función de onda descrita por una ecuación diferencial en derivadas parciales, ahora conocida como la «ecuación de Schrödinger». Por el contrario, Heisenberg desconcertó a aquellos que le rodeaban hablando de operadores que actuaban sobre lo que denominó «estados cuánticos». Como es sabido, también enunció el principio de incertidumbre, que establece que cuanto más precisamente se mida, por ejemplo, la posición de una partícula cuántica, el conocimiento de su cantidad de movimiento se vuelve menos seguro, y viceversa.

Los formalismos establecidos por estos dos hombres eran marcadamente distintos, pero el resultado final que obtenían para cualquier proceso físico siempre concordaba. Más tarde se demostraría que los dos formalismos eran totalmente equivalentes. Hoy en día se espera que cualquier estudiante universitario decente pase de un formalismo a otro con facilidad, utilizando uno u otro según cual sea más conveniente para el problema que tenga entre manos.

Seis años más tarde, en 1932, Paul Dirac sugirió, de forma algo rudimentaria, un tercer formalismo. Su idea pareció quedar olvidada hasta 1941, cuando Feynman desarrolló y elaboró este formalismo, que pasó a ser conocido como «formalismo de integrales de caminos», o «suma sobre historias». (Los físicos se preguntan a veces si Feynman inventó este formalismo sin llegar a conocer el trabajo de Dirac. Los historiadores de la física han establecido que la respuesta es que no. En una fiesta en una taberna de Princeton, un físico visitante llamado Herbert Jehle le habló a Feynman sobre la idea de Dirac, y al parecer al día siguiente Feynman desarrolló el formalismo en tiempo real ante un impresionado Jehle. Véase el artículo de 1986 de S. Schweber en *Reviews of Modern Physics*.)

Es este formalismo el que Feynman se esfuerza por explicar en este pequeño libro. Por ejemplo, en la página 88, cuando Feynman suma todas esas flechas, está en realidad integrando (lo que por supuesto se corresponde con «sumar» en la jerga de análisis matemático) las amplitudes asociadas con todos los caminos posibles que el fotón podría seguir para llegar del punto S al punto P. De ahí el término «formalismo de integrales de cami-

nos». El término alternativo «suma sobre historias» también es fácil de entender. Si las reglas de la física cuántica fuesen relevantes para los hechos a escala macroscópica humana, todas las historias alternativas, como Napoleón venciendo en Waterloo o Kennedy esquivando la bala del asesino, serían posibles, y cada historia estaría asociada con una amplitud que tendríamos que sumar («sumar todas esas pequeñas flechas»).

Resulta que la integral de caminos, entendida como una función del estado final, satisface la ecuación de Schrödinger. La integral de caminos es esencialmente la función de onda, de modo que el formalismo de las integrales de caminos es totalmente equivalente a los formalismos de Schrödinger y Heisenberg. De hecho, el único libro de texto que explica esta equivalencia con claridad fue escrito por Feynman y Hibbs. (Sí, Feynman también escribió libros de texto: ya sabéis, esos libros aburridos que te dicen realmente cómo hacer cosas de forma eficiente, como «llevarte» y «sumar». Y sí, también habéis supuesto correctamente que los libros de texto de Feynman están frecuentemente escritos en buena parte por sus coautores.)

Puesto que el formalismo de las integrales de caminos de Feynman y Dirac es totalmente equivalente al formalismo de Heisenberg, incluye sin duda el principio de incertidumbre. Así que el alegre desprecio del principio de incertidumbre del que Feynman hace gala en las páginas 104 y 105 es una exageración. Al fin y al cabo, puede tratarse de una discusión semántica: ¿qué quería decir al argumentar que no se «necesitaba» el principio de incertidumbre? El verdadero problema es si es útil o no.

Los físicos teóricos son un grupo notoriamente pragmático: usarán el método más sencillo. No hay en ellos nada de la insistencia petulante de los matemáticos en el rigor y las pruebas. ¡Lo que sea que funcione, tío!

Teniendo en cuenta esta actitud, podrías preguntarte cuál de los tres formalismos –Schrödinger, Heisenberg o Dirac-Feynman– es el más sencillo. La respuesta depende del problema. Al tratar átomos, por ejemplo, como el propio maestro admite en la página 161, ¡los diagramas de Feynman «para estos átomos supondrían tal cantidad de líneas rectas y onduladas que serían un completo lío!»». El formalismo de Schrödinger es entonces mucho más sencillo con diferencia, y es el que usan los físicos. De hecho, en la mayoría de los problemas «prácticos» el formalismo de las integrales de caminos resulta complicado hasta ser casi inútil, y en algunos casos es directamente imposible usarlo. Una vez le pregunté a Feynman sobre uno de estos casos aparentemente imposibles, y no tuvo respuesta. No obstante, ¡los estudiantes que están empezando resuelven con facilidad estos casos aparentemente imposibles utilizando el formalismo de Schrödinger!

Así que cuál será el mejor formalismo dependerá realmente del problema físico, de modo que los físicos teóricos de un campo –física atómica, por ejemplo– pueden favorecer un formalismo, mientras que los de otro –como la física de altas energías– pueden preferir un formalismo distinto. Lógicamente, por lo tanto, puede incluso suceder que, a medida que cierto campo evoluciona y se desarrolla, un formalismo pueda emerger siendo más conveniente que otro.

