

R B A

**Lawrence M. Krauss**  
**Descubrir a**  
**Richard Feynman**  
Biografía científica



2011

## Reseña

Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, es una de las figuras más destacadas de la ciencia del pasado siglo: su innovador trabajo en el ámbito de la mecánica cuántica remodeló nuestro conocimiento sobre las fuerzas fundamentales de la naturaleza. Pero además de un gran científico fue un personaje curioso, un entusiasta de su trabajo y de la vida. En esta penetrante biografía científica, Lawrence M. Krauss capta el incansable espíritu inquisitivo de Feynman y el contexto histórico en el que formuló sus teorías sobre mecánica cuántica; nos introduce también en el medio intelectual de Feynman, donde se encontraban otras figuras destacadas como Paul Dirac, John von Neumann y Robert Oppenheimer. Además de una reflexión accesible sobre los temas que configuran la física de nuestros días, este libro narra la historia de un hombre dispuesto a romper todas las reglas para dominar una teoría que las había hecho saltar por los aires.

## Índice

### [Introducción](#)

#### Parte I: Los caminos a la grandeza

1. [Luces, cámara, acción](#)
2. [El universo cuántico](#)
3. [Una nueva manera de pensar](#)
4. [Alicia en el país de los cuantos](#)
5. [Finales y principios](#)
6. [La pérdida de la inocencia](#)
7. [Los caminos a la grandeza](#)
8. [De aquí hasta el infinito](#)
9. [Dividiendo un átomo](#)
10. [A través de un espejo en la oscuridad](#)

#### Parte II: El resto del universo

11. [La materia del corazón y el corazón de la materia](#)
12. [Ordenando el universo](#)
13. [Escondiéndose en el espejo](#)
14. [Distracciones y deleites](#)
15. [Retorciéndole el rabo al cosmos](#)
16. [De la cima al fondo](#)
17. [Verdad, belleza y libertad](#)

### [Epílogo](#)

### [Agradecimientos y fuentes](#)

*La realidad debe primar sobre las relaciones públicas, pues no se puede engañar a la naturaleza.*

*RICHARD P. FEYNMAN (1918-1988)*

### **Introducción**

*Veo la física como una materia maravillosa. Sabemos tanto de ella y después lo resumimos en tan pocas ecuaciones que podemos decir que sabemos muy poco.*

*RICHARD FEYNMAN, 1947*

A menudo resulta difícil separar la realidad de la imaginación en los recuerdos de la infancia, pero yo guardo un nítido recuerdo de la primera vez que pensé que ser físico podía ser realmente apasionante. De niño me había fascinado la ciencia, pero la ciencia que había estudiado me trasladaba al menos a medio siglo antes, así que para mí era algo muy parecido a la historia. El hecho de que todavía no se hubieran resuelto todos los misterios de la naturaleza no era una idea muy clara en mi mente.

La iluminación me vino cuando en el bachillerato asistí a un curso de verano sobre ciencia. No sé si yo daba la impresión de estar aburrido o no, pero mi profesor, al acabar la lección, me dio un libro titulado *El carácter de la ley física*, de Richard Feynman, y me dijo

que leyera el capítulo acerca de la distinción entre pasado y futuro. Fue mi primer contacto con la noción de entropía y desorden, y, como a muchos otros antes que a mí, entre ellos los grandes físicos Ludwig Boltzmann y Paul Ehrenfest, que se suicidaron tras dedicar gran parte de sus carreras a desarrollar este tema, me dejó atónito y frustrado. La manera en que cambia el mundo cuando se pasa de considerar sistemas simples de dos objetos, como la Tierra y la Luna, a un sistema de muchas partículas, como las moléculas de gas de una habitación, es algo a la vez sutil y profundo; sin duda demasiado sutil y profundo para que yo lo apreciara entonces.

Pero al día siguiente mi profesor me preguntó si sabía algo sobre la antimateria, y luego me comentó que ese mismo individuo Feynman, había ganado hacía poco el Premio Nobel por explicar cómo una antipartícula podía ser considerada como una partícula que viaja hacia atrás en el tiempo. Eso realmente me fascinó, aunque no entendí nada (y al recordarlo me doy cuenta de que mi profesor tampoco). Pero la idea de que este tipo de descubrimientos estaban ocurriendo estando yo vivo me llevó a pensar que había un montón de cosas todavía por explorar. (En realidad, aunque mi conclusión era cierta, la información que me llevó a ella no lo era. Feynman había publicado el trabajo en electrodinámica cuántica que le valió el Premio Nobel casi una década antes de que yo naciera, y la idea secundaria de que las antipartículas podían considerarse como partículas que viajan hacia atrás en el tiempo ni siquiera era suya. Lamentablemente, cuando las ideas llegan filtradas a los profesores y los textos de bachillerato, la física

descrita es normalmente de veinticinco o treinta años antes y, a veces, no es del todo correcta.)

Cuando empecé a estudiar física, Feynman se convirtió en un héroe legendario para mí, así como para toda una generación. Compré sus *Feynman Lectures on Physics* nada más entrar en la universidad, como hicieron la mayoría de los jóvenes aspirantes a físicos, aunque realmente nunca me matriculé en ninguna asignatura en la que se utilizaran estos libros. Pero, también como la mayoría de mis colegas, continué recurriendo a ellos mucho después de haber pasado el llamado «curso introductorio de física» en el que se habían basado. Fue al leerlos cuando descubrí cómo mi experiencia veraniega me recordaba curiosamente a una experiencia parecida que Feynman había tenido en el bachillerato. Luego hablaré más acerca de esto. Por ahora me limitaré a decir que ojalá en mi caso los resultados hubiesen sido tan significativos como en el suyo.

No fue hasta los estudios de posgrado cuando empecé a entender de verdad las ramificaciones de lo que había tratado de relatarme el profesor de ciencias, pero mi fascinación acerca del mundo de las partículas fundamentales, y del mundo de ese tipo interesante llamado Feynman, que escribió sobre ello, empezó esa mañana estival en el instituto. Y, en gran parte, nunca ha cesado. Al escribir esto, he recordado que escogí como tema de mi tesina las integrales de camino, el tema en el que Feynman había sido pionero.

Por una casualidad de la vida, siendo yo todavía un estudiante de grado, tuve la suerte de conocer a Richard Feynman y pasar algún tiempo con él. Por aquel entonces yo formaba parte de una

organización llamada Canadian Undergraduate Physics Association (Asociación Canadiense de Estudiantes Pregraduados de Física), cuyo único propósito era organizar una reunión a nivel nacional en la que físicos distinguidos impartían conferencias y los estudiantes presentaban los resultados de sus proyectos de investigación estival. Creo que fue en 1974 cuando Feynman había sido inducido (o seducido, no lo sé y no debería hacer ninguna suposición al respecto) por la muy atractiva presidenta de la organización a ser el conferenciante estrella de la reunión de ese año en Vancouver. En el encuentro tuve la osadía de hacerle una pregunta tras su conferencia, y un fotógrafo de una revista de difusión nacional sacó una foto del instante y la publicó. Pero lo más importante fue que mi novia había venido conmigo y Feynman pasó gran parte del fin de semana visitando algunos bares locales con nosotros.

Más tarde, cuando estaba haciendo un curso de posgrado en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts), escuché varias conferencias de Feynman. Años después de recibir mi título de doctor y de haberme trasladado a Harvard, presenté un coloquio en Caltech (Instituto Tecnológico de California), y Feynman, que estaba algo nervioso y apareció después para seguir con la discusión, se hallaba entre el público. Tuve la sensación de que no recordaba nuestro encuentro en Vancouver, y siempre he lamentado no habérselo recordado: mientras él esperaba pacientemente a hablar conmigo, un insistente y bastante fastidioso joven profesor ayudante monopolizó la discusión hasta que al final Feynman se marchó. Nunca más volví a verlo, pues murió unos años después.

Richard Feynman fue una leyenda para toda una generación de físicos mucho antes de que la gente supiese quién era. Obtener el Premio Nobel puede que lo pusiera en la primera página de los periódicos de todo el mundo, pero al día siguiente hay nuevos titulares, y el reconocimiento de cualquier nombre popular dura normalmente más o menos lo que el periódico del día. La popularidad de Feynman no surgió, por tanto, de sus descubrimientos científicos, sino que empezó a través de una serie de libros que contaban sus recuerdos personales. Feynman el narrador era en todo tan creativo y fascinante como Feynman el físico. Todos aquellos que tenían contacto personal con él se sentían impresionados por su enorme carisma. Sus penetrantes ojos, su traviesa sonrisa y su acento neoyorquino se combinaban para producir la verdadera antítesis del estereotipo de un científico, y su fascinación por cosas como los tambores bongo y los bares de *striptease* no hacía más que aumentar su aura.

Sin embargo, como sucede con frecuencia, el auténtico catalizador que convirtió a Feynman en una figura pública surgió por accidente; en este caso, un accidente trágico: la explosión poco después de su despegue del transbordador espacial *Challenger*, que transportaba al *primer civil*, un maestro de una escuela pública que iba a impartir unas clases desde el espacio. Durante las *investigaciones* ulteriores, se le pidió a Feynman que se uniera al panel de *investigación* de la NASA, y cosa *rara* en él (pues evitaba constantemente los comités y cualquier otra cosa que le mantuviera lejos de su trabajo), aceptó.



Feynman llevó a cabo la tarea a su manera poco convencional. En vez de estudiar informes y concentrarse en propuestas burocráticas para el futuro, se dedicó a hablar directamente con los ingenieros y científicos de la NASA, y en un famoso momento durante las audiencias televisadas realizó un experimento: puso una pequeña arandela de goma en un vaso de agua a punto de congelación y demostró que estas arandelas, usadas para sellar el cohete, podían fallar a temperaturas tan bajas como la que había en el día del fatal lanzamiento

Desde ese día, han aparecido libros que narran sus recuerdos, compilaciones de sus cartas, cintas magnetofónicas de sus conferencias «extraviadas», etc., y tras su muerte su leyenda ha seguido creciendo. Se han publicado también biografías populares de Feynman, de las cuales la más notable es la magistral *Genius* (Genio), de James Gleick.

Feynman permanecerá siempre como un fascinante ser humano, pero cuando se me propuso escribir un libro corto y accesible que reflejara a Feynman el hombre visto a través de sus contribuciones científicas, no pude negarme. Me sentí motivado porque revisaría todos sus artículos originales. (La mayoría de la gente puede que no se dé cuenta de que es raro que los científicos consulten las fuentes originales en su campo, en particular si el trabajo les antecede en más de una generación. Las ideas científicas se destilan y refinan, y la mayoría de las presentaciones modernas de un tema de física a menudo se parecen poco a las formulaciones originales del mismo.) Pero, lo que es más importante, me di cuenta de que la física de

Feynman es como un microcosmos que proporciona una perspectiva de los descubrimientos clave que se han hecho en física a lo largo de la segunda mitad del siglo XX, y muchos de los problemas que él dejó sin resolver lo siguen estando hoy en día.

En las siguientes páginas he tratado de hacer justicia tanto a la letra como al espíritu del trabajo de Feynman de un modo al que él habría dado su aprobación. Tal vez por esta razón este libro trata ante todo y sobre todo acerca del impacto de Feynman en nuestro conocimiento actual de la naturaleza, reflejado en el contexto de una biografía científica personal. Dedicaré poco espacio a los oscuros callejones sin salida y las muchas vaguedades que atraen engañosamente incluso a los científicos más exitosos —y Feynman no fue una excepción— en su camino al conocimiento científico. Para alguien no experto ya es bastante difícil, sin tener que aventurarse a través de esos intentos en vano, obtener una perspectiva cabal de lo que han aprendido los físicos acerca del mundo natural. Independientemente de lo brillantes o elegantes que puedan ser algunos de esos intentos, lo que en definitiva interesa son las ideas que han pasado la prueba del experimento.

Mi modesto objetivo es, por tanto, centrarme en el legado científico de Feynman, por su influencia en los revolucionarios descubrimientos de la física del siglo XX, y en cómo ese legado puede incidir en cualquier aclaración de los misterios de la física de nuestro siglo. Lo que, a ser posible, realmente deseo revelar a quienes no son físicos es por qué Feynman ha alcanzado el estatus de héroe mítico para la mayoría de los físicos vivos del planeta. Si lo

logro, habré ayudado a los lectores a comprender algo fundamental acerca de la física moderna y del papel de Feynman en el cambio de nuestra imagen del mundo. Este, para mí, es el mejor homenaje que puedo ofrecer al genio que fue Richard Feynman.

## Parte I

### LOS CAMINOS A LA GRANDEZA

*La ciencia es una manera de enseñar cómo se conoce algo, lo que no se conoce, hasta qué punto se conocen las cosas (pues nada se conoce absolutamente), cómo manejar la duda y la incertidumbre, cuáles son las reglas de la evidencia, cómo reflexionar acerca de las cosas de manera que puedan formularse juicios y cómo distinguir la verdad del fraude y del espectáculo.*

*Richard Feynman*

### Capítulo 1

#### Luces, cámara, acción

*Quizás una cosa es simple si puede describirse completamente de varias maneras diferentes sin saber inmediatamente que se está describiendo la misma cosa.*

*RICHARD FEYNMAN*

¿Podría alguien haber sospechado, cuando Feynman era aún un niño, que este llegaría a ser quizás el más grande, y probablemente el más querido, de los físicos de la segunda mitad del siglo XX? No está tan claro, incluso aunque se dieran muchas señales incipientes. Sin duda era listo. Tenía un padre al que le gustaba educar y que lo entretenía con puzles y le infundió el amor por aprender, estimulando su curiosidad innata y alimentando su mente siempre que podía. Y tenía un juego de química y se mostraba fascinado con las radios.

Pero todo eso no era tan raro entre los jóvenes brillantes de la época. En los aspectos más fundamentales, Richard parecía ser un típico chico judío listo de Long Island que se crió después de la Primera Guerra Mundial, y es quizás ese simple hecho más que nada lo que coloreó su futuro lugar en la Historia] Su mente era extraordinaria, sí, pero él permanecía siempre anclado firmemente a la realidad, incluso cuando se dedicaba a explorar las esferas más esotéricas de nuestra existencia. Su desprecio a la pomposidad provenía de una vida temprana en la que no estuvo expuesto a ella, y su falta de respeto a la autoridad provenía no solo de un padre que alimentaba esta independencia sino también de una vida temprana en la que él era marcadamente libre para ser un niño, seguir sus propias pasiones y cometer sus propios errores.

Quizá la primera señal de lo que iba a venir fue la literalmente infatigable capacidad de Feynman para concentrarse en un problema durante horas, hasta el punto de que sus padres empezaban a preocuparse. De adolescente, Feynman hizo un uso

práctico de su fascinación por las radios: #abrió un pequeño local para repararlas. Pero, a diferencia de los reparadores convencionales Feynman se deleitaba en resolver los problemas de la radio no meramente chapuceando, sino pensando.

Y combinaba esta notable capacidad para concentrar toda su energía en un problema con un talento innato como comediante. Por ejemplo, la anécdota más famosa de sus reparaciones es que en una ocasión se dedicó a pasearse arriba y abajo pensando mientras la radio rota chillaba delante de su propietario cada vez que se encendía. Finalmente, el joven Feynman sacó dos válvulas y las intercambió, resolviendo así el problema. Sospecho que Feynman dejó que el asunto durase más de lo necesario solo por el efecto que causaba.

Una historia casi análoga se repetiría en una época posterior de su vida. Pero esta última se originó cuando a un escéptico Feynman se le pidió examinar una enigmática fotografía proveniente de una cámara de burbujas, un aparato en el que las partículas elementales dejan trazas visibles. Tras pensar un rato, señaló con su lápiz un lugar preciso en la foto y aseguró que tendría que haber un perno justo allí, donde una partícula había sufrido una colisión imprevista, dando lugar a resultados que de otro modo hubieran sido mal interpretados. Huelga decir que cuando los experimentadores implicados en el pretendido descubrimiento volvieron a examinar su aparato allí estaba el perno.

La teatralidad, aunque contribuyó al *conocimiento* popular de Feynman, sin embargo no fue importante para su trabajo. Como

tampoco lo fue su fascinación por las mujeres, que también apareció más tarde. Sí lo fue su poder de concentración, unido a la energía casi sobrehumana que podía dedicar a cualquier problema. Pero la guinda final y esencial del pastel, que combinada con las dos características anteriores aseguraba definitivamente su grandeza, era simplemente un talento casi incomparable para las matemáticas.

El talento matemático de Feynman empezó a manifestarse cuando estaba en bachillerato. Siendo estudiante aprendió por su cuenta trigonometría, álgebra avanzada, series infinitas, geometría analítica y cálculo diferencial e integral. Y en esa etapa autodidáctica comenzó a materializarse el otro aspecto que hizo a Feynman tan único: remodelaba cualquier conocimiento a su manera, inventando a menudo un nuevo lenguaje o un nuevo formalismo para reflejar su propia forma de entender las cosas. En ciertos casos, la madre de la invención era la necesidad. Al mecanografiar un complejo manual de matemáticas, en 1933, a la edad de quince años, inventó «símbolos mecanográficos» para representar las operaciones matemáticas apropiadas, ya que su máquina de escribir no tenía las teclas para ese fin, y creó una nueva notación para una tabla de integrales que había desarrollado.

*Feynman entro en el MFT con la intención de estudiar matemáticas, pero era una idea fuera de lugar. Aunque le encantaban las matemáticas, lo que sobre todo deseaba saber es qué podía «hacer» con ellas. Se lo preguntó al jefe del departamento de Matemáticas y obtuvo dos respuestas: «Cálculos para seguros» y «si tienes que*

preguntar eso, tu lugar no está en las matemáticas». Ninguna de ellas sintonizaba con Feynman, que decidió que las matemáticas no eran para él, así que se cambió a ingeniería eléctrica. Curiosamente, este cambio fue demasiado extremo. Si las matemáticas no tenían ningún propósito, la ingeniería era demasiado práctica. Sin embargo, como en la sopa del cuento de *Ricitos de oro*, la física era «justo lo adecuado», y al final de su primer año Feynman había llegado a ser un alumno especializado en física.

Por supuesto, la elección fue un acierto. El talento innato de Feynman le permitió sobresalir en física. Pero poseía otro talento que quizás importaba más, y no sé si era innato o no: la intuición.

La intuición física es un tipo fascinante y efímero de destreza. ¿Cómo saber qué forma de abordar un problema físico será la más fructífera para resolverlo? Sin duda, algunos aspectos de la intuición se adquieren. Esa es la razón de que se les pida a los estudiantes de física que resuelvan tantos problemas. De este modo, empiezan a aprender qué métodos funcionan y cuáles no y aumentan su caja de herramientas técnicas en el camino. Pero lo que es seguro es que no puede enseñarse un aspecto de la intuición física, ese que resuena en cierto lugar y tiempo. Einstein tenía esta intuición, que le fue de gran utilidad durante más de veinte años, desde su histórico trabajo en relatividad especial hasta su logro superior, la relatividad general. Pero su intuición comenzó a fallarle cuando se apartó lentamente de la corriente principal de interés en mecánica cuántica del siglo XX. La intuición de Feynman era única de manera diferente. Mientras que Einstein desarrolló teorías



completamente nuevas sobre la naturaleza, Feynman exploró ideas ya existentes desde una perspectiva completamente nueva y normalmente más fructífera. El único modo en que él podía realmente comprender las ideas físicas era deduciéndolas usando su propio lenguaje. Pero como su lenguaje era normalmente también autoaprendido, los resultados finales diferían radicalmente de lo que producía la sabiduría «convencional». Como veremos, Feynman creó su propia sabiduría.

Pero Feynman adquirió también la intuición por el camino duro, basado en un trabajo incansable. Su enfoque sistemático y la minuciosidad con que examinaba los problemas eran ya evidentes en el bachillerato. Anotaba sus progresos en cuadernos, con tablas de senos y cosenos que él mismo había calculado, y más adelante en su cuaderno exhaustivo de cálculo, titulado *Cálculo para el hombre práctico*, con extensas tablas de integrales que él mismo había resuelto. Posteriormente, asombraría a la gente proponiendo un modo nuevo de resolver un problema o comprendiendo inmediatamente la esencia de un tema complejo. Casi siempre esto era así porque alguna vez, en las páginas de notas que guardaba al trabajar para comprender la naturaleza, Feynman había reflexionado acerca de ese mismo problema y había explorado no una sino multitud de maneras de resolverlo. Era este deseo de investigar un problema desde todas las perspectivas y de organizar cuidadosamente su pensamiento hasta haber agotado todas las posibilidades —un producto de su profunda inteligencia y de su infatigable capacidad de concentración— lo que lo distinguía.

Quizá «deseo» no sea la palabra correcta. «Necesidad» sería más adecuada. Feynman necesitaba entender cualquier problema que afrontaba partiendo de cero, resolviéndolo a su propia manera y, con frecuencia, de varias maneras distintas. Más adelante, trataría de inculcar esta misma ética a sus estudiantes, uno de los cuales dijo después: «Feynman hacía hincapié en la creatividad —lo que para él significaba desarrollar las cosas desde el principio—. Nos insistía para que cada uno de nosotros crease un universo de ideas propio, de manera que nuestros resultados, incluso si se trataba de ejercicios propuestos en clase, tuvieran un carácter original propio, de la misma manera que su trabajo llevaba el sello único de su personalidad».

No solo era evidente la capacidad de Feynman para concentrarse durante largos periodos cuando era joven, también lo era su capacidad para controlar y organizar sus pensamientos. Recuerdo haber tenido un juego de química cuando era niño y también recuerdo haber mezclado cosas al azar para ver qué pasaba. Pero Feynman, como enfatizó más tarde, «nunca jugaba de manera caótica con las cosas científicas». Más bien, él siempre llevaba a cabo su «juego» científico de manera controlada, siempre atento a lo que estaba sucediendo. De nuevo mucho más tarde, después de su muerte, por sus notas quedó claro que él anotaba cuidadosamente cada una de sus exploraciones. Incluso en una ocasión consideró organizar la vida doméstica con su futura esposa según líneas científicas, antes de que un amigo lo convenciera de que estaba siendo sin remedio poco realista. Al final, su ingenuidad al respecto

desapareció, y mucho más tarde le aconsejó a un estudiante: «No puede desarrollarse una personalidad únicamente con la física. El resto de la vida de uno debe entrar en juego». En cualquier caso, a Feynman le encantaba jugar y bromear, pero cuando se trataba de ciencia, lo que empezó pronto y continuó a lo largo de su vida, Feynman podía ser mortalmente serio.

Esperó hasta el final de su primer curso universitario para decidirse a convertirse en estudiante de la especialidad de física, pero las estrellas se habían alineado cuando todavía estaba en el instituto. Retrospectivamente, lo que pudo haber sido el momento clave ocurrió cuando su profesor de bachillerato, Mr. Bader, lo introdujo a uno de los misterios más sutiles y maravillosos del mundo observable, un hecho que se desarrolló a partir de un descubrimiento realizado trescientos años antes de su nacimiento por un brillante y solitario abogado y gran aficionado a las matemáticas, Pierre de Fermat.

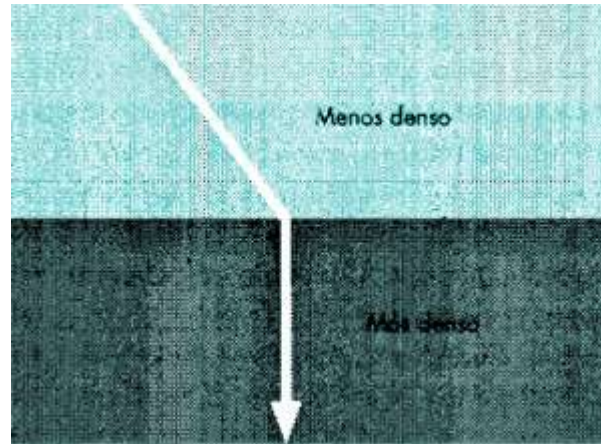
Al igual que Feynman, Fermat obtendría reconocimiento público ya en edad madura por algo no relacionado con sus logros más sustanciales. En 1637, Fermat garabateó una breve nota al margen de su copia de *Arithmetica*, la obra maestra del famoso matemático griego Diofanto, en la que indicaba que había descubierto una prueba sencilla de un hecho notable. La ecuación  $x^n + y^n = z^n$  no tiene soluciones enteras si  $n > 2$  (para  $n = 2$  es el conocido teorema de Pitágoras, que relaciona las longitudes de los lados de un triángulo rectángulo). Resulta dudoso que Fermat poseyera realmente esa prueba, que trescientos cincuenta años más tarde

requirió casi todos los desarrollos de la matemática del siglo XX y centenares de páginas para completarse. No obstante, si el gran público recuerda de alguna manera a Fermat no es por sus muchas contribuciones fundamentales a la geometría, el cálculo y la teoría de números, sino más bien por esa especulación al margen que será conocida en adelante como «el último teorema de Fermat».

Sin embargo, veinticinco años después de hacer esa dudosa afirmación, Fermat sí presentó una demostración completa de algo distinto: un notable, y casi de otro mundo, principio que establecía un enfoque de los problemas físicos que Feynman usaría posteriormente para cambiar la manera de pensar acerca de la física en el mundo moderno. El tema al cual Fermat dirigió su atención en 1662 tenía que ver con un fenómeno que el científico holandés Willebrord Snell había descrito cuarenta años antes. Snell descubrió una regularidad matemática en la forma en que la luz se refracta, o se dobla, cuando pasa a través de dos medios distintos, tales como el aire y el agua. Esto se llama en la actualidad «la ley de Snell», y se presenta a menudo en las clases de física de bachillerato como otro de los hechos tediosos que deben memorizarse, incluso a pesar de que desempeñara un papel profundo e importante en la historia de la ciencia.

La ley de Snell hace referencia a los ángulos que un rayo de luz forma al atravesar una superficie que separa dos medios. No importa aquí la forma exacta de la ley; lo que es importante es su carácter general y su origen físico. Para entendernos, la ley afirma que cuando la luz pasa de un medio menos denso a otro más denso,

la trayectoria del rayo luminoso se dobla al acercarse a la perpendicular de la superficie que los separa (véase la figura).



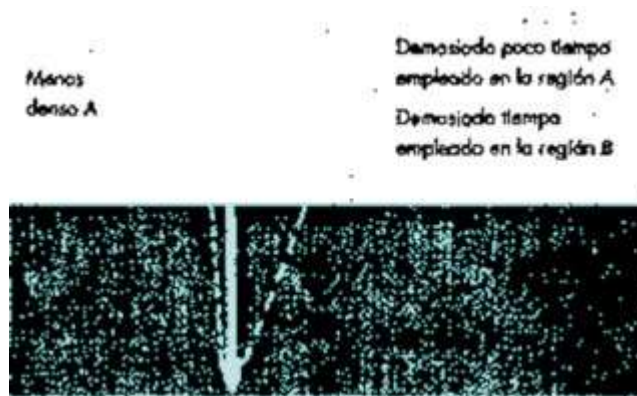
*Ley de Snell*

Ahora bien, ¿por qué se dobla la luz? Bueno, si la luz estuviera constituida de partículas, como creían Newton y otros, podría entenderse esta relación si las partículas ganaran velocidad al pasar de un medio al otro. Serían literalmente arrastradas hacia delante, moviéndose más efectivamente en una dirección perpendicular a la superficie que han cruzado. Sin embargo, esta explicación parecía vidriosa incluso entonces. Después de todo, en un medio más denso cualquiera de esas partículas encontraría presumiblemente mayor resistencia a su movimiento, igual que los coches en una carretera acaban moviéndose más lentamente cuando el tráfico es muy denso. Existe, sin embargo, otra posibilidad, como demostró el físico holandés Christiaan Huygens en 1690. Si la luz fuera una onda y no estuviera hecha de partículas, entonces de la misma forma que un sonido se dobla hacia dentro cuando va más lento, lo mismo le

ocurriría a la luz si también se hiciera más lenta en un medio más denso, de manera que la ley de Snell proporciona una importante evidencia de que la luz se comporta, en este caso, como una onda.

Casi treinta años antes del trabajo de Huygens, Fermat razonó también que la luz debería viajar más lentamente en medios densos que en otros menos densos. Sin embargo, en lugar de razonar en términos de si la luz era onda o partícula, Fermat el matemático mostró que en este caso se podía explicar la trayectoria de la luz en términos de un principio matemático general, que ahora conocemos como «principio de Fermat de tiempo mínimo». Como él demostró, la luz seguiría precisamente la misma trayectoria doblada determinada por Snell si «la luz viaja entre dos puntos dados siguiendo el camino de tiempo mínimo».

Esto puede entenderse heurísticamente de la manera siguiente: si la luz viaja más rápidamente en el medio menos denso, entonces para ir de  $A$  a  $B$  (véase la figura) en el tiempo más corto, tendría sentido viajar una distancia mayor en ese medio y una distancia menor en el segundo medio, donde viaja más lentamente. Ahora bien, no puede viajar demasiado tiempo en el primer medio, ya que entonces la distancia extra que recorre superaría la ganancia obtenida al viajar a mayor velocidad. No obstante, un camino es precisamente el correcto, y este camino resulta que describe una trayectoria doblada que reproduce exactamente la de la ley de Snell.



### *Ley de Snell*

El principio de Fermat de tiempo mínimo es una manera matemáticamente elegante de determinar el camino que sigue la luz sin recurrir a ninguna descripción mecanicista en términos de ondas o partículas. El único problema es que, cuando se piensa acerca de su base física, este resultado parece sugerir *intencionalidad*, de manera que, igual que un usuario del transporte público escuchando el informe del tráfico un lunes por la mañana en hora punta, la luz de algún modo considera todos los caminos posibles antes de embarcarse en su viaje y escoge finalmente el que la lleva más rápidamente a su destino.

Pero lo fascinante es que no necesitamos adscribir ninguna intencionalidad a los viajes de la luz. El principio de Fermat es un ejemplo maravilloso de una propiedad de la física aún más notable, una propiedad en el centro del asombroso y *a priori* inesperado hecho de que la naturaleza es comprensible mediante las matemáticas. Si existe alguna propiedad que fuera un faro guía del enfoque de la física de Richard Feynman, y esencialmente de todos sus descubrimientos, es esta, que él consideraba tan importante

que se refirió a ella en dos ocasiones durante su discurso al recibir el Premio Nobel. En primer lugar, escribió:

*Siempre me parece extraño que las leyes fundamentales de la física, cuando se descubren, puedan aparecer en tantas formas diferentes que no son aparentemente idénticas al principio, y que luego, con una pizca de matemáticas, pueda mostrarse la relación entre ellas... Es algo que he aprendido de la experiencia. Siempre hay otra manera de decir lo mismo que no se parece en nada a la manera en que se había dicho antes... Creo que de algún modo es una representación de la simplicidad de la naturaleza. No sé lo que significa que la naturaleza escoja estas curiosas formas, pero tal vez es una manera de definir la simplicidad. Quizás una cosa es simple si puede describirse por completo de varias formas distintas sin saber inmediatamente que se está describiendo la misma cosa.*

Y más adelante (y más importante para lo que vendrá después) añadió:

*Las teorías de lo conocido, descritas mediante ideas físicas distintas, pueden ser equivalentes en todas sus predicciones y son, por consiguiente, imposibles de distinguir científicamente. Sin embargo, no son psicológicamente idénticas cuando se trata de ir de esa base a lo desconocido. Pues diferentes perspectivas sugieren clases diferentes de modificaciones que podrían efectuarse y, por tanto, no son equivalentes en las hipótesis*



*generadas a partir de ellas al intentar entender lo que aún no se entiende.*

El principio de Fermat del tiempo mínimo representa un claro ejemplo de esa extraña redundancia de la ley física que tanto fascinaba a Feynman, y también de los diferentes «servicios psicológicos» de las distintas prescripciones. Pensar sobre la curvatura de la luz en términos de fuerzas eléctricas y magnéticas en la separación entre los medios revela algo sobre las propiedades de estos. Pensar en términos de la velocidad de la luz en sí misma revela algo sobre el intrínseco carácter ondulatorio de la luz. Y pensar en términos del principio de Fermat puede que no revele nada sobre fuerzas específicas ni sobre la naturaleza ondulatoria de la luz, pero sí revela algo profundo acerca de la naturaleza del movimiento. Felizmente, y lo que es importante, todas esas descripciones dan lugar a predicciones idénticas.

De modo que podemos estar tranquilos. La luz no *sabe* que está tomando el camino de tiempo más corto; solo *actúa* así.

Sin embargo, no fue el principio de tiempo mínimo, sino una idea aún más sutil, lo que cambió la vida de Feynman aquel decisivo día en el instituto de bachillerato. Como Feynman lo describió después: «Cuando estaba en bachillerato, mi profesor de física —que se llamaba Mr. Bader— me llamó un día al acabar la clase y me dijo: “Pareces aburrido; deseo decirte algo interesante”. Entonces me habló de algo que encontré absolutamente fascinante y que, desde entonces, siempre he encontrado fascinante... El principio de

mínima acción». «Mínima acción» puede sonar como una expresión más apropiada para describir el comportamiento de un servicio de atención al cliente de la compañía telefónica que para una disciplina como la física, que, después de todo, está centrada en describir acciones. Pero el principio de mínima acción es muy similar al principio de Fermat de tiempo mínimo.

El principio de tiempo mínimo nos dice que la luz siempre sigue el camino de tiempo más corto. Pero ¿qué pasa con los balones de fútbol, las balas de cañón, los planetas y los bumeranes? Ellos no se comportan necesariamente de manera tan simple. ¿Hay algo diferente al tiempo que se hace mínimo cuando estos objetos siguen los caminos prescritos por las fuerzas que actúan sobre ellos?

Considérese cualquier objeto en movimiento; por ejemplo, un cuerpo que cae. Se dice que un objeto tal posee dos clases de energía. Una es la *energía cinética*, y está relacionada con el movimiento de los objetos (viene de «movimiento» en griego). Cuanto más rápidamente se mueve un cuerpo, mayor es su energía cinética. La otra parte de la energía de un objeto es más sutil, como se refleja en su nombre: *energía potencial*. Esta clase de energía puede estar oculta, pero es responsable de la capacidad de que un objeto realice trabajo después. Por ejemplo, un objeto pesado que cae desde lo alto de un edificio, aplastando la capota de un coche, producirá más daño, y por tanto más trabajo, que si cayera desde unos centímetros por encima del coche. Claramente, cuanto más alto se halle el objeto, mayor es su potencial para realizar trabajo y, por consiguiente, mayor es su energía potencial.

Ahora bien, lo que afirma el principio de mínima acción es que la *diferencia* entre la energía cinética de un objeto en cualquier instante y su energía potencial en el mismo instante, calculada en cualquier punto a lo largo de un camino y después sumada a lo largo del camino, será menor para el camino real que toma el objeto que para cualquier otra trayectoria posible. El objeto ajusta su movimiento de manera que la energía cinética y la energía potencial tengan, de media, los valores más cercanos dentro de lo posible.

Si esto parece misterioso y no intuitivo es porque lo es. ¿Cómo demonios se le ocurriría a alguien esa combinación y mucho menos aplicarla al movimiento de objetos cotidianos?

Esto lo hemos de agradecer al matemático italo-francés Joseph Louis Lagrange, más conocido por su trabajo en mecánica celeste. Por ejemplo, determinó los puntos en el sistema solar donde las atracciones gravitatorias de los diferentes planetas se cancelan precisamente entre sí en el sistema de referencia del cuerpo en órbita. Estos son los llamados «puntos de Lagrange». La NASA envía en la actualidad numerosos satélites a estos puntos de manera que pueden permanecer en órbitas estables y estudiar el universo.

Sin embargo, la mayor contribución de Lagrange a la física puede haber tenido que ver con su reformulación de las leyes del movimiento. Las leyes de Newton relacionan el movimiento de los objetos con las fuerzas netas que actúan sobre ellos. Sin embargo, Lagrange logró mostrar que las leyes del movimiento de Newton eran precisamente reproducidas si se usaba la *acción*, que es la suma sobre una trayectoria de las diferencias entre las energías

cinética y potencial, ahora apropiadamente llamada «una lagrangiana», y entonces determinó precisamente qué tipos de movimiento producirían las trayectorias que minimizaban esta cantidad. El proceso de minimización, que requería el uso del cálculo (también inventado por Newton), dio muchas descripciones matemáticas diferentes del movimiento a partir de las leyes de Newton, pero, en el espíritu de Feynman, eran matemáticamente idénticas, aunque fueran «psicológicamente» distintas.

Fue este extraño principio de mínima acción, llamado frecuentemente «principio de Lagrange», lo que Mr. Bader presentó al quinceañero Feynman. Muchos de esa edad no lo habrían encontrado fascinante o ni siquiera comprensible, pero Feynman sí, o así lo recordaba de viejo.

No obstante, si Feynman había tenido entonces alguna sospecha de que este principio volvería para colorear completamente la historia de su vida, ciertamente no se comportó así cuando empezó a aprender más sobre física al entrar en el MIT. Todo lo contrario. Su mejor amigo en su época de estudiante en el MIT, Ted Welton, con quien trabajó mucho a lo largo de los cursos de grado e incluso de posgrado, describió más tarde cómo «Feynman rehusaba de manera insensata aceptar que Lagrange podía tener algo útil que decir sobre física. Todos los demás estábamos impresionados por la concisión, elegancia y utilidad de la formulación lagrangiana, pero Dick insistía obstinadamente en que la física real reside en identificar todas las fuerzas y resolverlas apropiadamente en componentes».

La naturaleza, como la vida, da muchas vueltas, y, lo que es más importante, es tremendamente insensible a las alegrías y los disgustos de uno. Por mucho que Feynman tratara pronto de focalizarse en entender el movimiento de una manera intrincada con su intuición ingenua, su propia trayectoria hacia la grandeza implicaba un camino muy diferente. No había ninguna mano oculta guiándolo. En cambio, él forzó su intuición a inclinarse a las demandas de los problemas del momento, y no viceversa. El desafío requería incontables horas, días y meses de duro trabajo entrenando su mente para darle vueltas a un problema que las mayores inteligencias de la física del siglo XX no habían sido capaces de resolver hasta entonces.

Cuando realmente lo necesitaba, Feynman se encontraba volviendo una vez más al mismo principio que lo había dirigido hacia la física en primer lugar.

## Capítulo 2

### El universo cuántico

*Siempre estuve preocupado por la física. Si la idea parecía deleznable, yo decía que parecía deleznable. Si parecía buena, yo decía que era buena.*

*RICHARD FEYNMAN*

Feynman tuvo la suerte de toparse con Ted Welton en el MIT, donde ambos asistían, como únicos estudiantes de segundo año, a un curso avanzado de física teórica. Espíritus afines, ambos habían estado inspeccionando textos de matemática avanzada en la biblioteca, y, tras un breve periodo tratando de superarse el uno al otro, decidieron colaborar «en la lucha contra una pandilla de estudiantes de cursos más altos y graduados de aspecto agresivo» de la clase.

Se impulsaron el uno al otro hacia nuevas metas, pasándose y volviéndose a pasar un cuaderno en el que cada uno contribuía a encontrar soluciones y formular preguntas sobre temas que iban de la relatividad general a la mecánica cuántica, los cuales parece ser que habían aprendido por sí mismos. Esto no solo estimuló el aparentemente indestructible afán de Feynman de deducir todas las leyes físicas a su manera, sino que también le proporcionó algunas lecciones prácticas que permanecerían con él toda su vida. Una en particular es digna de comentarse. Feynman y Welton habían

tratado de determinar los niveles de energía del átomo de hidrógeno generalizando la ecuación estándar de la mecánica cuántica, llamada «ecuación de Schrödinger», para incorporar los resultados de la relatividad especial de Einstein. Al hacer esto, descubrieron la que en la actualidad es una ecuación bien conocida, la ecuación de Klein-Gordon. Desgraciadamente, cuando Welton urgió a Feynman a aplicar esta ecuación para entender el átomo de hidrógeno, el intento produjo unos resultados que estaban en total desacuerdo con los resultados experimentales. Esto no es sorprendente porque se sabía que la ecuación de Klein-Gordon no es la apropiada para describir electrones relativistas, como el brillante físico teórico Paul Dirac había demostrado tan solo una década antes, lo que le valió el Premio Nobel por deducir la ecuación correcta.

Feynman describió esta experiencia como una «terrible» pero muy importante lección que nunca olvidaría. Aprendió a no confiar en la belleza de una teoría matemática o su «maravillosa formalidad», sino más bien a reconocer que la prueba de una buena teoría residía en si uno es capaz de «contrastarla con lo real»; es decir, con los datos experimentales.

Feynman y Welton no aprendieron toda la física por sí mismos. También asistían a clase. Durante el segundo semestre de su segundo año habían impresionado lo suficiente al profesor de su curso de física teórica, Philip Morse, para que este les invitara a ambos, junto con otro estudiante, a estudiar mecánica cuántica con él en una tutoría privada una hora por semana durante su tercer año. Más tarde les propuso empezar un programa de «investigación

real» en el que calcularon propiedades de átomos más complicados que el hidrógeno, y en este proceso también aprendieron a trabajar con la primera generación de las llamadas «máquinas calculadoras», otra destreza que más tarde le serviría mucho a Feynman.

En el último curso de pregrado, Feynman ya había dominado esencialmente la mayoría de los temas de pregrado y grado de física y estaba muy entusiasmado ante la perspectiva de una carrera investigadora que había decidido seguir ya en el bachillerato. De hecho, tan impresionante era su progreso que durante su tercer año el departamento de Física recomendó que se le concediera el título de diplomado en tres años en lugar de cuatro. La universidad denegó la recomendación, así que, en vez de ello, durante su último año continuó con su investigación y escribió un artículo sobre la mecánica cuántica de las moléculas, que se publicó en la prestigiosa *Physical Review*, así como otro sobre rayos cósmicos. También dedicó algún tiempo a reforzar su interés en las aplicaciones de la física, y se apuntó a cursos de metalurgia y de laboratorio —cursos que después le servirían mucho en Los Alamos— e incluso construyó un ingenioso mecanismo para medir las velocidades de diversas varas rotatorias.