Para ser concreto, permíteme que me concentre en el campo en el que me formé, es decir, la física de altas energías, o de partículas, que es también el campo principal de Feynman. Resulta interesante que en la física de partículas el formalismo de las integrales de caminos estuviese durante mucho tiempo en tercer lugar, a una buena distancia del resto en la carrera entre los tres formalismos. (Por cierto, no hay nada que diga que sólo pueda haber tres. ¡Algún tipo joven y brillante podría perfectamente descubrir un cuarto!) De hecho, el formalismo de las integrales de caminos resultaba tan poco manejable para la mayoría de problemas que, hacia finales de la década de 1960, prácticamente se había sumido en la más completa oscuridad. Por entonces, la teoría cuántica de campos se enseñaba casi exclusivamente utilizando el formalismo canónico, que no es más que otra palabra para el formalismo de Heisenberg, aunque la misma palabra «canónico» ya nos dice qué formalismo gozaba de mayor estima. Por citar tan sólo un caso que conozco bien, yo nunca escuché hablar de las integrales de caminos durante mis días de estudiante, a pesar de que fui a dos universidades razonablemente reputadas de la Costa Este para mis estudios de grado y postgrado. (Menciono la Costa Este porque, hasta donde yo sé, cabe la posibilidad de que las integrales de caminos se estuvieran enseñando a fondo en un enclave oriental en Los Ángeles.) No fue hasta que llegué a ser investigador postdoctoral en el Instituto de Estudios Avanzados cuando, como la mayoría de mis colegas, fui alertado sobre el formalismo de las integrales de caminos por un artículo ruso. E incluso entonces varias autoridades expresaron dudas sobre ese formalismo.

Irónicamente, el propio Feynman fue el responsable de este deplorable estado de cosas. Lo que ocurrió es que los estudiantes aprendían fácilmente los «pequeños y divertidos diagramas» (como el de la página 180) inventados por Feynman. Julian Schwinger dijo una vez con algo de amargura que «Feynman llevó la teoría cuántica de campos a las masas», con lo que quería decir que cualquier zoquete podía memorizar unas cuantas «reglas de Feynman», autodenominarse físico teórico y construir una carrera creíble. Varias generaciones aprendieron los diagramas de Feynman sin entender la teoría de campos. ¡Santo cielo, aún hay profesores universitarios de este tipo por ahí sueltos!

Pero entonces, de forma casi increíble –y quizá esto sea parte de esa mística de Feynman que dotó a su carrera de un aura casi mágica–, a comienzos de los años setenta, empezando sobre todo con el artículo ruso que acabo de mencionar, las integrales de caminos de Dirac y Feynman hicieron una rugiente reaparición. Rápidamente se convirtió en la forma dominante de hacer progresos en la teoría cuántica de campos.

Lo que hace a Feynman ser un físico tan extraordinario es que esta «batalla por los corazones y las mentes» que acabo de describir se entabló entre el grupo que usaba los diagramas de Feynman y un grupo más joven que usaba sus integrales de caminos. Me apresuro a añadir que la palabra «batalla» es algo fuerte: nada impide a un físico usar ambos métodos. Yo lo hice, por ejemplo. Creo que mi reciente libro de texto *Nutshell* es uno de los pocos que emplean el formalismo de las integrales de caminos desde el principio, en contraste con libros de

texto más viejos que favorecen el formalismo canónico. Empecé el segundo capítulo con una sección titulada «La pesadilla del profesor: un tipo listo en la clase». Siguiendo el espíritu de todas esas historias apócrifas sobre Feynman, me inventé un cuento sobre un estudiante listillo y lo llamé Feynman. El formalismo de las integrales de caminos lo derivé por el procedimiento de estilo zen de introducir un número infinito de pantallas y hacer un número infinito de agujeros en cada una de ellas, de forma que al final no queda pantalla alguna. Pero, como en la analogía sacerdotal maya, después de esta derivación feynmaniana tenía que enseñar al estudiante cómo calcular en serio («llevarse» y «sumar»), y para ello tenía que abandonar al Feynman apócrifo y pasar por la derivación detallada de Dirac y Feynman del formalismo de las integrales de caminos, introduciendo tecnicismos como «igualar a la unidad la suma sobre un conjunto completo de bras y kets». ¡Tecnicismos es lo que no te vas a encontrar leyendo los libros de Feynman!

Por cierto, en caso de que os lo estéis preguntando, los bras² no tienen nada que ver con el mujeriego Dick Feynman. Fueron introducidos por el serio y lacónico Paul Dirac como la mitad izquierda de un paréntesis (*bracket* en inglés). Dirac es en sí mismo una leyenda: una vez pasé una cena entera con él y otros sin que Dirac pronunciase más que unas pocas palabras.

En algunas ocasiones no pude evitar la risa cuando Feynman criticaba astutamente a otros físicos. Por ejem-

2. Juego de palabras intraducible entre el término cuántico «bra» y el significado común en inglés de *bra*: 'sujetador'. (N. del T.)