No todo el mundo estaba convencido de que Feynman fuera a dar el siguiente gran paso en su educación. Ni su padre ni su madre habían acabado el bachillerato, y no tenían claro que su hijo fuera a completar otros tres años más después de cuatro años de estudio dedicados a obtener el título de grado. El padre de Richard, Melville Feynman, visitó el MIT en otoño de 1938 para hablar con el profesor



Morse y preguntarle si eso merecía la pena, si su hijo era lo suficientemente bueno. Morse le contestó que su hijo era el alumno más brillante que había conocido jamás, y que el curso de posgrado no solo merecía la pena, sino que era un requisito si Feynman deseaba desarrollar una carrera científica. La suerte estaba echada. La preferencia de Feynman era continuar en el MIT. Sin embargo, los profesores de física inteligentes generalmente animan a sus estudiantes, incluso a los mejores, a proseguir sus estudios de posgrado en una institución nueva. Es importante para los estudiantes encontrar al principio de su carrera una perspectiva más amplia de los diferentes estilos de hacer ciencia y de los diversos focos de interés, ya que pasar una carrera académica entera en una institución puede limitar a mucha gente. De modo que el tutor de Feynman, John Slater, insistió en que fuera a otra escuela de posgrado, diciéndole: «Debes descubrir lo que es el resto del mundo».

A Feynman le ofrecieron una beca para la escuela de posgrado de Harvard incluso sin solicitarla porque había ganado la William Lowell Putnam Mathematical Competition en 1939. Este es el concurso nacional (de EE.UU.) de matemáticas para pregraduados más prestigioso y exigente, y entonces estaba en su segunda edición. Recuerdo que cuando yo era un estudiante de grado los mejores estudiantes se unían al equipo de su universidad y resolvían problemas durante meses antes del examen. Nadie resuelve todos los problemas del examen, y muchos años una parte significativa de los candidatos no logra resolver un solo problema. El

departamento de Matemáticas del MIT había pedido a Feynman unirse al equipo del MIT para la competición en su último curso, y la diferencia entre la puntuación de Feynman y las de todos los demás candidatos provenientes de toda la nación sorprendió a los calificadores de la prueba, así que le ofrecieron el premio de una beca para Harvard. Más tarde, Feynman aparentaba ignorar a menudo las matemáticas formales cuando hablaba de física, pero su puntuación en el concurso Putnam demostró que como matemático podía competir con los mejores del mundo.

Pero Feynman rehusó ir a Harvard. Había decidido que deseaba ir a Princeton, supongo que por la misma razón por la que tantos jóvenes físicos querían ir allí: era donde estaba Einstein. Princeton lo había aceptado y le había ofrecido un trabajo como ayudante de investigación del futuro premio Nobel Eugene Wigner. Sin embargo, afortunadamente para Feynman, fue asignado a un joven profesor adjunto, John Archibald Wheeler, un hombre cuya imaginación se ajustaba al virtuosismo matemático de Feynman.

En un homenaje a Feynman tras su muerte, Wheeler citó una discusión en el comité de admisión de graduados en la primavera de 1939, durante la cual una persona hacía notar vehementemente que ningún otro solicitante a entrar en la universidad tenía puntuaciones en física y matemáticas ni siquiera cercanas a las de Feynman (obtuvo el 100% en física), mientras que otro miembro del comité se quejaba a la vez de que nunca habían permitido la entrada a nadie con puntuaciones tan bajas en historia e inglés.

Felizmente para el futuro de la ciencia, prevalecieron la física y las matemáticas.

Curiosamente, Wheeler no mencionó otro tema clave, del que tal vez no era consciente: la llamada «cuestión judía». El jefe del departamento de Física en Princeton había escrito a Philip Morse acerca de Feynman preguntando por su afiliación religiosa y añadiendo: «No tenemos ninguna regla definida contra los judíos, pero hemos de mantener su proporción en el departamento razonablemente pequeña por la dificultad en colocarlos». Finalmente se decidió que Feynman no era suficientemente judío «en modales» y no hubo problemas. El que Feynman, como otros muchos científicos, no estuviera muy interesado en la religión nunca surgió en la discusión.

Más importante que todo esto fue, sin embargo, el hecho de que Feynman había llegado en ese momento a un estadio de su educación en el que podía empezar a pensar acerca de lo realmente excitante, esto es, la física sin sentido. La ciencia de vanguardia se halla siempre al borde de la paradoja y de la inconsistencia, y, como buenos sabuesos, los grandes físicos se centran precisamente en estos elementos porque es donde está la presa.

El problema que Feynman dijo más tarde que «lo había enamorado», siendo estudiante de grado, había sido la parte en común de lo que fue eje de la física teórica durante casi un siglo: la teoría clásica del electromagnetismo. Como muchos problemas profundos, esta puede formularse fácilmente. La fuerza entre dos cargas del mismo signo es positiva y, por tanto, se requiere trabajo para aproximarlas.

Cuanto más se acercan, más trabajo se emplea. Imaginemos ahora un solo electrón. Considerémoslo como una «pelota» de carga con cierto radio. Juntar toda la carga en ese radio para hacer el electrón requeriría entonces trabajo. La energía desarrollada por el trabajo de juntar la carga se llama comúnmente «autoenergía» del electrón.

El problema es que si llegáramos a contraer el electrón hasta un simple punto, su autoenergía se haría infinita, porque se necesitaría una cantidad infinita de energía para juntar toda la carga en un punto. Este problema se conocía desde hacía algún tiempo y habían surgido diversos esquemas para resolverlo, pero el más simple consistía en suponer que el electrón no estaba confinado a un único punto, sino que tenía un tamaño finito.

Sin embargo, entrado el siglo XX este asunto tomó un derrotero diferente. Con el desarrollo de la mecánica cuántica, la imagen de los electrones (y la de los campos eléctrico y magnético) había cambiado completamente. Por ejemplo, la llamada «dualidad onda-partícula», una parte de la teoría cuántica, decía que la luz *y* la materia, en este caso los electrones, se comportaban a veces como partículas y otras como ondas. Así que a la vez que aumentaba nuestra comprensión del universo cuántico, el universo se hacía cada vez más extraño. Y, no obstante, algunos de los enigmas clave de la física clásica desaparecieron. Pero otros permanecieron, y la autoenergía del electrón era uno de ellos. A fin de poner esto en contexto, necesitamos explorar un poco el mundo cuántico.

*La* mecánica cuántica posee dos características principales y ambas desafían completamente nuestra intuición normal acerca del

mundo. Primero, los objetos que se comportan de manera mecánico-cuántica son los supremos multiusos. Son capaces de estar en muchas configuraciones diferentes al mismo tiempo. Esto incluye estar en lugares diferentes y hacer cosas diferentes simultáneamente. Por ejemplo, mientras un electrón se comporta casi como un trompo giratorio, puede también actuar como si estuviera girando en torno a muchas direcciones diferentes a la vez. Si el electrón actúa como si estuviera girando en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de un eje vertical (hacia arriba), decimos que tiene espín *hacia arriba*, y si lo hace en el sentido de las agujas del reloj, tiene espín *hacia abajo*) En cualquier instante, la probabilidad de que un electrón tenga el espín hacia arriba puede ser del 50 % y de que lo tenga hacia abajo puede ser del 50%. Si los electrones se comportaran como sugeriría nuestra intuición clásica, la implicación sería que cada electrón que midamos ha de tener espín hacia arriba o hacia abajo, y que el 50% de los electrones se encontrarán en una configuración y el otro 50% en la otra.

En un sentido esto es cierto. Si medimos los electrones de esta manera, encontraremos que el 50% tiene espín hacia arriba y el 50 %, hacia abajo. *Pero*, y es un *pero* importante, es incorrecto suponer que un electrón está en una u otra configuración antes de hacer la medida. En el lenguaje de la mecánica cuántica, cada electrón se encuentra en una «superposición de estados de espín hacia arriba y espín hacia abajo» antes de la medida. Dicho más brevemente, está girando en los dos sentidos.

¿Cómo sabemos que la suposición de que los electrones se hallan en una u otra configuración es incorrecta? Resulta que podemos realizar experimentos cuyos resultados dependen de lo que el electrón esté haciendo cuando no lo medimos, y los resultados serían distintos si el electrón se hubiera comportado sensatamente, esto es, estando en una u otra configuración entre medidas.

El ejemplo más famoso supone disparar electrones hacia una pared con dos rendijas. Detrás de la pared hay una pantalla centelleante, como la pantalla de los antiguos televisores de válvulas de vacío, que emite luz donde un electrón choca con ella. Si no midiéramos los electrones entre el instante en que abandonan la fuente y el instante en que golpean la pantalla, de manera que no pudiéramos asegurar por qué rendija ha pasado el electrón, veríamos un patrón de parches brillantes y oscuros emergiendo en la pantalla; precisamente la clase de «patrón de interferencia» que veríamos para la luz o las ondas sonoras que atraviesan un instrumento de doble rendija, o, quizá más comúnmente, el patrón de ondas y calma alternativas que aparece con frecuencia cuando convergen dos corrientes de agua. Increíblemente, este patrón emerge incluso si enviamos un solo electrón hacia las dos rendijas cada vez. El patrón, por consiguiente, sugiere que de alguna manera el electrón «interfiere» consigo mismo tras atravesar las dos rendijas a la vez.

A primera vista esta idea parece absurda, así que alteramos ligeramente el experimento. Colocamos un detector no destructivo de electrones al lado de cada rendija y enviamos los electrones. Ahora encontramos que, para cada electrón, tan solo uno de los

detectores señalará que un electrón ha pasado cerca de él cada vez, permitiéndonos asegurar que ciertamente cada electrón atraviesa tan solo una rendija, y además podemos determinar por qué rendija ha pasado.

Hasta aquí todo bien, pero ahora llega el «pateador» cuántico. Si observamos el patrón en la pantalla tras esta aparentemente inocente intervención, el nuevo patrón es completamente diferente del antiguo. Ahora se parece al patrón que obtendríamos si disparásemos balas así a una pantalla a través de la barrera con las dos rendijas; es decir, habrá una mancha brillante detrás de cada rendija y el resto estará oscuro.

De modo que, guste o no, los electrones y otros objetos cuánticos pueden realizar magia clásica haciendo varias cosas diferentes a la vez, al menos siempre que no los observemos en el proceso.

La otra propiedad en el meollo de la mecánica cuántica tiene que ver con el llamado «principio de incertidumbre de Heisenberg». Lo que dice este principio es que hay ciertas parejas de magnitudes físicas, tales como la posición de una partícula y su momento (el producto de la masa y la velocidad), que no pueden medirse a la vez con absoluta precisión. Por muy bueno que sea nuestro microscopio o aparato de medida, el producto de la incertidumbre en la posición por la incertidumbre en el momento nunca da cero; es siempre mayor que cierto número que se conoce como «la constante de Planck». Esta constante es la que determina también el espaciado entre los niveles de energía en los átomos. En otras palabras, si medimos la posición de manera muy precisa de modo que su

incertidumbre sea muy pequeña, esto implica que nuestro conocimiento del momento o de la velocidad de la partícula ha de ser muy impreciso, de modo que el producto de las incertidumbres en posición y momento excede el valor de la constante de Planck.

Hay otras «parejas de Heisenberg», como la energía y el tiempo. Si medimos el estado cuántico de una partícula o de un átomo en un tiempo muy corto, tendremos una gran incertidumbre en la energía medida de la partícula o del átomo. Para medir la energía con precisión, hemos de medir el objeto durante un intervalo temporal suficientemente largo, en cuyo caso no podemos decir exactamente cuándo se ha medido la energía.

Por si esto no fuera suficientemente malo, el mundo cuántico se torna aún más extraño si añadimos a la mezcla la teoría de la relatividad especial de Einstein, en parte porque la relatividad pone en pie de igualdad masa y energía; si disponemos de suficiente energía, podemos crear algo con masa.

Así pues, si reunimos todas estas cosas —multiplicidad cuántica, principio de incertidumbre de Heisenberg y relatividad—, ¿qué obtenemos? Obtenemos una imagen de los electrones que es literalmente infinitamente más confusa que la de la teoría clásica, la cual ya conducía a una autoenergía del electrón infinita.

Por ejemplo, cuando tratamos de describir un electrón, ¿este no tiene por qué ser solo un electrón! Para entender esto, retrocedamos al electromagnetismo clásico. Una de las características clave en el meollo de esta teoría es que si agitamos un electrón, emitirá radiación electromagnética, como luz u ondas de radio. Este gran



descubrimiento surgió de los decisivos experimentos de Michael Faraday, Christian Oersted y otros, en el siglo XIX, y del trabajo teórico fundamental de James Clerk Maxwell. Este fenómeno observado debe ser predicho por la mecánica cuántica, porque si esta teoría ha de describir apropiadamente el mundo más le vale que sus predicciones estén de acuerdo con el experimento. Pero la nueva característica clave aquí es que la mecánica cuántica nos dice que hemos de tener en cuenta que la radiación está constituida de *cuantos* individuales, o paquetes de energía, llamados «fotones»

Volvamos ahora al electrón. El principio de Heisenberg nos dice que si medimos el electrón durante algún tiempo finito sigue habiendo cierta incertidumbre finita en el conocimiento de su energía exacta. Pero, si hay cierta incertidumbre, ¿cómo sabemos que estamos midiendo solo el electrón? Por ejemplo, si el electrón emite un fotón que transporta muy poca energía, la energía total del sistema cambiará, aunque muy ligeramente. Pero si no conocemos la energía exacta del sistema, no podemos decir si se ha emitido o no un fotón de baja energía. De modo que lo que estamos midiendo podría realmente ser la energía de un electrón más un fotón emitido por este.

Pero ¿por qué detenerse aquí? Quizás el electrón ha emitido un número infinito de fotones de muy baja energía. Si lo observamos durante un tiempo suficientemente largo, podemos a la vez medir su energía de manera muy precisa y colocar un contador de fotones cerca para ver si hay fotones alrededor. En este caso, ¿qué les habrá sucedido a todos los fotones que viajaban junto al electrón en el

interin? Muy sencillo: el electrón puede absorber todos esos fotones antes de que se tenga la oportunidad de medirlos. El tipo de fotones que un electrón puede emitir y reabsorber en una escala temporal tan corta que no podemos medirlos se llama «partículas virtuales», y, como describiré más adelante, Feynman se dio cuenta de que al incluir los efectos de la relatividad junto a los de la mecánica cuántica no hay manera de librarse de la existencia de estas partículas. Así que si pensamos en un electrón moviéndose, hemos de considerarlo como un objeto bastante complicado, rodeado de una nube de partículas virtuales.

Las partículas virtuales desempeñan otro papel importante en la teoría cuántica del electromagnetismo: cambian la manera en que consideramos los campos eléctricos y magnéticos y las fuerzas entre partículas. Digamos, por ejemplo, que un electrón emite un fotón. Este fotón puede a su vez interactuar con otro electrón, el cual puede absorberlo. Dependiendo de la energía del fotón, esto dará lugar a una transferencia de energía y de momento entre ambos electrones. Pero esto es lo que normalmente describimos como la manifestación de la fuerza electromagnética entre esas dos partículas cargadas.

Realmente, como veremos, en el mundo cuántico las fuerzas eléctricas y magnéticas pueden considerarse como causadas por el intercambio de fotones virtuales. Puesto que el fotón no tiene masa, un fotón emitido puede transportar una cantidad arbitrariamente pequeña de energía. Así pues, como nos dice el principio de incertidumbre de Heisenberg, el fotón puede viajar una distancia

arbitrariamente larga (empleando un tiempo arbitrariamente largo) entre partículas antes de tener que ser reabsorbido para que la energía que transporta se devuelva al electrón. Esta es precisamente la razón de que la fuerza electromagnética entre partículas pueda actuar a larga distancia. Si el fotón tuviera masa, siempre transportaría una energía mínima,  $E = mc^2$ , siendo  $m$  su masa, y para que esta violación de la conservación de la energía permanezca oculta en las incertidumbres cuánticas, el principio de Heisenberg implica que el fotón debe ser reabsorbido ya sea por el electrón de partida o por otro dentro de algún tiempo fijo, o de manera equivalente dentro de alguna distancia fija.

Estamos adelantándonos, o al menos adelantando a Feynman en esta época de su vida, pero el introducir en este punto estas complicaciones tiene un motivo. Porque si todo esto parece muy complicado y difícil de describir, súmese a la muchedumbre, especialmente a la muchedumbre en la época anterior a la Segunda Guerra Mundial. Este es el mundo de la física fundamental en el que Feynman entró como estudiante, y era un mundo donde las extrañas nuevas reglas parecían conducir al absurdo. La autoenergía del electrón, por ejemplo, seguía infinita en la teoría cuántica, debido aparentemente a que el electrón podía emitir y reabsorber fotones de una energía arbitrariamente alta siempre que lo hiciera en escalas de tiempo muy pequeñas.

Pero la confusión era incluso peor. La teoría cuántica se ajustaba bien globalmente a los resultados experimentales. Pero cuando los físicos trataron de calcular predicciones precisas a fin de comparar

con resultados experimentales muy finos (por ejemplo, si incluían el intercambio entre partículas no solo de un fotón sino de más de un fotón, proceso que tendría que aparecer más raramente que el intercambio de un solo fotón), encontraron que la contribución adicional debida a este efecto de «orden superior» era infinita. Además, los cálculos en teoría cuántica necesarios para explorar estos infinitos eran horrendamente difíciles y tediosos, necesitando las mejores mentes de entonces meses, literalmente, para efectuar uno de esos cálculos.

Cuando aún era un estudiante de grado, Feynman tuvo una idea que llevó consigo al curso de posgrado. ¿Qué pasaría si la «imagen» clásica del electromagnetismo, aquí descrita, no fuera correcta? ¿Qué sucedería si, por ejemplo, existiera una «nueva» regla según la cual una partícula cargada no pudiera interactuar consigo misma? Esto, de hecho, libraría de la autoenergía infinita de un electrón porque este no podría interactuar con su propio campo. Hago énfasis en que el infinito para cuya anulación fue diseñada esta nueva regla aparece en la teoría puramente clásica. Incluso sin considerar efectos cuánticos. Clásicamente, los campos eléctricos y magnéticos están completamente determinados por el movimiento de las partículas cargadas que los producen, así que para Feynman la misma idea de campo era redundante. En otras palabras, una vez se especifican la configuración inicial de las cargas y su movimiento, podría en principio determinarse su movimiento posterior considerando simplemente el impacto directo de las cargas entre sí.

Más aún, Feynman razonó que si pudiéramos deshacernos del campo electromagnético en la teoría clásica, ello podría asimismo resolver los problemas cuánticos, porque si pudiéramos deshacernos del infinito número de fotones que pululan en los cálculos en teoría cuántica, tal vez podríamos obtener respuestas sensatas. Como dijo en su discurso al recibir el Premio Nobel: «Bueno, me parecía completamente evidente que la idea de que una partícula actúe sobre ella misma no es necesaria; de hecho es bastante tonta. Y así me sugerí a mí mismo que los electrones no pueden actuar sobre sí mismos; solo lo pueden hacer sobre otros electrones. Esto significa que el campo electromagnético no existe en absoluto. Había una interacción directa entre cargas, aunque con retardo».

Se trataba de ideas atrevidas, y Feynman las llevó al curso de posgrado de Princeton, y a John Archibald Wheeler, que era precisamente el hombre que podía divulgarlas. Para mí, John Wheeler era un alma gentil y cordial, un hombre cortés y considerado hasta el límite, como un perfecto caballero sureño (aunque fuera de Ohio). Pero cuando hablaba de física, de pronto se tornaba en alguien osado e intrépido. En palabras de uno de sus colegas de entonces en Princeton: «En algún lugar de esa cortés fachada había un tigre suelto [...] que tenía el coraje de examinar cualquier problema disparatado». Esta clase de intrepidez se ajustaba exactamente a las predicciones intelectuales de Feynman. Recuerdo haber causado algunas risas cuando en una ocasión cité a Feynman diciendo en una carta a un potencial joven físico:

«Malditos sean los torpedos. Adelante a toda máquina». Por supuesto, Feynman estaba imitando al almirante David Farragut, pero este hecho histórico parecía irrelevante; esa frase se aplicaba igualmente bien a Feynman y a Wheeler.

Fue un encuentro celestial. Lo que siguió en Princeton fue un intenso periodo de tres años de un intercambio intelectual entre dos mentes resonantes; física como tiene que ser. Ninguno de los dos descartaba de inmediato las ideas del otro. Como después escribiría Wheeler: «Estoy eternamente agradecido por la fortuna que nos unió en más de una empresa fascinante... Las discusiones se tornaban en risa, la risa en bromas, y las bromas en más toma y daca y más ideas. Por más de uno de mis cursos, él conocía mi creencia de que lo que es importante es en el fondo tremendamente simple».

La primera vez que Feynman presentó a Wheeler su disparatada idea, este no se mofó de él. En lugar de ello, Wheeler señaló inmediatamente sus defectos, reforzando el axioma: «La fortuna favorece a las mentes preparadas», pues también Wheeler había estado pensando según líneas muy similares.

Feynman se había dado cuenta antes de un defecto clamoroso de su idea. Es bien sabido que se necesita más trabajo para acelerar una partícula cargada que una neutra, porque en el proceso de aceleración una partícula cargada emite radiación y disipa energía. Por consiguiente, una partícula cargada sí que parece actuar sobre sí misma al producir una resistencia extra (llamada «resistencia a la radiación») a ser impulsada. Feynman había esperado poder resolver este problema al considerar la reacción de vuelta sobre la partícula,

no proveniente de ella misma, sino debida al movimiento de todas las demás cargas de la naturaleza que estarían afectadas por sus interacciones con la primera partícula. Es decir, la fuerza de la primera partícula sobre las otras causaría que estas se movieran, y el movimiento de estas produciría corrientes eléctricas que podrían entonces reaccionar sobre la primera partícula.

Cuando escuchó por primera vez estas ideas, Wheeler respondió señalando que, si ese fuera el caso, la resistencia a la radiación producida por la primera partícula dependería de la posición de las otras cargas, lo que no sucede, y además estaría retardada porque ninguna señal puede viajar a mayor velocidad que la luz. Le llevaría entonces tiempo a la primera partícula el interaccionar con la segunda (separada a cierta distancia) e incluso aún más tiempo a la segunda partícula reaccionar sobre la primera, lo que se traduciría en una reacción de vuelta considerablemente retardada en el tiempo en comparación con el movimiento inicial de la primera partícula.

Pero entonces Wheeler sugirió una idea aún más disparatada. ¿Qué pasaría si la reacción de esas otras cargas actuara de alguna manera hacia atrás en el tiempo? Entonces, en lugar de que la reacción de vuelta de esas partículas sobre la primera partícula ocurriera después de que esta ha empezado a moverse, podría ocurrir exactamente al mismo tiempo en que empezara a moverse. En este punto un principiante sensato podría decir: «Espera un momento, ¿no es eso un disparate? Si las partículas pueden reaccionar hacia atrás en el tiempo, ¿no viola esto los principios

sagrados de la física, como la causalidad, que requiere que las causas tengan lugar antes que los efectos?».

Pero aunque el permitir reacciones hacia el pasado abre en principio el camino a esa posibilidad, para descubrir si esto causa realmente problemas, los físicos han de ser más precisos y ante todo efectuar los cálculos. Y esto es lo que hicieron Wheeler y Feynman. Estuvieron dándole vueltas a la cuestión para ver si podían fijar los problemas sin crear otros nuevos, y se mostraban dispuestos a suspender la incredulidad hasta que sus resultados requirieran no hacerlo.

Como primera consecuencia, basada en su reflexión anterior sobre estos temas, Wheeler fue capaz, con Feynman, de llegar a que la reacción a la radiación podía deducirse en este caso de modo que fuera independiente de la situación de las otras cargas, y podía en principio asimismo hacerse que ocurriera en el tiempo apropiado y no en un tiempo posterior (retardado).

La propuesta de Wheeler tenía sus propios problemas, pero hizo pensar y calcular a Feynman. Este analizó los detalles y determinó precisamente cuánta reacción hacia atrás en el tiempo entre partículas era necesaria para que las cosas funcionaran correctamente, y, como era típico de él, comprobó un montón de ejemplos diferentes para poder asegurarse de que esta idea no daba lugar a fenómenos disparatados no observados o a violaciones del sentido común. Desafió a sus amigos a encontrar un ejemplo que llegara a dejarlo confundido, y mostró que siempre que en toda dirección del universo se encontrara a la larga con total certeza una



partícula cargada que podía interaccionar hacia atrás con la partícula original, nunca podrían usarse esas alocadas interacciones hacia el pasado para fabricar un aparato que se encendiera antes de darle al botón de encendido, o algo parecido.

Como Humphrey Bogart podría haber dicho, fue el comienzo de una hermosa amistad. Mientras que Feynman poseía brillantez matemática y una admirable intuición, Wheeler tenía experiencia y perspectiva. Wheeler era capaz de derribar rápidamente algunos de los conceptos erróneos de Feynman y sugerir mejoras, pero tenía una mente abierta y animaba a Feynman a explorar y a adquirir experiencia de cálculo, adecuada para hacer pareja con su talento. En cuanto Feynman combinara ambas cosas, sería casi imparable.

## Capítulo 3

### Una nueva manera de pensar

*Una idea que al principio parece completamente paradójica, si se analiza por completo en todos sus detalles y en situaciones experimentales, puede de hecho no serlo.*

*RICHARD FEYNMAN*

A pesar de las garantías de los profesores universitarios de Feynman, Melville Feynman no dejaba de preocuparse por el futuro de su hijo. Después de que Richard hubiera empezado su relación de trabajo con John Archibald Wheeler en el curso de posgrado, Melville viajó a Princeton para comprobar una vez más su progreso y sus perspectivas. De nuevo se le dijo que Richard tenía un brillante futuro por delante independiente de su «educación simple» o su posible «prejuicio anti judío», como lo expresaba Melville. Wheeler puede que edulcorara la realidad o meramente reflejara su propia inclinación ecuménica. De estudiante había sido el fundador de la Federación de la Juventud de la Iglesia y la Sinagoga.

Sin embargo, cualquier antisemitismo existente en la universidad no habría sido suficiente para detener la marcha adelante de Feynman. Simplemente, era demasiado bueno y se lo pasaba muy bien. Solo un estúpido no reconocería su genio y su potencial. Como sería una constante en toda su vida, la fascinación de Feynman por

la física, y su capacidad de resolver problemas que otros no podían resolver, se extendía a lo largo del espectro del mundo físico, desde lo esotérico a lo aparentemente normal.

Su travieso apasionamiento se vislumbraba en todo. A los hijos de Wheeler les encantaban sus visitas, en las que les divertía con trucos. Wheeler recordaba una tarde que Feynman pidió una lata y dijo a los niños que podía distinguir si contenía un sólido o un líquido sin abrirla ni mirar la etiqueta. «¿Cómo?», exclamó un coro de voces juveniles. «Por la manera en que da vueltas cuando la lanzo al aire», respondió, y con seguridad estaba en lo cierto.

La propia excitación infantil de Feynman acerca del mundo hizo que su popularidad entre los niños no disminuyera nunca, como se refleja en una carta escrita en 1947 por el físico Freeman Dyson, que era un estudiante de posgrado en Cornell cuando Feynman era profesor asistente allí. Al describir una reunión social en la casa del físico Hans Bethe en honor de un visitante distinguido, Dyson recordaba que el hijo de cinco años de Bethe, Henry, protestaba por que no estuviera Feynman, diciendo: «Quiero que esté Dick. Me dijiste que Dick iba a venir». Al final Feynman llegó. Subió corriendo la escalera y empezó a jugar ruidosamente con Henry, parando toda la conversación de abajo.

Aunque Feynman estuviera entreteniendo a los hijos de Wheeler, ellos dos seguían divirtiéndose mientras trabajaban todo el año para explorar sus exóticas ideas acerca de liberar al electromagnetismo clásico del problema de la auto-interacción de las partículas

cargadas, mediante extrañas interacciones hacia atrás en el tiempo con absorbedores externos situados en un universo infinito.

La motivación de Feynman para continuar este trabajo era sencilla. Deseaba resolver un problema del electromagnetismo clásico con la esperanza de, al final, abordar el problema más serio que surge en la teoría cuántica. Por otro lado, Wheeler tenía una idea incluso más disparatada que deseaba desarrollar para explicar las nuevas partículas que venían observándose en los rayos cósmicos y a la larga en experimentos de física nuclear: tal vez todas las partículas elementales estaban constituidas por diferentes combinaciones de electrones, que interaccionan de manera distinta con el mundo externo. La idea era disparatada, pero al menos ayudaba a mantener su entusiasmo por el trabajo que estaban haciendo.

La propia actitud juguetona de Feynman hacia las inevitables frustraciones y los tropiezos asociados con el trabajo teórico en física viene ejemplificada por una de las primeras cartas a su madre, escrita poco después de empezar el curso de posgrado y antes de que su trabajo con Wheeler lo hubiera movido en la dirección de reexaminar el electromagnetismo:

*La semana pasada las cosas fueron como la seda, pero ahora estoy tropezando con algunas dificultades matemáticas, que o superaré o rodearé, y si no iré por un camino diferente —lo cual me ocupa todo el tiempo—, pero me gusta mucho trabajar y soy verdaderamente muy feliz. Nunca he pensado tanto y tan duramente sobre un problema, así que si no llego a ninguna parte me fastidiará mucho realmente. Sin embargo, ya he*

*llegado a algún sitio, muy lejos, y para satisfacción del profesor Wheeler. No obstante, el problema no se halla en su finalización, aunque estoy empezando a ver cuán lejos se encuentra del final y cómo podríamos llegar allí (aunque las mencionadas dificultades matemáticas se avecinan), ¡qué divertido!*

La idea de diversión de Feynman incluía dominar las dificultades matemáticas; este era uno de los muchos atributos que probablemente le separaban del hombre de la calle.

Tras unos cuantos meses intensos de toma y daca con Wheeler en el otoño e invierno de 1940-1941, trabajando en sus nuevas ideas para el electromagnetismo, Wheeler finalmente le proporcionó a Feynman una oportunidad de presentar estas ideas no a estudiantes de posgrado, sino a físicos profesionales, a través del seminario del departamento de Física de Princeton. Pero esto no iba a ser solo un grupo de colegas. Eugene Wigner, después premio Nobel, dirigía el seminario e invitó, entre otros, a una selección especial de personajes: el famoso matemático John von Neumann; el formidable premio Nobel y uno de los que desarrollaron la mecánica cuántica, Wolfgang Pauli, que era visitante de Zúrich; y nada menos que Albert Einstein, quien había expresado interés en asistir (quizás incitado por el contacto con Wheeler).

He tratado de ponerme en el lugar de Feynman, como un estudiante de posgrado hablando ante semejante grupo. Este no sería un público fácil de agradar, independientemente de su eminencia. Se

sabía, por ejemplo, que Pauli saltaba del asiento y arrebatava la tiza a los conferenciantes con quienes no estaba de acuerdo.

Feynman, no obstante, preparó su charla y, en cuanto empezó, la física se impuso y cualquier nerviosismo desapareció. Como era de esperar, Pauli objetó, interesado en si el uso de reacciones hacia atrás en el tiempo podría haber implicado que se estaba simplemente trabajando matemáticamente hacia atrás a partir de la respuesta correcta sin deducirse realmente nada nuevo. También le interesaba el aspecto de «acción a distancia» de las ideas, una vez han desaparecido los campos que usualmente transportan las fuerzas y la información, y preguntó a Einstein si esto podía ser compatible con su propio trabajo en relatividad general. Einstein respondió humildemente que podría haber un conflicto, pero, después de todo, su propia teoría de la gravitación (considerada por el resto de la comunidad de físicos como el trabajo más significativo desde Newton) «no estaba tan bien establecida». En realidad, Einstein simpatizaba con la idea de usar soluciones tanto hacia atrás como hacia delante en el tiempo, como recordó Wheeler más tarde, cuando él y Feynman fueron a visitar a Einstein a su casa de Mercer Street para hablar más de su trabajo.

El problema es que una de las características más evidentes del mundo físico, manifiesta desde el momento en que nos despertamos cada día, es que el futuro es diferente al pasado. Esto es cierto no solo por la experiencia humana, sino también por el comportamiento de los objetos inanimados. Cuando echamos leche a nuestro café y lo agitamos, nunca veremos que la leche se agrupe

en gotitas separadas como aparecía al verterla en el café. La cuestión es: ¿esta manifiesta irreversibilidad temporal en la naturaleza surge a causa de alguna asimetría en los procesos microscópicos o resulta solo apropiada para el mundo macroscópico de nuestras experiencias?

Einstein, como Feynman y Wheeler, creía que las ecuaciones microscópicas [esto es, fundamentales] de la física deberían ser independientes del sentido del tiempo; es decir, la manifiesta irreversibilidad de los fenómenos en el mundo macroscópico aparece porque ciertas configuraciones son mucho más probables que otras cuando hay un gran número de partículas involucradas. En el caso de las ideas de Feynman y Wheeler, como Feynman había mostrado a su compañero de estudios, la física se comportaba sensatamente a escala macroscópica, esto es, futuro y pasado eran diferentes a pesar de la extraña interacción hacia atrás en el tiempo que él y Wheeler habían introducido. Esto era así precisamente porque las probabilidades asociadas al comportamiento del resto del presumiblemente infinito número de cargas del universo que responden al movimiento de la carga en cuestión producían la clase de irreversibilidad macroscópica que solemos ver en el mundo que nos rodea.

Más tarde, en 1965, y para su gran sorpresa, los físicos descubrieron que ciertos procesos microscópicos de las partículas elementales sí tienen una flecha del tiempo asociada a ellos; es decir, los ritmos de un proceso y de su versión invertida temporalmente son ligeramente distintos. Este resultado era tan

sorprendente que proporcionó el Premio Nobel a los investigadores involucrados. No obstante, aunque este efecto puede desempeñar un importante papel en la comprensión de ciertas características de nuestro universo, incluyendo quizá por qué vivimos en un universo de materia y no de antimateria, la sabiduría convencional aún sugiere que la flecha macroscópica del tiempo está asociada con la tendencia a aumentar el desorden, y surge no de la física microscópica, sino de las probabilidades en el ámbito macroscópico, como Einstein, Feynman y Wheeler habían supuesto.

A la larga, todo este *Sturm und Drang*<sup>1</sup> asociado con la interpretación de las ideas de Feynman y Wheeler estaba fuera de lugar. Las ideas teóricas que ellos habían propuesto acabaron siendo más o menos erróneas, en el sentido de que sus propuestas no se correspondían en último término con la realidad. Los electrones sí tienen auto-interacciones, y los campos electromagnéticos, incluyendo los de las partículas virtuales, son reales. Feynman lo resumió una década después cuando escribió a Wheeler: «Creo que conjeturamos erróneamente en 1941. ¿Estás de acuerdo?». La Historia no ha registrado ninguna respuesta de Wheeler al respecto, pero para entonces la evidencia era indiscutible.

¿Cuál era entonces el mérito de todo ese trabajo? Bueno, en ciencia casi cualquier nueva idea significativa es errónea. O bien trivialmente errónea (hay un error matemático), o más

---

<sup>1</sup> En alemán en el original. Literalmente «tormenta y arrastre». Se refiere primariamente al lema del inicio del movimiento literario romántico alemán a finales del siglo XVIII, pero aquí se emplea en el sentido de «torbellino de ideas». (N. del t.)



sustancialmente errónea (aun siendo la idea tan bella, la naturaleza prefiere no explotarla). Si ese no fuera el caso, hacer avanzar las fronteras de la ciencia sería casi demasiado fácil.

A la luz de esto, los científicos tienen dos elecciones: pueden elegir seguir un camino bien trillado e impulsar un resultado sólido un poco más allá con una razonable seguridad de éxito, o pueden internarse en un territorio nuevo y peligroso donde no hay garantías y han de estar preparados para el fracaso. Esto podría parecer deprimente, pero en el proceso de explorar todas las vías muertas y callejones sin salida, los científicos construyen experiencia e intuición y un conjunto de herramientas intelectuales útiles. Más allá de esto, las ideas inesperadas que resultan de propuestas que no llevan a ninguna parte, al menos en lo concerniente al problema original, a veces pueden guiar a los científicos en una dirección completamente imprevista, que de vez en cuando puede contener la clave del progreso. A veces, ciertas ideas que no funcionan en un área de la ciencia acaban por ser justo lo que se necesitaba para resolver una dificultad en alguna otra. Como veremos, eso ocurrió con el largo viaje de Richard Feynman a través del desierto de la electrodinámica.

En medio del turbulento flujo intelectual en la vida de Feynman durante este periodo, su vida personal también evolucionó profundamente. Desde joven, siendo casi un niño, había conocido y admirado a una chica, la chica de sus sueños, que poseía cualidades que él no tenía: el talento artístico y musical y la confianza social y la gracia que normalmente los acompaña. Arline

Greenbaum había aparecido en su vida ya en bachillerato. La había conocido en una fiesta cuando él tenía quince años y ella trece. Ella debía de tener todo lo que él estaba buscando. Tocaba el piano, bailaba y pintaba. Para cuando él entró en el MIT, ella se había convertido en una integrante más en su vida en familia, pintando un loro en la puerta del ropero familiar o enseñando piano a la hermana de Richard, Joan, y paseando luego con ella.

Nunca sabremos si estas amabilidades eran la manera que tenía Arline de congratularse con Richard, pero estaba claro que había decidido que este era su hombre, y él también estaba entusiasmado. Joan aseguró más tarde que para cuando Richard entró en el MIT, con diecisiete años, el resto de la familia sabía que un día se casarían. Estaban en lo cierto. Arline lo había visitado en su hermandad estudiantil en Boston los fines de semana durante sus primeros años en el instituto, y cuando ya era estudiante del tercer curso de grado él se le había declarado y ella había aceptado.

Richard y Arline eran almas gemelas. No eran clones uno del otro, sino opuestos simbióticos; uno completaba al otro. Arline admiraba el evidente esplendor científico de Richard, y Richard claramente adoraba que ella amara y comprendiera cosas que él podía escasamente apreciar por aquel entonces. Pero lo más importante que compartían era el amor por la vida y el espíritu de aventura.

Su correspondencia durante los cinco años que median entre la declaración de él y la muerte por tuberculosis de ella es profundamente conmovedora. Plena de ingenua esperanza, combinada con amor y respeto mutuo, refleja a dos jóvenes

determinados a seguir su propio camino en el mundo sin importar los obstáculos.

En junio de 1941, cuando Richard estaba siguiendo sus estudios de posgrado, un año antes de su boda, Arline le escribió para darle cuenta de sus visitas a los médicos (hubo muchos diagnósticos equivocados antes de descubrir su verdadera enfermedad), pero la carta se centra en él, no en ella.

*Richard, cariño, te quiero... Aún tenemos que aprender un poco más de este juego de ajedrez de la vida, y no deseo que sacrifiques nada por mí... Sé que debes trabajar muy duro para sacar adelante tu artículo (y resolver otros problemas colaterales). Estoy tremendamente contenta de que vayas a publicar algo; me produce un escalofrío especial el que se reconozca el valor de tu trabajo. Deseo que continúes y des realmente al mundo y a la ciencia todo lo que puedas... Y, si recibes críticas, recuerda que cada uno ama de manera diferente.*

Arline conocía a Richard como nadie más, y por ello tenía el poder de incomodarlo y también de guiarlo para que fuera fiel a sus creencias. Las más importantes eran la honradez y el valor de hacer sus propias elecciones. El título de uno de los más famosos de sus libros autobiográficos, *¿Qué te importa lo que piensen los demás?*, es la pregunta que ella le repetía cuando lo cogía en un momento de timidez o inseguridad, como cuando le envió una caja de lápices, en cada uno de ellos grabada la frase: «¡Richard, cariño, te amo! Putsie»

(Putsie era el nombre cariñoso con el que él la llamaba) y le pilló borrando las palabras por si el profesor Wheeler pudiera verlas cuando estaban trabajando juntos. Si Feynman tuvo el valor de sus convicciones, y a la larga el coraje de seguir su propio camino en el mundo, intelectualmente y de cualquier otra manera, fue debido en gran parte a Arline y a su recuerdo de ella.

Mientras Melville Feynman estaba preocupado por la dirección de la carrera de su hijo, la madre de Richard, Lucille, lo estaba igualmente por su vida personal. Ella con seguridad quería a Arline, pero le envió una carta a su hijo, más avanzada su carrera de posgrado, como muchas madres judías, preocupada de que Arline fuera un lastre en su capacidad de trabajar y obtener un empleo y en sus finanzas. La enfermedad de Arline requeriría cuidados especiales, tiempo y dinero, y a Lucille le preocupaba que Richard no tuviera lo suficiente de estas tres cosas.

Richard respondió, unas semanas antes de recibir su título de doctor en física y casarse con Arline, en junio de 1942, de manera notablemente desapasionada:

*No soy tan bobalicón como para hipotecar toda mi vida futura a causa de una promesa que hice en el pasado bajo circunstancias diferentes... Deseo casarme con Arline porque la quiero, lo que significa que deseo cuidarla. Eso es todo lo que hay... Tengo, sin embargo, otros deseos y propósitos en la vida. Uno de ellos es contribuir tanto como pueda a la física. Esto, en mi mente, tiene incluso más importancia que mi amor por Arline. Resulta por tanto especialmente afortunado que, como puedo ver*

*(sospechar), el casarme con Arline interferirá muy ligeramente, si lo hace de alguna manera, con mi principal tarea en la vida. (Existe incluso la posibilidad de que la felicidad consecuente por el hecho de estar casado y el constante estímulo y simpatía de mi esposa me ayuden en mi esfuerzo; pero, en el pasado, mi amor no ha afectado realmente mucho a mi trabajo en la física, y de hecho no creo que sea de demasiada ayuda en el futuro.) Puesto que siento que puedo llevar a cabo mi tarea principal y a la vez disfrutar del lujo de cuidar a alguien a quien amo, pienso casarme pronto.*

Afectara o no su amor a la física, Arline había reforzado claramente su determinación de seguir sus ideas hasta donde pudieran llevarle. Ella le había ayudado a asegurar su integridad intelectual, y aunque las palabras de su carta parecen algo frías y desapasionadas, Arline se habría animado si las hubiera leído, porque reflejaban la clase de pensamiento racional que tanto deseaba fomentar en el hombre que amaba y admiraba.

Igualmente, ella se habría conmovido por un hecho arrebatador que sucedió mucho después, en el oscuro día de su muerte, el 16 de junio de 1945, seis meses antes de que la bomba atómica que Richard había ayudado a construir explotara sobre Hiroshima. Después de que ella falleciera en la habitación del hospital, él la besó y la enfermera registró la hora del fallecimiento como las 21.21 h. El descubrió más tarde que el reloj de la mesilla se había parado precisamente a esa hora. Una mente menos racional habría

atribuido esto a una maravilla espiritual o una iluminación, el tipo de fenómeno que hace que la gente crea en una inteligencia cósmica superior. Pero Feynman sabía que el reloj era frágil. Lo había arreglado varias veces y razonó que la enfermera debía de haberlo estropeado al cogerlo para comprobar la hora de la muerte de Arline. Él daría prueba de la misma clase de concentración intelectual y determinación para seguir adelante en un camino que empezó en 1941, un camino que a la larga cambiaría profunda e irrevocablemente la forma en que pensamos acerca de nuestro mundo.

La escritora Louise Bogan dijo una vez: «El misterio inicial que acompaña a cualquier viaje es: ¿cómo llegó el viajero a su punto de partida?». En lo que respecta al viaje de Feynman, como a muchos viajes épicos, el comienzo fue bastante simple. Él y Wheeler habían completado su trabajo demostrando que el electromagnetismo podía exponerse de manera que solo estuvieran involucradas interacciones directas, aunque hacia delante y hacia atrás en el tiempo, entre partículas cargadas distintas. Al hacer eso, se podía obviar el problema de la autoenergía infinita de cualquier partícula cargada. El desafío siguiente era ver si esta teoría podía ponerse de acuerdo con la mecánica cuántica y resolver posiblemente los espinosos problemas matemáticos que surgían en una teoría cuántica del electromagnetismo.

El único problema era que su bastante exótica teoría —equipada con interacciones a diferentes tiempos y en diferentes lugares a fin de ser equivalente al electromagnetismo clásico, y que tenía campos

eléctricos y magnéticos que transmitían esas interacciones— requería una forma matemática imposible de manejar en la mecánica cuántica de entonces. El problema tenía su origen en las interacciones entre partículas a tiempos distintos, o, como lo expresara Feynman más tarde: «La trayectoria de una partícula en un instante dado viene determinada por la de otra partícula en un instante diferente. Si se trata de describir, por tanto, las cosas [...] diciendo cuáles son las condiciones presentes de las partículas y cómo estas condiciones presentes afectarán al futuro, se ve que esto es imposible solo con partículas, porque algo que estas hicieron en el pasado va a afectar al futuro». Con respecto a este punto, la mecánica cuántica estaba basada en un simple principio: si supiéramos o nos dijeran el estado cuántico de un sistema en un instante, las ecuaciones del movimiento de la mecánica cuántica nos permitirían determinar la ulterior evolución dinámica del sistema. Desde luego, conocer exactamente la evolución dinámica del sistema no es lo mismo que predecir exactamente lo que mediríamos posteriormente. La evolución dinámica de un sistema cuántico implica determinar con precisión no el estado final del sistema, sino más bien un conjunto de probabilidades que nos dice cuál es la verosimilitud de que el sistema que está midiéndose se halle en un estado específico en un instante posterior.

El problema es que la electrodinámica en la formulación de Wheeler y Feynman requería conocer las posiciones de muchas otras partículas en muchos instantes diferentes para determinar el estado de una partícula dada en un instante concreto. En un caso así, los

métodos cuánticos estándar para determinar la posterior evolución dinámica de dicha partícula fallaban.

Feynman había tenido éxito durante el otoño e invierno de 1941-1942 al formular su teoría (de Feynman y Wheeler) de un sinnúmero de maneras diferentes, si bien matemáticamente equivalentes. Durante el proceso había descubierto que podía reescribir completamente la teoría en términos del mismísimo principio al que había renunciado cuando era un estudiante de grado.

Recuérdese que Feynman había aprendido en el bachillerato que existía una formulación de las leyes del movimiento que estaba basada no en lo que sucedía en un solo instante, sino en lo que sucedía en cualquier instante: el formalismo de Lagrange y el principio de mínima acción.

Recuérdese asimismo que el principio de mínima acción nos dice que para determinar la trayectoria clásica real de una partícula podemos considerar todos los caminos posibles de la partícula entre sus puntos inicial y final y entonces determinar cuál da el menor valor medio posible para la acción (definida como la diferencia entre dos partes diferentes de la energía total de la partícula —las llamadas «energía cinética» y «energía potencial»— sumadas de manera apropiada sobre cada camino). Este era el principio que Feynman consideraba demasiado elegante, prefiriendo calcular las trayectorias teniendo en cuenta las fuerzas en cada punto y aplicando las leyes de Newton. La idea de tener que preocuparse por la trayectoria completa de una partícula para calcular su



comportamiento en cualquier punto le parecía poco física a Feynman en ese momento.

Pero Feynman el estudiante de posgrado había descubierto que su teoría con Wheeler podía ser completamente reformulada en términos de un principio de acción, descrito puramente por las trayectorias de las partículas cargadas a lo largo el tiempo, sin necesidad de considerar campos eléctricos y magnéticos. En retrospectiva, parece claro por qué tal formalismo, que se centraba en los caminos de las partículas, era apropiado para describir la teoría de Feynman- Wheeler. Después de todo, son esos caminos los que esencialmente definían su teoría, la cual dependía completamente de las interacciones entre partículas que se mueven a lo largo de trayectorias distintas en el tiempo. Por consiguiente, para construir una teoría cuántica, Feynman decidió que sería preciso idear cómo hacer mecánica cuántica para un sistema como el que Wheeler y él estaban considerando, cuya dinámica clásica podía determinarse mediante tal principio de acción, pero *no* por métodos más convencionales.

La física, o al menos la física que imaginaban Wheeler y Feynman, había llevado a este a un lugar inimaginable para él seis años antes. La transformación de su pensamiento tras su intenso esfuerzo para explorar la nueva teoría había sido espectacular. Ahora estaba convencido de que el centrarse en sucesos en un instante concreto no era el modo apropiado de pensar, y que el principio de acción basado en explorar las trayectorias completas en el espacio y en el tiempo sí lo era. Como escribió más tarde: «Tenemos [en el principio

de acción] algo que describe el carácter de la trayectoria a través de todo el espacio y el tiempo. Se conoce el comportamiento de la naturaleza diciendo que su trayectoria espacio-temporal completa tiene un carácter determinado». Pero ¿cómo trasladar este principio a la mecánica cuántica, la cual hasta entonces dependía tan crucialmente de definir un sistema en un instante para calcular lo que sucedería en instantes posteriores? La clave de la respuesta le llegó a Feynman en una fiesta de la cerveza en Princeton. Pero, a fin de apreciar esta clave, debemos primero dar un rodeo para hacer una nueva visita a nuestra imagen del misterioso mundo cuántico que Feynman estaba a punto de cambiar.

## Capítulo 4

### Alicia en el país de los cuantos

*El universo no es solamente más raro de lo que suponemos, sino más raro de lo que podemos suponer.*

*J. B. S. HALDANE, 1924*

Aunque el distinguido científico británico J. B. S. Haldane era biólogo y no físico, su afirmación acerca del universo no podría ser más competente, al menos para el campo de la mecánica cuántica que Richard Feynman estaba a punto de conquistar. Ya que, como se ha visto, en escalas pequeñas los efectos mecánico-cuánticos son significativos, las partículas pueden parecer estar en muchos sitios distintos a la vez, mientras hacen también muchas cosas distintas al mismo tiempo en cada sitio.

La entidad matemática que puede dar cuenta de toda esta aparente locura es la función descubierta por el famoso físico austríaco Erwin Schrödinger, quien dedujo lo que se convertiría en la comprensión clásica de la mecánica cuántica durante un atareado periodo de dos semanas, mientras él también estaba haciendo muchas cosas distintas a la vez, entre citas con quizá dos mujeres diferentes, apartado en un chalet de montaña. Probablemente era el ambiente perfecto para imaginar un mundo donde se romperían al final todas las reglas del comportamiento clásico.

Esta función de Schrödinger se llama «función de onda» de un objeto, y da cuenta del misterioso hecho, en el meollo de la mecánica cuántica, de que todas las partículas se comporten en algún sentido como ondas y todas las ondas se comporten en algún sentido como partículas, siendo la diferencia entre una partícula y una onda que una partícula está situada en un punto, mientras que una onda se extiende sobre alguna región.

Así que si una partícula, que no está extendida, ha de describirse mediante algo que se comporta como una onda, que sí se extiende, la función de onda debe acomodar este hecho. Como Max Born demostraría más tarde, esto era posible si la función de onda, que podía comportarse como una onda, no describiera la partícula en sí sino más bien la *probabilidad* de encontrarla en un lugar dado del espacio en un instante específico. Si la función de onda, y por tanto la probabilidad de encontrar una partícula, es no nula en muchos lugares diferentes, esa partícula actúa como estando en muchos lugares a la vez.

Hasta aquí todo bien, incluso aunque la misma idea parezca disparatada. Pero hay un pedacito crucial más de insensatez en el meollo de la mecánica cuántica, y debería remarcar que los físicos no entienden fundamentalmente por qué la naturaleza se comporta así y se limitan a decir que así lo hace. Si las leyes de la física cuántica determinan el comportamiento de la función de onda, entonces la física nos dice que, dada la función de onda en un instante, la mecánica cuántica nos permite, en principio, calcular, de una manera completamente determinista, la función de onda en

un instante posterior. Hasta aquí es como las leyes de Newton, que nos dicen cómo evoluciona en el tiempo el movimiento clásico de las pelotas de tenis (por ejemplo), o como las ecuaciones de Maxwell, que nos dicen cómo evolucionan las ondas electromagnéticas en el tiempo. La diferencia es que en mecánica cuántica la cantidad que evoluciona en el tiempo de manera determinista no es directamente observable, sino que es más bien un conjunto de probabilidades de hacer ciertas observaciones, en este caso de determinar que la partícula se encuentra en un lugar determinado en un determinado instante.

Esto ya es suficientemente extraño, pero además resulta que la función de onda no describe directamente por sí misma la probabilidad de encontrar una partícula en un lugar dado en un instante determinado. En lugar de ello, es el *cuadrado* de la función de onda lo que proporciona las probabilidades. Este hecho es el responsable de toda la extrañeza del mundo cuántico, ya que explica precisamente por qué las partículas pueden comportarse como ondas, como describiré ahora.

En primer lugar, nótese que las probabilidades de las cosas que medimos deben ser positivas (nunca diríamos que existe una probabilidad de menos de un  $i$  % de encontrar algo) y el cuadrado de una cantidad es también siempre positivo, así que la mecánica cuántica predice probabilidades positivas, lo que es algo bueno. Pero ello también implica que la función de onda puede ser positiva o negativa, ya que, digamos,  $-1/2$  y  $+1/2$  dan el mismo número ( $+1/4$ ) cuando se elevan al cuadrado.

Si fuera la función de onda lo que describiera la probabilidad de encontrar una partícula en cierta localización  $x$ , entonces si yo tuviera dos partículas idénticas, la probabilidad de encontrar cualquiera de las partículas en la localización  $x$  sería la suma de las dos (y ambas necesariamente positivas) funciones de onda individuales. Pero, como el cuadrado de la función de onda es lo que determina la probabilidad de encontrar partículas, y puesto que el cuadrado de la suma de dos números *no* es la suma de los cuadrados de estos, las cosas pueden volverse mucho más interesantes en mecánica cuántica.

Sea  $P_1$  el valor de la función de onda que corresponde a hallar la partícula  $A$  en la posición  $x$ , y  $P_2$  el de la función de onda que corresponde a hallar la partícula  $B$  en la posición  $x$ , la mecánica cuántica nos dice que la probabilidad de encontrar una cualquiera de las partículas en la posición  $x$  es ahora  $(P_1 + P_2)^2$ . Pongamos  $P_1 = \frac{1}{2}$  y  $P_2 = \frac{1}{2}$ . Entonces si solo tuviéramos una partícula, digamos la  $A$ , la probabilidad de hallarla en la posición  $x$  sería  $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ . De manera similar, la probabilidad de encontrar la partícula  $B$  en la posición  $x$  sería  $(\frac{1}{2})^2 = \frac{1}{4}$ . Sin embargo, si hay dos partículas, la probabilidad de encontrar *cualquiera de ellas* en la posición  $x$  es  $[(\frac{1}{2})^2 + (-\frac{1}{2})^2]^2 = 0$ .

Este fenómeno, que aparentemente parece ridículo, es de hecho familiar para las ondas, por ejemplo, las ondas sonoras. Dichas ondas pueden *interferir* entre sí, como, por ejemplo, pueden interferir las ondas en una cuerda y dar lugar a sitios en la cuerda, llamados «nodos», que no se mueven en absoluto. Análogamente,

con las ondas sonoras procedentes de dos oradores en una sala podríamos encontrar, si recorriéramos toda la sala, ciertos sitios donde las ondas se cancelan entre sí, o, como dicen los físicos, *interfieren negativamente*. (Los expertos en acústica diseñan las salas de conciertos de manera que se espera que no haya tales «puntos muertos».)

Lo que nos dice la mecánica cuántica, con probabilidades que se determinan mediante el cuadrado de la función de onda, es que las partículas también pueden *interferir* entre sí, de modo que si hay dos partículas en una caja, la probabilidad de encontrar cualquiera de ellas en un lugar determinado puede resultar ser menor que la probabilidad de encontrar una si hubiera solo una partícula en la caja.

Cuando interfieren ondas, es la altura, o *amplitud*, de la onda resultante la que está afectada por la interferencia, y la amplitud puede ser positiva o negativa dependiendo de si se está en un pico o en un seno de la onda. Así, otro nombre para la función de onda de una partícula es su *amplitud de probabilidad*, la cual puede ser positiva o negativa.

Y, de igual modo que para las amplitudes normales de ondas sonoras, las amplitudes de probabilidad separadas para partículas diferentes pueden cancelarse entre sí.

Es precisamente esta matemática la que se halla detrás del comportamiento de los electrones lanzados sobre una pantalla centelleante, descrito en el capítulo 2. Aquí encontramos que un electrón puede de hecho interferir consigo mismo porque los

electrones tienen una probabilidad no nula de estar en muchos lugares diferentes a la vez.

Pensemos primero en cómo calcular probabilidades en un mundo clásico sensato. Consideremos que se elige viajar desde la ciudad  $a$  hasta la ciudad  $c$  siguiendo una ruta específica a través de la ciudad  $b$ . Sea  $P(ab)$  la probabilidad de escoger cierta ruta desde  $a$  hasta  $b$ , y  $P(bc)$  la probabilidad de escoger una ruta específica desde  $b$  hasta  $c$ . Entonces si se supone que lo que ocurre en  $b$  es completamente independiente de lo que ocurre en  $a$  y  $c$ , la probabilidad de viajar desde  $a$  hasta  $c$  según una ruta específica que atraviesa la ciudad  $b$  viene simplemente dada por el producto de ambas probabilidades,  $P(abc) = P(ab) \times P(bc)$ . Por ejemplo, digamos que hay un 50% de probabilidades de tomar cierta ruta de  $a$  a  $b$ , y un 50 % de tomar cierta ruta de  $b$  a  $c$ . Entonces si hiciéramos partir cuatro coches, dos llegarían a  $b$  por la ruta escogida, y, de esos dos, uno tomará la siguiente ruta escogida de  $b$  a  $c$ . Así pues, hay un 25 % ( $0,5 \times 0,5$ ) de probabilidad de tomar la ruta entera requerida desde el principio hasta el fin.

Ahora supongamos que no nos importa qué punto particular  $b$  se visita entre  $a$  y  $c$ . Entonces la probabilidad de viajar de  $a$  a  $c$ , dada por  $P(ac)$ , es simplemente la suma de las probabilidades  $P(abc)$  de escoger ir a través de *cualquier* punto  $b$  entre  $a$  y  $c$ .

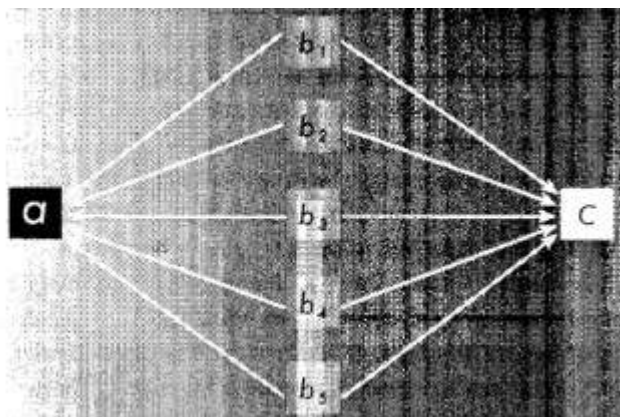
La razón de que esto tenga sentido es que clásicamente si vamos a ir desde  $a$  hasta  $c$ ,  $y$   $b$  representa la totalidad de las ciudades que podemos atravesar digamos a mitad de camino entre  $a$  y  $c$ , entonces



tenemos que pasar por una de ellas durante nuestro viaje (véase la figura).

(Puesto que esta imagen es reminiscente de las anteriores de rayos de luz, podríamos decir que si el ejemplo en cuestión tuviera que ver con rayos de luz que van desde  $a$  hasta  $c$ , entonces podríamos usar el principio de tiempo mínimo para determinar que la probabilidad de ir a través de una de esas rutas, la del tiempo mínimo, es del 100 %, y la de tomar cualquiera de las otras sería cero.)

El problema es que las cosas no funcionan así en mecánica cuántica. Como las probabilidades están determinadas por los cuadrados de las amplitudes de probabilidad de ir de un sitio a otro, la probabilidad de ir de  $a$  a  $c$  *no* viene dada por la suma de las probabilidades de ir de  $a$  a  $c$  a través de cualquier punto intermedio  $b$ . Esto es así porque en mecánica cuántica son las *amplitudes* de probabilidad para cada parte de la ruta las que se multiplican y no las mismas probabilidades. Así pues, la amplitud de probabilidad de ir desde  $a$  hasta  $c$  a través de un punto definido  $b$  se obtiene multiplicando la amplitud de probabilidad de ir desde  $a$  hasta  $b$  por la de ir desde  $b$  hasta  $c$ .



Si no especificamos el punto  $b$  que ha de atravesar la ruta, la amplitud de probabilidad de ir desde  $a$  hasta  $c$  viene dada de nuevo por la suma del producto de las amplitudes de probabilidad de ir desde  $a$  hasta  $b$  y luego desde  $b$  hasta  $c$ , para todos los posibles puntos  $b$ . Pero esto significa que la probabilidad real viene dada por el *cuadrado* de la suma de estos productos. Como algunos de los sumandos pueden ser negativos, resulta posible el disparatado comportamiento de los electrones incidentes sobre una pantalla que discutí en el capítulo 2. Es decir, si no medimos cuál de dos puntos, digamos  $b$  y  $b'$ , atraviesa la partícula cuando viaja desde  $a$  hasta  $c$  a través de una de las rendijas, entonces la probabilidad de llegar al punto  $c$  en la pantalla viene determinada por el cuadrado de la suma de las amplitudes de probabilidad para los dos caminos diferentes permitidos. Si efectivamente medimos por qué punto,  $b$  o  $b'$  pasa la partícula entre  $a$  y  $c$ , la probabilidad es simplemente el cuadrado de la amplitud de probabilidad para una sola trayectoria. Cuando se trata de muchos electrones disparados al mismo tiempo, el patrón final en la pantalla en el primer caso se obtendrá sumando los cuadrados de la suma de las amplitudes de probabilidad de cada una de las dos posibles trayectorias para cada partícula, mientras que en el segundo caso se obtendrá sumando los cuadrados de las amplitudes de probabilidad para cada trayectoria tomada separadamente para cada electrón. De nuevo, como el cuadrado de una suma de números es diferente a la suma de los cuadrados de estos números, la primera probabilidad puede diferir espectacularmente de la segunda. Y, como hemos visto, si las

partículas son electrones, los resultados son ciertamente diferentes si no realizamos ninguna medida sobre la partícula entre los puntos inicial y final que cuando lo hacemos.

Tenga sentido o no, la mecánica cuántica funciona.

Es precisamente este aspecto aparentemente sin sentido de la mecánica cuántica lo que centró el interés de Feynman. Como dijo más tarde, la imagen clásica es errónea si la afirmación de que la posición de la partícula a mitad de camino de su viaje de  $a$  a  $c$  realmente adopta algún valor específico,  $b$ , es falsa. En lugar de ello, la mecánica cuántica permite todos los caminos posibles, con todos los valores de  $b$  escogidos al mismo tiempo.

La cuestión que Feynman entonces planteó es: ¿puede formularse la mecánica cuántica en términos de los *caminos* asociados con amplitudes de probabilidad antes que las amplitudes de probabilidad en sí mismas? Resultó que no era el primero en plantear esta cuestión, aunque sí fue el primero en hallar la respuesta.

## Capítulo 5

### Finales y principios

*En lugar de poner la cosa en la mente —o psicología—, yo la pongo en un número.*

*RICHARD FEYNMAN*

Cuando estaba peleando para encontrar una formulación de la mecánica cuántica que acomodara su extraña teoría con Wheeler, Richard Feynman acudió a lo que llamó después una «fiesta de la cerveza» en la taberna Nassau de Princeton. Allí conoció al físico europeo Herbert Jehle, de visita entonces, quien preguntó a Richard en qué estaba trabajando. Feynman dijo que estaba tratando de proponer una manera de desarrollar la mecánica cuántica en torno a un principio de acción. Jehle le informó de un artículo de uno de los padres de la mecánica cuántica, el notable físico Paul Dirac, que podría tener precisamente la clave. Según recordaba, Dirac había mostrado cómo podía usarse la magnitud a partir de la que se calcula la acción (la cual, recuérdese del capítulo 1, es la lagrangiana, igual a la diferencia entre las energías cinética y potencial de un sistema de partículas) en el contexto de la mecánica cuántica.

Al día siguiente ambos fueron a la biblioteca de Princeton para consultar el artículo de 1933 de Dirac, adecuadamente titulado: «La lagrangiana en mecánica cuántica». En ese artículo, Dirac sugería, brillante y premonitoriamente, que «hay razones para creer que el

[método] lagrangiano es más fundamental» que otros métodos porque (a) está relacionado con el principio de acción y (b) (de importancia vital para el trabajo posterior de Feynman, aunque no pensara en ello entonces) la lagrangiana puede acomodar más fácilmente los resultados de la relatividad especial de Einstein. Pero aunque Dirac tenía ciertamente las ideas clave en su mente, en su artículo únicamente se limitó a desarrollar un formalismo que demostraba la existencia de correspondencias útiles y sugería una vaga analogía entre el principio de acción en mecánica clásica y las formulaciones más estándares de la evolución temporal de la función de ondas mecánico-cuánticas de una partícula.

Siendo Feynman como era, decidió en el acto tomar algunos ejemplos y ver si la analogía podía hacerse exacta. En ese momento estaba haciendo exactamente lo que pensaba que un buen físico debería hacer, es decir, desarrollar hasta el final un ejemplo determinado para comprobar el significado de lo que dijo Dirac. Pero Jehle, que observaba a ese estudiante de posgrado llevar a cabo sus cálculos en tiempo real, demasiado rápidamente para que él pudiera seguirlos, en esa pequeña habitación de la biblioteca de Princeton, estaba bien al tanto. Como dijo: «Vosotros los americanos siempre estáis tratando de encontrarles uso a las cosas. Esa es una buena manera de hacer descubrimientos».

Jehle se dio cuenta de que Feynman había llevado el trabajo de Dirac una etapa adelante y en el proceso había hecho ciertamente un importante descubrimiento. Había mostrado explícitamente cómo podía formularse la mecánica cuántica en términos de una

lagrangiana. Al hacer esto, Feynman había dado el primer paso en reformular completamente la teoría cuántica.

Admito ser escéptico acerca de si Feynman realmente superó a Dirac esa mañana en Princeton. Ciertamente, cualquiera que entienda el artículo de Dirac puede ver que todas las ideas básicas están en él. Por qué Dirac no dio el paso siguiente para ver si estas podían llevarse a cabo es algo que nunca sabremos. Quizás estaba satisfecho con haber demostrado una posible correspondencia pero nunca le pareció que esta fuera particularmente útil para algún propósito práctico.

La única información de que disponemos de que Dirac nunca se demostró a sí mismo que esta analogía era exacta es el recuerdo posterior de Feynman de una conversación con Dirac en la celebración del bicentenario de Princeton en 1946. Feynman describe cómo preguntó a Dirac si sabía que su «analogía» podía hacerse exacta mediante una simple constante de proporcionalidad. El recuerdo de Feynman de la conversación dice así:

Feynman: ¿Sabía usted que eran proporcionales?

DIRAC: ¿Lo son?

FEYNMAN: Sí.

Dirac: Oh, eso es interesante.

Para Dirac, conocido por ser un hombre lacónico y sin imaginación al extremo, esta era una larga conversación, y probablemente bastante elocuente. Por ejemplo, Dirac se casó con la hermana de otro famoso físico, Eugene Wigner. Cuando la presentaba a la gente, lo hacía como «la hermana de Wigner», no como su esposa, dando

por seguro que esto último era superfluo (o quizá demostrando que era tan misógino como muchos de sus colegas de entonces).

Tal vez es más relevante una anécdota que oí referente al famoso físico danés Niels Bohr, quien parece ser se quejaba acerca de ese demasiado silencioso investigador posdoctoral, Dirac, que el igualmente famoso físico Ernest Rutherford le había enviado desde Inglaterra. Rutherford le contó entonces un chiste acerca de una persona que va a una tienda de animales domésticos para comprar un papagayo. Le muestran un pájaro de vivos colores y le dicen que sabe decir diez palabras distintas y que su precio es de 500 dólares. Después le enseñan otro papagayo aún más colorido, con un vocabulario de cien palabras, que cuesta 5.000 dólares. Entonces ve un sucio bicho en la esquina y pregunta cuánto cuesta, y le dicen que 100.000 dólares. «¿Por qué? —pregunta—. Ese pájaro no es nada bonito. ¿Cuántas palabras dice entonces?». «Ninguna», le responden. Pasmado, le dice al dependiente: «Este pájaro de aquí es precioso, dice diez palabras y vale 500 dólares; el otro de más allá dice cien palabras y vale 5.000. ¿Cómo ese sucio pajarito de ahí, que no dice una sola palabra, puede costar 100.000?». El dependiente le responde sonriendo: «Ese pájaro piensa».

Lo que Dirac había intuido en 1933, y lo que Feynman captó inmediata y explícitamente (aunque le llevó algún tiempo describirlo en estos términos), es que mientras en mecánica clásica la lagrangiana y la función acción determinan el camino clásico correcto asignando simples probabilidades a los diferentes caminos clásicos entre  $a$  y  $c$  —en definitiva asignando una probabilidad de

esencialmente uno al camino de mínima acción y esencialmente cero al resto—, en mecánica cuántica la lagrangiana y la acción pueden usarse para calcular no probabilidades, sino *amplitudes* de probabilidad para transiciones entre  $a$  y  $c$ . Y que, además, en mecánica cuántica muchos caminos diferentes pueden tener amplitudes de probabilidad distintas de cero.

Mientras desarrollaba esta idea con un simple ejemplo, Feynman descubrió —ante los atónitos ojos de Jehle aquella mañana en la biblioteca de Princeton— que si trataba de calcular amplitudes de probabilidad usando esta prescripción para tiempos de viaje muy cortos, podía obtener un resultado idéntico al obtenido en la mecánica cuántica tradicional a partir de la ecuación de Schrödinger. Más aún, en el límite en que los sistemas se hacen grandes, de modo que la mecánica clásica gobierna el sistema y los efectos mecánico-cuánticos tienden a ser insignificantes, el formalismo desarrollado por Feynman se reduciría al principio clásico de mínima acción.

Es relativamente fácil ver cómo sucede esto. Si consideramos todos los caminos posibles entre  $a$  y  $c$ , podemos asignar un «peso» a la amplitud de probabilidad para cada camino que es proporcional a la acción total para ese camino. En mecánica cuántica muchos caminos distintos —tal vez un número infinito, incluso caminos alocados que empiezan y paran e instantáneamente cambian sus velocidades— pueden tener amplitudes de probabilidad no nulas. Ahora bien, el «factor peso» asignado a cada camino se expresa en términos de la acción total asociada con ese camino particular. La



acción total para cualquier camino en mecánica cuántica debe ser múltiplo de una unidad muy pequeña de acción llamada «constante de Planck», el «cuanto» de acción fundamental en la teoría cuántica, el cual ya vimos que también proporciona una cota inferior de las incertidumbres al medir posiciones y momentos.

La prescripción cuántica de Feynman es entonces sumar todos los pesos asociados con las amplitudes de probabilidad para los diversos caminos, y el cuadrado de esta cantidad determinará la probabilidad de transición para moverse desde  $a$  hasta  $c$  tras un tiempo  $t$ .

El que los pesos puedan ser positivos o negativos da cuenta no solo del extraño comportamiento cuántico, sino también de la razón de que los sistemas clásicos se comporten de manera distinta que los sistemas cuánticos. Pues, si el sistema es grande, de modo que su acción total para cada camino es entonces enorme comparada con la constante de Planck, un pequeño cambio en el camino puede cambiar la acción, expresada en unidades de la constante de Planck en una cantidad muy grande. A resultas de ello, la función peso puede cambiar frenéticamente de positiva a negativa. En general, cuando se suman los efectos de esos caminos distintos, las numerosas contribuciones positivas tenderán a cancelar las también numerosas contribuciones negativas.

Resulta, sin embargo, que el camino de mínima acción (por tanto, el camino clásico preferido) tiene la propiedad de que cualquier pequeña variación en el camino apenas produce cambios en la acción. Por consiguiente, los caminos cercanos al de mínima acción

contribuirán con el mismo peso a la suma y no se cancelarán entre sí. De ahí que cuando el sistema se hace grande, la contribución a la probabilidad de transición esté en esencia completamente determinada por los caminos muy cercanos a la trayectoria clásica, la cual tendrá efectivamente una probabilidad del orden de uno, mientras que el resto de los caminos tendrá una probabilidad de orden cero. Se habrá recuperado entonces el principio de mínima acción.

Unos días después, estando en la cama, Feynman imaginó cómo extender el análisis que había hecho para caminos en intervalos muy pequeños de tiempo a unos que fueran arbitrariamente grandes, de nuevo ampliando las ideas de Dirac. Aunque era importante mostrar que el límite clásico era razonable, y que las matemáticas podían reducirse a la ecuación estándar de Schrödinger para sistemas cuánticos simples, lo que para Feynman era más excitante es que ahora disponía de un mecanismo para explorar sistemas cuánticos más complejos, como el sistema de la electrodinámica que había ideado con Wheeler, que no podían describir mediante métodos tradicionales.

Aunque su motivación era extender la mecánica cuántica a fin de que pudiera describir sistemas que de otra manera no podían describirse mecánico-cuánticamente, es cierto no obstante (como después enfatizó Feynman) que para sistemas a los que podían aplicarse las formulaciones más estándar de Dirac, Schrödinger y Heisenberg todos los métodos son completamente equivalentes. En cualquier caso, lo importante es que esta *nueva* forma de describir

los procesos físicos proporciona un conocimiento «psicológico» completamente diferente del universo cuántico.

El uso aquí de la palabra «describir» es significativo, ya que el método de Feynman permite una manera bellamente descriptiva de considerar los sistemas cuánticos. Desarrollar esta nueva manera costó algún tiempo, incluso a Feynman, que no habló explícitamente de «suma sobre caminos» en su tesis doctoral. Para cuando publicó su tesis como un artículo en *Reviews of Modern Physics* seis años después, esta idea era central. Ese artículo de 1948, titulado «El enfoque espacio-temporal de la mecánica cuántica no-relativista», empieza con un argumento probabilístico en la línea que he mostrado aquí e inmediatamente después comienza a discutir los caminos espacio-temporales. Sorprendentemente, no hay ninguna figura en el artículo. Tal vez resultaba demasiado caro en esos días disponer de un artista que las dibujara. En cualquier caso, ya llegarían.

Mientras Feynman estaba escribiendo estos resultados para construir la base de su tesis, el mundo en 1942 se hallaba en un estado turbulento, enredado en la Segunda Guerra Mundial. En medio de todas sus otras preocupaciones —acabar su tesis, casarse, encontrar trabajo—, una mañana entró súbitamente en su despacho Robert Wilson, entonces instructor en física experimental en Princeton. Wilson hizo sentar a Feynman y le reveló lo que tendría que haber sido alto secreto, aunque la información específica era tan nueva que todavía no había sido clasificada como tal.

Estados Unidos estaba a punto de embarcarse en un proyecto para construir una bomba atómica, y un grupo en Princeton iba a trabajar en uno de los métodos posibles para hacer el material crudo de la bomba, un isótopo ligero del uranio llamado «uranio 235» (el número 235 representa la masa atómica, esto es, el número de protones más neutrones en el núcleo). Los cálculos de física nuclear habían demostrado que con el isótopo del uranio predominante en la naturaleza, uranio 238, no podía producirse una bomba atómica usando cantidades realistas de material. La cuestión era: ¿cómo el raro isótopo uranio 235, que produciría una bomba con cantidades prácticas de material, podía separarse del mucho más abundante uranio 238? Puesto que los isótopos de un elemento difieren solo en el número de neutrones en el núcleo, pero por lo demás son químicamente idénticos ya que contienen el mismo número de protones y electrones, las técnicas de separación química no funcionarían. Debía emplearse la física. Wilson estaba revelando el secreto porque : deseaba reclutar a Feynman para que colaborará en el trabajo teórico necesario para ver si funcionarían los métodos experimentales que había propuesto.

Esto puso a Feynman en un dilema terrible. Deseaba desesperadamente acabar su tesis. Disfrutaba con el problema en el que estaba trabajando y quería continuar haciendo la ciencia que amaba. Deseaba también graduarse, ya que esta era una de las condiciones previas para casarse. Además Wilson quería que se concentrara en problemas que Feynman veía como propios de la

ingeniería, un campo que había explorado pero que dejó) por la física ya cuando era estudiante de grado.

Su primera intención fue rechazar la oferta. A mismo tiempo, ¿cómo podía rechazar una posibilidad de ayudar en la guerra? Ya antes había considerado el enrolarse en el ejército si podía trabajar en el Cuerpo de Transmisiones, pero le dijeron que no había garantías de ello. Ahora existía la posibilidad de hacer algo mucho más significativo. Además, se dio cuenta de que la física nuclear involucrada no era un secreto. Como dijo después: «El conocimiento de la ciencia es universal, algo internacional |...J En aquel tiempo no había un monopolio del conocimiento o la técnica l...j así que no existía razón alguna para que si nosotros lo considerábamos posible ellos [los alemanes] no lo consideraran también posible . Eran ni más ni menos humanos, con la misma información |...J La única manera que conocía de evitar eso era hacerlo antes, de modo que podríamos evitar que ellos lo hicieran o vencerlos». Pensó por un momento si construir un arma tan espantosa era lo correcto, pero al final metió su tesis en un cajón y acudió a la reunión de la que Wilson le había hablado.

A partir de ese momento estuvo ocupado no en el mundo abstracto de la mecánica cuántica y de los electrones, sino en las minucias de la electrónica y de la ciencia de materiales. Como siempre, estaba bien preparado, gracias a lo que había aprendido por sí mismo y en algunos cursos excelentes, en la física nuclear de Wheeler y en las propiedades de los materiales de Wigner. Aun así, le costó algo adaptarse. El y otro ayudante de investigación de Wigner, Paul

Olum, graduado en matemáticas por Harvard, se dispusieron a trabajar haciendo lo más deprisa que fueron capaces cálculos sobre los cuales no estaban seguros, mientras a su alrededor los investigadores estaban construyendo el dispositivo que ellos dos habían de determinar si era o no factible.

Esta fue la primera experiencia que sirvió a Feynman para darse cuenta, como volvería a ocurrir muchas veces después en su carrera, de que, aunque amaba los cálculos teóricos, no confiaba realmente en ellos hasta que estaban sometidos al ensayo experimental. Desafiante como era el tratar de comprender la naturaleza en las fronteras del conocimiento, no lo era menos el ser responsable de decisiones basadas en sus cálculos que finalmente tendrían un impacto inmediato en el mayor proyecto industrial jamás acometido por una nación.

Al final, el dispositivo para la separación de isótopos propuesto por Wilson no fue el escogido. Los seleccionados para la producción principal de uranio 235 fueron los procesos conocidos como separación electromagnética y difusión gaseosa.

El supervisor de la tesis de Feynman, John Wheeler, no lo abandonó durante ese periodo. Wheeler había dejado Princeton para trabajar con Enrico Fermi en la construcción del primer reactor nuclear en la Universidad de Chicago, donde ellos verificarían el principio de las reacciones en cadena controladas como un primer paso hacia las reacciones en cadena incontroladas que se requerirían para fabricar una bomba atómica. Pero Wheeler era consciente de en qué trabajaba Feynman, y en la primavera de 1942 decidió que ya era

bastante. El y Wigner creían que el trabajo de tesis de Feynman estaba lo bastante acabado como para ser redactado, y le dijo a este que así lo hiciera en términos nada inciertos.

Feynman procedió a hacerlo. Era consciente de lo que había logrado. Había reformulado la mecánica cuántica en términos de un principio de acción que involucraba una suma (o, mejor, en lenguaje matemático una integral) sobre caminos diferentes. Esto permitía una generalización a situaciones en las que el procedimiento estándar de Schrödinger no funcionaba, en particular la teoría del absorbente que él y Wheeler habían desarrollado para el electromagnetismo. Esto es lo que realmente le interesaba —su auténtico paso adelante, pensaba— y el nuevo método que había inventado para reformular la mecánica cuántica era ante todo un medio hacia ese fin.

Pero le importaba más lo que aún no había logrado, y dedicó la sección final de su tesis a las limitaciones de su trabajo. Primero, y principalmente, su tesis no contenía ninguna comparación con los experimentos, algo que consideraba la auténtica prueba de la validez de cualquier idea teórica. Parte del problema era que mientras que él había reformulado puramente la mecánica cuántica no-relativista, era perfectamente consciente de que para abordar experimentos reales con cargas y radiación se necesitaba que la teoría adecuada —electrodinámica cuántica— incorporara la relatividad, lo que comportaba atacar un montón de problemas que no había tratado todavía.

Finalmente, Feynman estaba preocupado con la interpretación física de su nuevo punto de vista de tratar el mundo cuántico; en particular, la cuestión de establecer una conexión entre los paquetes que se ensanchan con el tiempo y las amplitudes de probabilidad inherentes a su nueva formulación, así como la posibilidad de realizar auténticas medidas físicas en cualquier instante específico. El problema de la medida no era nuevo ni aparecía únicamente en la tesis de Feynman. Su trabajo parecía meramente exacerbarlo. El mundo de las medidas reside en el interior del mundo clásico de nuestra experiencia, donde las extrañas paradojas cuánticas parecen no existir. ¿Cómo asegura una «medida» que el mundo cuántico subyacente acaba apareciendo razonable a nuestros ojos?

La primera persona que intentó de forma exhaustiva discutir cuantitativamente el problema de la medida en el mundo de la mecánica cuántica fue John von Neumann, en Princeton, con quien Feynman tuvo la oportunidad de interactuar y estar en desacuerdo. Quienquiera que haya oído algo sobre mecánica cuántica oye con frecuencia que no puede separarse el observador de lo que se está observando. Pero en la práctica eso es lo que exactamente se requiere a fin de hacer predicciones y compararlas con los datos experimentales. Feynman estaba particularmente interesado en esta cuestión clave de cómo separar el aparato de medida y el sistema que se está observando en el contexto de los cálculos mecánico-cuánticos específicos que deseaba realizar.



La palabrería convencional dice lo siguiente: cuando hacemos una medida, «colapsamos la función de onda»; en otras palabras, reducimos súbitamente a cero la amplitud de probabilidad en todos los estados salvo en uno. Por consiguiente, el sistema tiene un 100% de probabilidad de estar en una sola configuración y las posibles configuraciones diferentes no interfieren entre sí, como lo hacen en los ejemplos discutidos en el capítulo anterior. Pero esto es simplemente una petición de principio. ¿Cómo una medida colapsa la función de onda y qué tiene de especial dicha medida? ¿Se necesita un ser humano para hacer la observación?

Dejando a los charlatanes de la Nueva Era aparte, la consciencia no es la clave. Más bien, Feynman arguyó que debemos considerar el sistema junto con el observador como un único sistema (lo que es fundamentalmente cierto, después de todo). Si el equipo de observación es «grande» —esto es, tiene muchos grados internos de libertad— puede mostrarse que dicho sistema se comporta de manera clásica; la interferencia entre diferentes estados macroscópicos del aparato se hace infinitesimal, es decir, tan pequeña que es irrelevante en la práctica.

Mediante el acto de medida, de alguna manera producimos una interacción entre este sistema observador «grande» y un sistema cuántico «pequeño», y ambos terminan correlacionados. Esta correlación asegura que a la larga el sistema mecánico-cuántico pequeño exista también en un estado definido, el estado en el que entonces «medimos» que se halla el sistema. En este sentido, decimos que la función de onda del sistema pequeño ha *colapsado*

(lo que significa que la amplitud de probabilidad de hallarse en un estado distinto del que hemos medido es cero). Los seres humanos no tienen nada que ver con ello. El sistema observador ha de ser simplemente grande y clásico y estar correlacionado con el sistema cuántico a través de la medida.

Esto aún no resuelve del todo la cuestión, que entonces se convierte en: ¿cómo determinamos lo que comprende la parte observadora grande y lo que comprende la parte cuántica del sistema combinado? Feynman pasó mucho tiempo discutiendo esto con Von Neumann. No le satisfacía el argumento de Von Neumann de que alguien tendría que decidir —en cierto sentido de manera arbitraria— dónde hacer el corte entre el observador clásico y lo observado. Esto sonaba como un pretexto filosófico. Feynman creía que, como la mecánica cuántica sirve de base a la realidad, debería ser incorporada consistentemente de principio a fin en lugar de hacer separaciones *ad hoc* entre observador y observado. De hecho, trabajó duramente para definir las medidas puramente en términos de correlaciones entre subsistemas distintos y permitiendo que uno de ellos se haga infinito. Si quedaban correlaciones no nulas y finitas en este límite, entonces Feynman calificaba esto como una «medida» del sistema más pequeño, que podría hacerse arbitrariamente exacta mientras el tamaño de la parte «medidora» se hace cada vez más grande. Como lo expresó de manera colorida en una nota que escribió para sí mismo, respecto al ejemplo de una mancha en una placa fotográfica que de alguna manera registraba un suceso que involucraba un solo átomo:

*A lo que esperamos llegar finalmente si decimos que no podemos ver muchas cosas acerca de un átomo precisamente, lo que podemos ver de hecho. Propuesta: únicamente es posible medir las propiedades de un solo átomo que puedan correlacionarse (con probabilidad finita) (mediante diversos dispositivos experimentales) con un número ilimitado de átomos (a saber, la mancha fotográfica es «real» porque puede agrandarse y proyectarse en pantallas o afectar a grandes cubetas de productos químicos o a grandes cerebros, etc., puede hacerse que afecte incluso a tamaños crecientes de cosas, puede determinar si un tren va a Chicago o si una bomba atómica explota, etc.).*

La teoría de la medida sigue siendo la pesadilla de la mecánica cuántica. Aunque se ha realizado un gran progreso, es justo decir que aún no se ha desarrollado una descripción completa de cómo surge el mundo clásico de nuestra experiencia a partir de una realidad cuántica subyacente, al menos a satisfacción de todos los físicos.

Este ejemplo del interés de Feynman cuando estaba acabando su tesis es importante porque demuestra las sofisticadas cuestiones con las que este mero estudiante de posgrado en física se empeñaba en pelear cuando trabajaba. Además, el «formalismo de la integral de camino» de Feynman hacía posible dividir los sistemas en piezas separadas, lo que parece básico para la idea de medida en mecánica cuántica, al permitir separar las partes del sistema que no se miden

o no pueden medirse de las partes en que uno desea centrarse. Esto no es generalmente posible en las formulaciones estándar de la mecánica cuántica.

La idea es relativamente sencilla. Sumamos todos los pesos correspondientes a la acción asociada con aquellos caminos o partes de caminos de los que deseamos ignorar los detalles específicos, por ejemplo sumar el efecto de tener pequeños lazos circulares —tan pequeños que nunca podríamos medirlos— remolineando en torno a las trayectorias directas más normales entre dos puntos. El efecto de estas sumas puede ser cambiar, en una pequeña cantidad calculable, la que sería (a acción asociada con una trayectoria directa sin los lazos. Después de haber hecho la suma (o en el caso de un número infinito de tales caminos adicionales, la integral) podemos olvidarnos de esas trayectorias en lazo extra y centrarnos en las trayectorias más directas, siempre que usemos en nuestros cálculos la nueva y alterada acción para esta trayectoria. Este proceso se llama «integrar sobre» partes del sistema.

Esto puede parecer, a primera vista, un detalle técnico que no merece la pena mencionar. Sin embargo, como veremos después, permitiría que tuvieran lugar casi todos los avances teóricos en física fundamental más importantes del siglo XX, y nos permitiría revolucionar cuantitativamente lo que de otro modo son nociones vagas tales como «verdad científica».

Pero, por el momento, en 1942, cuando acababa su tesis, titulada: «El principio de mínima acción en mecánica cuántica», Feynman tenía otras cosas en mente. Mientras preparaba su graduación ese

mes de junio, recibió la noticia de que tenía que irse a Los Álamos para centrarse en la fabricación de la bomba atómica. También estaba ocupado preparando su anhelado matrimonio tras la graduación. Tenía entonces que dejar en reposo sus intereses inmediatos en física y centrarse en arreglar el resto de su vida. Quizá todas estas ocupaciones explican por qué, aunque le agradeció al profesor Wheeler sus consejos y estímulo, no aprovechó la oportunidad de añadir lo que podría haber sido un agradecimiento mucho más poético a la conexión entre el tema de la tesis (y al final el trabajo que le haría obtener el Premio Nobel) y aquel premonitorio día en su clase de física de bachillerato cuando Mr. Bader despertó su mente a las sutiles bellezas de la física teórica.

Tres años (que indudablemente parecieron toda una vida) después, la guerra había terminado y finalmente Feynman se puso a escribir su tesis para su publicación. Todavía no hizo esa conexión. En cambio fue capaz de enunciar claramente lo que sin duda habían sido las mismísimas esperanzas que llevaba consigo al abandonar Princeton, y que habían seguido alentándolo a través de las diversas locuras urgentes del mundo de los asuntos humanos sobre el que tenía tan poco control, hasta el día en que fue libre finalmente para explorar a tiempo completo las locuras más embriagadoras del universo cuántico, que se sentía tan confiado en conquistar:

*La formulación es matemáticamente equivalente a las formulaciones más usuales. No hay por tanto nuevos resultados fundamentalmente. Sin embargo, produce placer reconocer*

*viejas cosas desde un punto de vista nuevo. Existen también problemas en los que el nuevo punto de vista ofrece una clara ventaja... Además, siempre queda la esperanza de que el nuevo punto de vista inspire una idea para la modificación de las teorías presentes, una modificación necesaria para abarcar los experimentos actuales.*

## Capítulo 6

### La pérdida de la inocencia

*Es otro Dirac. Solo que esta vez humano.*

*EUGENE WIGNER hablando de Feynman*

Richard Feynman se doctoró con una tesis de Princeton en 1942 como un joven relativamente ingenuo y esperanzado, visto por sus compañeros como un intelecto brillante y descarado, pero muy desconocido fuera de la universidad. Tres años después salió de Los Alamos como un contrastado físico altamente considerado por los primeros espadas de la física de todo el mundo, y un adulto algo cansado y aburrido del mundo. A lo largo del camino, sufrió una importantísima pérdida personal, así como la pérdida de la inocencia moral e intelectual que es consecuencia inevitable de la guerra.

Apenas se había secado la tinta en el diploma de Feynman, cuando empezó a llevar a cabo su decisión, perfilada en esa desapasionada carta a su madre, de casarse con Arline. La oposición de sus padres y de los de ella, que se preocupaban más de la salud de ambos que de su amor mutuo, era inútil. Arline y él creían que el otro era un bastión contra cualquier embestida del resto del mundo. Juntos todo era posible, y se negaron a ser pesimistas sobre el futuro. Como Arline escribió a Richard poco después de que este se hubiera mudado a un nuevo apartamento en Princeton y ultimara los

detalles de la ceremonia: «No somos gente pequeña, somos gigantes [...]»

Sé que tenemos un futuro por delante —con un mundo de felicidad— ahora y para siempre».

En retrospectiva, cualquier aspecto de su corta vida en común es emocionante. En lo que respecta al día de su boda, Richard tomó prestada una especie de furgoneta de un amigo, que adecuó con colchones para que Arline pudiera echarse. Luego condujo desde Princeton a la casa de los padres de ella y la recogió vestida de novia, y juntos fueron a Staten Island a celebrar una ceremonia de boda sin familiares ni conocidos, y de allí a lo que sería el nuevo hogar temporal de Arline, un hospital de caridad en New Jersey.

Poco después, sin organizar ningún festejo ni luna de miel, Feynman volvió a su trabajo en Princeton. El problema es que no había nada que hacer. El proyecto con Wilson había concluido y el equipo esperaba nuevas órdenes. Como la actividad más intensa entonces tenía lugar en Chicago, donde Enrico Fermi y Wheeler estaban trabajando en la construcción de un reactor nuclear, Feynman fue enviado a Chicago para aprender lo que se hacía allí.

Su viaje en 1943 fue el comienzo de lo que sería una serie de oportunidades para a la larga conocer e impresionar a sus colegas y sus jefes. Aunque la guerra desbarató las vidas de todos, en al menos dos sentidos proporcionó a Feynman increíbles oportunidades que de otro modo no hubiera tenido.

Primero, puesto que se estaba reuniendo a los mejores y más brillantes cerebros para pasar dos años en contacto cercano, a



Feynman se le brindó la oportunidad de brillar entre personas que de otra manera habría tenido que dar la vuelta al mundo para conocer. Gracias a su asistencia a reuniones de grupo en el MIT Radiation Laboratory en Massachusetts, ya había impresionado al brillante, aunque afligido, físico Robert Oppenheimer, quien poco después sería elegido jefe del proyecto global de la bomba atómica (el Proyecto Manhattan). En Chicago, mientras estaba desempeñando su tarea de recoger información, dejó estupefactos a los miembros del grupo teórico cuando fue capaz de realizar un cálculo que se les había resistido durante más de un mes.

Tras su vuelta a Princeton y breve estancia allí, no tuvo que esperar mucho antes de enterarse de lo que estaba por llegar. Se había elegido a Oppenheimer para liderar el proyecto de la bomba atómica y poco después este escogió Los Alamos, Nuevo México —una remota y absolutamente bella campiña por donde había vagado de joven y que también satisfacía los requisitos de aislamiento y seguridad impuestos por el ejército—, como el lugar que pronto llegaría a ser el laboratorio más avanzado del mundo, con la concentración de brillantes científicos por kilómetro cuadrado más alta nunca vista (incluso teniendo en cuenta, como hizo una vez John F. Kennedy, los días en los que Thomas Jefferson cenaba solo en la Casa Blanca).

Oppenheimer era un científico brillante y, aún más importante para el éxito del proyecto de la bomba atómica, era capaz de juzgar de manera igualmente brillante el talento de los demás. Rápidamente empezó a reclutar y hacerse con un equipo de colegas sobresalientes

para reubicarlos en Los Alamos incluso antes de que se hubiera finalizado el laboratorio y las casas anexas. No hace falta decir que buscó a Feynman e hizo lo que pudo para convencerle de trasladarse a Nuevo México con la primera ola de científicos, a finales de marzo de 1943.

La oferta de Oppenheimer condujo al otro impacto fortuito que el esfuerzo bélico tuvo sobre la pareja de recién casados. La enfermedad de Arline estaba progresando; viviría solo dos años después de la boda. Si alguna vez hay una época de romance y aventura, esta debe ser durante los primeros años de matrimonio. Si la guerra no hubiera trastornado el mundo, Feynman se hubiera tomado sin duda más tiempo para acabar el doctorado, él y Arline hubieran continuado su estresante existencia en Princeton viendo cómo se deterioraba la salud de ella, y luego, antes de que Arline muriera, él podría haber accedido a una plaza de profesor ayudante en algún lugar no muy diferente de Princeton. En vez de eso, su decisión de trasladarse al salvaje y desconocido sudoeste proporcionaría a la joven pareja la oportunidad de gozar de un pedazo del romance y la aventura que anhelaban, y que de otra manera ella no habría podido nunca disfrutar.

Feynman se conmovió con el interés y la consideración de Oppenheimer. Oppie, como era conocido entre sus colegas, parecía ser el líder perfecto para este grupo de científicos independientes. El merecía su respeto. Como dijo Feynman más tarde: «Podíamos discutir técnicamente cualquier cosa porque lo entendía todo». Al mismo tiempo, mostraba una preocupación poco común por el

bienestar de todas y cada una de las personas que había reclutado para esta tarea. De nuevo en palabras de Feynman: «Oppenheimer era extremadamente humano. Cuando estaba reclutando a toda esa gente para ir a Los Alamos, se preocupaba por todos los detalles. Por ejemplo, cuando me pidió ir le dije que tenía el problema de que mi esposa tenía tuberculosis. El mismo encontró un hospital y me llamó para decirme que habían encontrado un lugar donde la cuidarían. Yo era uno de los muchos que estaba reclutando, pero él era así, siempre preocupado por los problemas personales de los demás». La llamada de Oppenheimer desde Chicago diciendo que había encontrado un hospital era la primera llamada telefónica que Feynman recibió desde un sitio tan lejano; quizás eso explicara que se hubiera conmovido tanto. En cualquier caso, tras algunas negociaciones con las autoridades militares, Arline y Richard se dispusieron a tomar el Santa Fe «Chief» desde Chicago el 30 de marzo. Arline estaba exultante, llena de alegría y excitación:

*Queridísimo Rich:*

*Si supieras lo feliz que me has hecho con nuestro viaje en tren. Es todo lo que he deseado y soñado desde que nos casamos... Solo falta un día y estoy tan excitada y feliz que estallo de alegría; «te» pienso, como y duermo. Nuestra vida, nuestro amor, nuestro matrimonio, el gran futuro que estamos construyendo. Ojalá mañana llegue pronto.*

A instancias de Arline, compraron un billete para una cabina privada; luego subieron al tren y se dirigieron al oeste. Al final,

después de examinar varias posibilidades, Arline fue internada en un sanatorio de Albuquerque, a unos ciento sesenta kilómetros del lugar donde se encontraba el laboratorio (no había laboratorio todavía). Y, de alguna manera, Richard viajaba todas las semanas para verla.

En cierto sentido, Richard Feynman había estado preparándose para esta experiencia toda su vida. Todo su talento iba a ser explotado durante los dos años siguientes: su resplandeciente capacidad para el cálculo; su magia matemática; su intuición física; su evidente gusto por experimentar; su falta de respeto a la autoridad; su amplitud de conocimientos de física, desde física nuclear hasta física de materiales (poco después de llegar cayó enfermo, y en una carta a su madre decía que estuvo leyendo un manual de ingeniería química con temas que iban desde «transporte de fluidos» a «destilación» durante los tres días que estuvo en la enfermería), y su fascinación por los ordenadores.

El trabajo de física era muy distinto al trabajo académico. Era más fácil que empujar la vanguardia hacia las leyes desconocidas, pero bastante más sucio que trabajar en prístinos electrones solitarios en átomos de hidrógeno. Aparte de sus contribuciones al desarrollo de la bomba, Feynman dejó poco legado científico permanente de su trabajo durante este tiempo. (Existe una fórmula para la eficiencia de un arma nuclear, llamada «la fórmula de Bethe-Feynman», pero eso es todo.)

No obstante, Los Alamos ejerció una profunda influencia sobre la carrera de Feynman, y todo empezó accidentalmente, como sucede

muchas veces. De nuevo en sus palabras: «La mayoría de los peces gordos estaban fuera de la ciudad por una u otra razón, haciendo que les enviaran los muebles o algo así. Excepto Hans Bethe. Parece ser que cuando estaba trabajando en una idea le agradaba discutirla con alguien. No pudo encontrar a nadie por ahí, así que entró en mi despacho y empezó a explicar lo que estaba pensando. Cuando se trata de física me olvido por completo de a quién me estoy dirigiendo, así que me encontré diciendo: “¡No, no! ¡Eso es disparatado!”, etc. Siempre que yo objetaba estaba equivocado, pero no obstante eso era lo que él quería». Como recuerda Bethe: «No sabía nada acerca de él... Había obtenido hacía poco su doctorado bajo la dirección de Wheeler, en Princeton. Empezamos a hablar y era evidentemente muy brillante. En las reuniones y seminarios siempre hacía preguntas que parecían muy brillantes y agudas. Empezamos a colaborar». Y en otro recuerdo: «Desde el principio se mostró muy animoso. Enseguida me di cuenta de que era un fenómeno... Pensé que Feynman quizás era el hombre más ingenioso de toda la división, así que trabajamos mucho juntos».

La oportunidad de trabajar con Bethe en Los Alamos fue realmente una suerte. Se complementaban de manera muy notable y compartían una extraordinaria intuición física, vigor mental y habilidad de cálculo. Pero, en otros sentidos, Bethe era algo que Feynman no era. Era tranquilo y cauto, y al contrario que el excitable Feynman, Bethe era imperturbable. Esto también se reflejaba en sus estilos matemáticos. Bethe empezaba un cálculo por el principio y lo acababa hasta el final, sin importar lo largo o

difícil que fuera el camino. Por el contrario, era probable que Feynman empezara hacia la mitad o al final y saltara hacia atrás y hacia delante hasta convencerse de que estaba en lo cierto (o equivocado). En otras áreas, Bethe servía como un notable modelo a seguir. A Feynman le encantaban su humor, sus maneras no afectadas y su forma directa y colegial de tratar a los demás. Y aunque Wheeler ayudó a liberar el entusiasmo y creatividad de Feynman, no era el físico que era Bethe. Si Feynman había de ascender a niveles nuevos y superiores, necesitaba a alguien con quien andar hombro con hombro. Bethe era el hombre.

En la época en que se había trasladado a Los Alamos, Bethe había resuelto uno de los problemas más importantes y enojosos en astrofísica: ¿cómo brilla el Sol? Durante más de un siglo, los científicos se habían preguntado qué proceso energético potencia el Sol de manera que este haya podido brillar con su luminosidad observada por más de 4.000 millones de años. La estimación más temprana, por un doctor alemán a principios del siglo XIX, sugería que si el Sol fuera una enorme bola de carbón, podría arder con su brillo observado alrededor de 10.000 años, lo que resultaba estar de acuerdo con algunas estimaciones bíblicas de la edad del universo. Más tarde, en ese siglo, dos famosos físicos, Heinrich Helmholtz y lord Kelvin, estimaron que el Sol podría ser potenciado por la energía liberada durante la contracción gravitacional, y esta fuente de energía podría potenciar el Sol durante quizá 100 millones de años. Sin embargo, incluso esta estimación estaba muy lejos de

explicar la edad inferida del universo por entonces, que no era de centenares de millones, sino de miles de millones de años.

El misterio perduró durante la década de 1920, cuando el famoso astrofísico británico sir Arthur Stanley Eddington arguyó que tiene que haber una fuente desconocida de energía potenciando el interior solar. El problema era que los cálculos modelo del perfil solar sugerían que la temperatura del interior no era mayor que ro millones de grados, que es muy caliente pero no lo suficiente. En otras palabras, los procesos físicos asociados con las energías disponibles a esas temperaturas estaban considerados como muy bien conocidos, sin lugar para la nueva física exótica. Como resultado, la afirmación de Eddington fue recibida con escepticismo, lo que le llevó a proferir su famosa reprimenda: «A quienes creen que la temperatura en el centro del Sol no es lo suficientemente elevada para que tengan lugar algunos procesos nuevos, yo les digo: “¡Id a encontrar un lugar más caliente!”».

Bethe, que había estudiado con los mejores físicos teóricos en Europa, incluyendo a Arnold Sommerfeld, Paul Dirac y Enrico Fermi, se había establecido ya a principios de la década de 1930 como quizá la principal autoridad en el emergente campo de la física nuclear. Escribió el conjunto definitivo de artículos de revisión en este campo, que Feynman había estudiado cuando era alumno de grado. Si alguien estaba preparado para encontrar el nuevo proceso que potenciaba el Sol, ese era Bethe, y en 1939 hizo su gran descubrimiento. Se dio cuenta de que ciertas reacciones nucleares recientemente descubiertas (similares en espíritu a las explotadas

después en la fabricación de la bomba de fisión, pero, en vez de estar basadas en romper un núcleo pesado como el uranio y el plutonio, estas involucraban la fusión de núcleos ligeros como el hidrógeno en núcleos más pesados) proporcionaban la clave para liberar tremendas cantidades de energía. Además, mostró que existían una serie de reacciones que empiezan con protones, que constituyen los núcleos de hidrógeno, y producen a la larga los núcleos del siguiente elemento más ligero, el helio, lo que liberaría una energía más de veinte millones de veces mayor que la que se liberaría en reacciones químicas entre hidrógeno comparables. Aunque a una temperatura de solo 10 millones de grados un núcleo de hidrógeno podría tardar en promedio más de 1.000 millones de años en experimentar una colisión lo suficientemente energética para iniciar dicha reacción, podrían no obstante convertirse 100.000 toneladas de hidrógeno en helio por segundo, suministrando energía suficiente para potenciar el Sol en su luminosidad actual durante unos 10.000 millones de años.

Por este importante descubrimiento teórico, en 1969 se le concedió el Premio Nobel a Bethe, cuatro años después de que Feynman lo compartiera por su propio trabajo en electrodinámica cuántica. Y las reacciones de fusión nuclear que Bethe explotó en su explicación del funcionamiento del Sol serían recreadas siete años después de la Segunda Guerra Mundial en el desarrollo de explosivos termonucleares, conocidos también como «bombas de hidrógeno».

Oppenheimer había reclutado a Bethe en 1942, y sabiamente lo escogió para dirigir la División Teórica, que contenía los mayores



cerebros y los mayores egos residentes en Los Alamos. Bethe no solo era su igual intelectual mente, sino que también su tranquila aunque persistente fuerza de carácter sería esencial en guiarlos, apagar resquemores y, sobre todo, aguantar sus idiosincrasias.

En Feynman, Bethe había encontrado el contraste justo que necesitaba para obtener respuesta a sus ideas, así como Feynman había encontrado el perfecto mentor para ayudarle a guiar su activa imaginación. Que ambos amaran su trabajo no le hacía daño a ninguno. Bethe, dicho sea en su honor, reconoció enseguida el talento de Feynman y tomó la que podría parecer la poco ortodoxa decisión de nombrar al joven de veinticuatro años jefe de grupo de la División Teórica, pasándolo por encima de colegas más viejos y experimentados. Stephane Groueff recordó sus interacciones: «La voz de Feynman podía oírse desde lejos, hacia el final del pasillo: “¡No, no, estás loco!”. Sus colegas de la División Teórica de Los Alamos miraban por encima de sus ordenadores e intercambiaban sonrisas de complicidad. “¡Ahí van de nuevo!, —dijo uno—. ¡El acorazado y la lancha mosquito!”».

No es difícil adivinar quién era quién. No obstante, más allá de las risas cordiales comunes y de la rivalidad intelectual, lo que dejó la impresión más duradera en este ya impresionable joven fue la insistencia de Bethe en conectar cada cálculo teórico con un número, con una cantidad que pudiera compararse con resultados experimentales. No hace falta enfatizar cuán profundamente esto rigió casi todo lo que en adelante hizo Feynman como científico. Como diría después: «Bethe tenía algo que aprendí de él: llegar a los

números. Si se tiene un problema, la auténtica prueba de todo —y no puede dejarse aparte— es obtener los números; si no se llega a ellos, no se consigue demasiado. Así que su actitud permanente es usar la teoría. La manera de ver cómo funciona es usarla realmente».

El catálogo de actividades de Feynman mientras trabajó bajo la dirección de Bethe en Los Álamos es digno de ser resaltado, sobre todo por su diversidad. Empezó desarrollando rápidamente un método para integrar numéricamente (o sumar) las llamadas «ecuaciones diferenciales de tercer orden», que contenían derivadas de derivadas de derivadas. Su método resultó más preciso que lo que se podía hacer con las más simples ecuaciones de segundo orden. Menos de un mes después, Feynman y Bethe habían obtenido su fórmula para calcular la eficiencia de un arma nuclear. Abordó luego el problema, más complicado desde el punto de vista teórico, de calcular la difusión de neutrones rápidos que provocaban fisiones en la bomba atómica de uranio 235. Para atacar este problema, desarrolló un enfoque matemáticamente muy similar a la formulación que después inventaría para tratar la electrodinámica cuántica.

Durante las fases finales de la fabricación de la bomba, a Feynman se le encargó calcular y finalmente supervisar todos los aspectos computacionales del ensamblaje de una bomba de plutonio, que Von Neumann había sugerido podía ser disparada mediante una implosión masiva, aumentando la densidad del material y haciendo que una masa de otra manera estable se hiciera crítica. La primera

explosión nuclear inducida por humanos, en la superficie del desierto antes del anochecer del 6 de julio de 1945, con nombre en código de Trinidad, resultó un éxito en parte (no pequeño) debido a la dirección de Feynman de los asuntos computacionales durante esos últimos meses cruciales.

El trabajo de Feynman comportaba usar e incluso ensamblar una nueva generación de máquinas computadoras electromecánicas para realizar los complejos cálculos de modelación necesarios para diseñar el nuevo dispositivo, lo que suponía un desafío para la pericia mecánica y matemática de Feynman. Como lo describió Bethe después:

*Feynman era capaz de hacer cualquier cosa, absolutamente cualquier cosa. Durante algún tiempo, el grupo más importante de nuestra división estaba dedicado a las máquinas calculadoras. Los dos hombres que puse al cargo de esas computadoras se limitaban a jugar con ellas y nunca nos daban las respuestas requeridas. Le pedí a Feynman que se hiciera cargo de ellas. Desde ese momento teníamos respuestas semanalmente; montones de ellas y muy precisas. Él siempre sabía lo que se necesitaba y cómo obtenerlo. (Debería mencionar que las computadoras habían llegado en cajas —unas diez cajas por ejemplar—. Feynman y uno de los anteriores jefes de grupo ensamblaron las máquinas. Más tarde, unos profesionales de IBM dijeron: «Esto nunca antes se había hecho. Nunca se ha visto que profanos en la materia ensamblen una de estas máquinas, ¡y es perfecto!».)*

El grado en que Feynman contribuyó al desarrollo con éxito de la bomba al tiempo que explotaba su talento natural y maduraba como físico está bien descrito por el también físico e historiador de la ciencia Sylvan Schweber: «Su versatilidad era legendaria. Su habilidad en abrir cerraduras, reparar calculadoras Marchant and Monroe, ensamblar máquinas IBM, resolver puzzles y difíciles problemas de física, sugerir nuevos métodos de cálculo y explicar la teoría a los experimentadores y el experimento a los teóricos le ganaron la admiración de todos con quienes entraba en contacto».

El talento y la energía de Feynman en Los Alamos derivaban de una característica que su antiguo compinche Ted Welton, quien después fue a Los Alamos a trabajar con él, describió así: «Cuando se le presentaba una paradoja física claramente formulada, un resultado matemático, un truco de naipes o cualquier otra cosa (Feynman) no dormía hasta encontrar la solución». Schweber estaba de acuerdo, y decía que este comentario captaba la quintaesencia de Feynman, quien tenía «una obsesiva necesidad de desvelar lo secreto».

Los logros de Feynman fueron absolutamente impresionantes teniendo en cuenta que en medio de todo esto su esposa se estaba muriendo en un hospital de Albuquerque. Cada semana viajaba los trescientos kilómetros de ida y vuelta para visitarla, pidiendo prestados coches o haciendo autostop. Su correspondencia con ella se hizo más frecuente al empeorar sus síntomas, llegando a ser casi diaria cerca del final. Su amor mutuo y la ternura y preocupación que manifestaba por ella son evidentes y dolorosos de leer.

En los cuatro meses anteriores a la muerte de Arline, el 16 de junio de 1945 —seis semanas antes de que se lanzara la bomba atómica sobre Hiroshima—, Richard Feynman le escribió a Arline treinta y seis cartas. Escribió a los médicos para explorar y solicitar nuevos tratamientos para la tuberculosis, y la llevó a Los Alamos para que pudieran estar juntos, hasta que el descontento de ella con las enfermeras del ejército, las regulaciones y las dificultades de vivienda hicieron que Richard la llevara de nuevo Albuquerque, a pesar de sus presentimientos. Le escribió acerca de su arrepentimiento de haberse emborrachado el día VE,<sup>2</sup> de su temor común de que ella pudiera estar embarazada, de paquetes caseros, de apagar un fuego forestal y de que a los hombres no se les permitiera entrar en el dormitorio de las chicas (decía en broma que no había estado en un dormitorio de chicas desde hacía más de un año), pero principalmente le escribía acerca de su amor por ella. La última carta que le escribió, el 6 de junio, acababa así:

*Iré esta semana y si no deseas molestarte en verme solo tienes que decírselo a la enfermera. Lo entenderé, cariño, lo entenderé. Entenderé todo porque ahora sé que estás demasiado enferma para explicar nada. No necesito explicaciones. Te quiero, te adoro, te serviré sin preguntas pero con comprensión... Adoro a una gran y paciente mujer. Perdóname por mi lentitud en comprender. Soy tu marido. Te quiero.*

---

<sup>2</sup> Victory in Europe day (día de la victoria en Europa, 8 de mayo de 1945), en conmemoración de la victoria de los aliados, y en particular de los estadounidenses, en la Segunda Guerra Mundial. (N. del t.)

Mientras tanto, durante ese tiempo imposible, él y los otros científicos en Los Álamos procedían frenéticamente hacia la creación de una bomba que cambiaría para siempre la Historia. Las emociones estaban al máximo, y tal vez esto es lo que les mantenía en marcha. Cuando Alemania se rindió, nadie pareció preguntar: ¿por qué estamos fabricando esta bomba? Todos deseaban ver expuesto a la luz el fruto de sus intensas labores para acabar la guerra en el Pacífico.

Para alguien como yo, que ha crecido en una era de gran ciencia y gran burocracia, la notable intensidad y rapidez con que se llevó a cabo el Proyecto Manhattan son casi imposibles de comprender. El tiempo transcurrido desde que la bomba era mera especulación hasta la prueba de Trinidad fue menos de cinco años. El tiempo desde que Feynman y otros fueron reclutados fue menos de tres años. Las mejores mentes de los físicos, motivadas inicialmente por la creencia de que el enemigo (Alemania) estaba también desarrollando un arma nuclear, llevaron a cabo en tres años lo que en el mundo de hoy podría costar al menos una década o dos. El gigantesco proyecto de separación de isótopos en el laboratorio de Oak Ridge en Tennessee, que multiplicó por más de un millón la cantidad total de uranio 235 separado en el mundo durante ese periodo de tres años —bajo circunstancias muy peligrosas, y Feynman fue enviado en 1945 para intentar corregirlas—, probablemente hoy en día costaría al menos el mismo tiempo que obtener solo el permiso medioambiental antes de permitir que se empezara.

Feynman se había apresurado a permanecer junto a Arline durante sus últimas horas el 16 de junio, pero, después de que ella muriera, se dio cuenta de que los muertos no necesitan ya ayuda, de modo que recogió sus pertenencias, dispuso su cremación inmediata y sorprendentemente regresó a Los Alamos, destrozado como estaba, para reanudar su trabajo la tarde del día siguiente. Bethe no lo consintió y le ordenó que volviera a casa en Long Island para descansar. Su familia no tenía aviso previo de su llegada, y permaneció allí hasta que casi un mes después recibió un telegrama codificado emplazándole a que volviera a Nuevo México. Regresó el 15 de julio, le condujeron a casa de Bethe para comer unos sándwiches hechos por la esposa de este, Rose, y luego tomó un autobús hacia un lugar desolado llamado Jornada del Muerto, donde se reunió con sus colegas para observar la prueba del ingenio que habían pasado diseñando y construyendo día y noche durante tres años, el ingenio que cambiaría el mundo para siempre.

Todo el que vio la explosión se quedó aterrado, pero cada uno de distinta manera. Algunos, como Oppenheimer, de manera poética, recordando un oscuro fragmento del Bhagavad Gita: «Ahora me he convertido en la Muerte, la destructora de mundos». Feynman, que se las había arreglado para eliminar la superstición en el momento de la muerte de su esposa y el sentimentalismo inmediatamente después, mantuvo las formas. Meditó sobre el proceso que formaba las nubes alrededor de la onda explosiva y sobre el que causaba que el aire brillara como si hubiera sido ionizado en el calor de la explosión, y un centenar de segundos después, para cuando el

estampido de la explosión llegó finalmente al puesto de observación, sonreía de oreja a oreja. La naturaleza había validado los cálculos que tanto esfuerzo le costaron.



## Capítulo 7

### Los caminos a la grandeza

*Se encuentra placer en reconocer viejas cosas desde un nuevo punto de vista.*

*RICHARD FEYNMAN*

Fue el mejor de los tiempos. Fue el peor de los tiempos. Richard Feynman dejó Los Alamos en octubre de 1945 como una estrella resplandeciente en la comunidad de la física. Ya en 1943, Oppenheimer había tratado de convencer al director del departamento de Física de la Universidad de California en Berkeley de que ofreciera a Feynman un puesto, diciéndole: «El es sin ninguna duda el físico más brillante aquí. Su excelencia es tan reconocida, tanto en Princeton como por un número no despreciable de peces gordos en este proyecto, que ya le han ofrecido un puesto para el periodo de posguerra y casi con seguridad le ofrecerán otros». Oppenheimer se refería a una oferta del siempre astuto Bethe, quien en noviembre de 1943 había arreglado todo para que le ofrecieran a Feynman un puesto de profesor en la Universidad de Cornell, de manera que Feynman estaba en Los Alamos con permiso oficial de esa universidad. El serio director de Berkeley retrasó la oferta hasta el verano de 1945, diciéndole a Feynman que «nadie a quien hemos hecho una oferta la ha rechazado». Pero Feynman lo hizo. Ya conocía y estimaba a Bethe, quien había estado formando un grupo excelente en Cornell. Además, Bethe se las arregló para

que Cornell hiciera una contraoferta más sustanciosa que la de Berkeley, así que Feynman partió de Los Alamos para Cornell en otoño, el primero de los jefes de grupo en abandonar el lugar.

La predicción de Oppenheimer se cumplió perfectamente, como solía ocurrir en su caso. En el plazo de un año, Feynman había recibido otras ofertas del Instituto de Estudios Avanzados (Princeton), la Universidad de Princeton y la UCLA (Universidad de California en Los Angeles), que rechazó para poder seguir en el grupo de Bethe. Las ofertas llevaron a su promoción en Cornell de ayudante a profesor asociado.

Todas estas confirmaciones tendrían que haber alentado el ánimo de Feynman. Sin embargo, se sentía agotado, pesimista y deprimido. Aunque esperable, la muerte de su esposa había sido un golpe terrible para él. Arline había sido su salvavidas. Como complemento de la depresión que debió de sentir tras la muerte de Arline, sentía ansiedad por el conocimiento de que podían construirse armas nucleares y que Estados Unidos no tendría su monopolio por mucho tiempo. Feynman recordaba más tarde, por ejemplo, estar con su madre en Nueva York inmediatamente después de la guerra y pensar acerca de cuánta gente moriría si se arrojara allí una bomba.

En ese contexto, contemplar el futuro parecía un sinsentido porque no había futuro. Como Einstein, quien dijo: «Todo ha cambiado, salvo nuestra manera de pensar», Feynman no veía ningún cambio en las relaciones internacionales de posguerra y estaba seguro de que las armas nucleares se usarían pronto de nuevo. Como él dijo:

«Lo que puede hacer un loco puede hacerlo otro». Creía que era una tontería construir puentes que serían destruidos pronto. De la misma manera, debía de haber pensado: ¿por qué tratar de tender un puente hacia un nuevo conocimiento de la naturaleza?

Unido a todo esto estaba el bajón natural tras el intenso ritmo y la presión que había cuando participaba en el gran Proyecto Manhattan: el desafío intelectual, la rápida gratificación, el trabajo en equipo... Todo eso cambió al desplazarse a Cornell. Tras los notablemente productivos años de la guerra, en los que habían de resolverse urgentemente problemas reales y someter los resultados a ensayos prácticos casi inmediatamente, la vuelta a meditar sobre cuestiones en las que el progreso es inevitablemente más lento y más difuso debió de ser aún más difícil para Feynman.

Los problemas asociados con el proyecto de la bomba atómica probablemente fueran un desafío matemático, pero implicaban esencialmente la física o la ingeniería bien entendidas. En este sentido eran como resolver problemas en clase —bien definidos y fáciles a la vez—, excepto que su interés era mayor y la presión más intensa. Los problemas a los que Feynman estaba volviendo involucraban profundas cuestiones de principio, en las que nadie conocía la dirección correcta. Podía trabajar durante años sin un progreso claro. Esta clase de investigación puede ser desalentadora bajo las mejores condiciones.

Además, pensaba que había tirado tres años de su vida cuando hubiera podido estar atacando esos problemas y le preocupaba que el mundo le estaba adelantando. Julián Schwinger, a quien conoció

en Los Alamos poco después de la prueba de Trinidad, y con quien más tarde compartiría el Premio Nobel, era de la edad de Feynman, veintisiete años, pero Schwinger ya tenía su nombre unido a descubrimientos en física (y en dos años sería nombrado catedrático en Harvard), mientras que Feynman sentía que no tenía nada que mostrar por todos sus esfuerzos.

Por último, estaba el shock de empezar de repente una nueva carrera como profesor universitario. Después de centrarse en problemas de investigación profundos o no, todas las minucias con las que se bombardea a los nuevos instructores, y para las que ellos apenas están preparados, pueden ser cuando menos desalentadoras. Feynman regresó a Cornell antes que el resto de sus colegas. Bethe no llegó hasta diciembre, de modo que no pudo guiar a Feynman en la transición hacia su nueva tarea.

La enseñanza lleva más tiempo de lo que se espera, y ser un profesor con éxito, y Feynman claramente lo era en física matemática y electromagnetismo, puede crear una impresión negativa acerca del estado de la investigación de uno. Einstein dijo en una ocasión que enseñar es bueno porque crea la ilusión de haber llevado algo a cabo. Una buena lección puede dar satisfacción inmediata, mientras que la investigación puede continuar durante meses sin hacer ningún progreso.

Además, el padre de Feynman —la persona que primero lo había animado a resolver enigmas y que lo impulsó a disfrutar haciendo preguntas a la naturaleza, y que le había escrito una carta rebotante de orgullo tras su nombramiento en Cornell— murió de

repente a causa de una apoplejía solo un año después del fallecimiento de Arline, y en la cima de la depresión de Feynman. El orgullo paterno solo exacerbaba sus preocupaciones acerca de sus propios logros. Se dio cuenta de que su último artículo publicado era el que escribió siendo estudiante de grado en el MIT, lo que le produjo la sensación de que estaba quemado y que, a la tierna edad de veintiocho años, sus mejores años quedaban atrás. Esta actitud hizo que la acumulación de atractivas y cada vez más lucrativas ofertas de empleo pareciera incluso peor, como si él no mereciera la adulación y no llegara nunca a lograr algo importante.

Puede ser muy desmoralizador ser visto por el mundo de manera distinta a como uno se ve a sí mismo. Recuerdo de nuevo, desde mi experiencia personal, cómo después de recibir mi soñada beca de Harvard no pude centrarme en el trabajo al menos durante tres meses porque, tras cinco años en la misma ciudad siendo un anónimo estudiante de grado, el cambio de estatus me hacía sentir como poco no merecedor de ello. Cuando Feynman recibió las ofertas simultáneas de la Universidad de Princeton y del Instituto de Estudios Avanzados, su comentario fue: «Estaban absolutamente locos».

Hay bastantes cosas que acreditan que Feynman estaba tratando de liberarse de sus miedos, incluyendo una conversación con Robert Wilson, quien se había trasladado a Cornell para dirigir el nuevo laboratorio de estudios nucleares. Wilson le dijo que dejara de preocuparse, que no debería sentir ninguna presión; su contrato era una decisión de Cornell, no suya. Más tarde, Feynman contó una

famosa anécdota que le recordaba por qué se divertía haciendo física: observó que un plato arrojado hacia arriba en la cafetería se bamboleaba de forma extraña cada dos revoluciones y decidió descifrar por qué se movía así, solo por diversión.

Probablemente el paso del tiempo contribuyera más a su recuperación. Necesitaba superar las muertes de su esposa y de su padre y reconciliarse con su madre —cuya oposición al matrimonio con Arline la había separado de su hijo— y recuperar el ritmo de hacer física que había conocido antes de la guerra. Su carácter, que normalmente irradiaba optimismo y autoconfianza, y su mente, que había estado enfocada hacia la gran aventura de resolver los enigmas de la naturaleza, no podían permanecer sumergidos para siempre. (Bethe más tarde remarcó, al saber de la depresión de Feynman, la cual no era evidente a otros en Cornell: «Feynman deprimido es tan solo un poco más alegre que cualquier otra persona cuando está exuberante».)

Durante los años de la guerra, Richard no había parado de pensar del todo en sus problemas de física. Llevaba consigo pedazos de papel con cálculos, desarrollados con frecuencia durante los viajes semanales para ver a Arline, en los que volvía al problema de cómo formular una auténtica teoría cuántica del electromagnetismo. Principalmente se centró en la cuestión de cómo introducir la relatividad especial de Einstein en sus ecuaciones.

Recuérdese que Feynman había aprendido, siendo todavía un estudiante de grado, que nadie salvo Paul Dirac había descubierto la forma apropiada de describir el movimiento relativista de los

electrones, y fue el artículo de Dirac sobre la lagrangiana en mecánica cuántica lo que inspiró el trabajo que llevó a su tesis. El problema era que aunque el método de la «suma sobre caminos» de Feynman podía reproducir exactamente la ecuación de Schrödinger, apropiada para la mecánica cuántica no relativista, Feynman no podía descubrir una manera fácil de extenderlo para reproducir la ecuación de Dirac en el contexto relativista. Encontró que cuando calculaba energías seguía obteniendo respuestas sin sentido, involucrando raíces cuadradas de números negativos. Y, además, cuando trataba de calcular probabilidades, al sumar las probabilidades de todos los posibles sucesos no daba el 100%.

Después de la guerra, cuando retomó estos temas, Feynman se centró primero en lo que debería haber sido la tarea más fácil: escribir los resultados de su tesis de 1942, que aún no habían sido publicados formalmente. Aquí empezó a emerger claramente uno de los rasgos de su carácter: no le resultaba fácil escribir su trabajo para publicar. No tenía problemas al anotar sus resultados de manera coloquial para su propio uso y comprensión —de hecho, lo hizo en numerosas ocasiones con gran disciplina—, pero el escribir para publicar requería un formato didáctico formal en el cual tenía que presentar no tanto un relato de cómo había calculado algo sino más bien un análisis coherente paso a paso de los resultados finales, usando el lenguaje y las conexiones con las que el resto de la comunidad se sintiera cómodo.

Además, estaba la otra cuestión de conseguir que las cosas fueran correctas exactamente. Cuando Feynman trabajaba sobre sus

propios problemas, las respuestas eran con frecuencia intuitivas, y luego podía comprobar si tenía razón tratando muchos ejemplos específicos. No seguía una clara cadena lógica y, no obstante, era consciente de que esto era lo requerido para los artículos publicados. Esto le supuso un gran esfuerzo; para Feynman fue peor que si le hubieran sacado una muela.

Su trabajo apareció finalmente en 1947 en la revista *Reviews of Modern Physics* tras haber sido rechazado por la revista más convencional de investigación *Physical Review*. Sin embargo, no habría aparecido publicado ese año si sus amigos Bert y Mulaika Corben, a quienes visitó el verano de 1947, no le hubieran obligado a escribir el artículo durante su estancia en su casa. Bert lo describió así: «Encerramos prácticamente a Dick en una habitación y le dijimos que empezara a escribir». La historia empeoró con los años, y en la época en que el físico Freeman Dyson —quien dijo de Feynman que «¡hacían falta medidas extremas para persuadirlo de escribir algo!»— la relató en sus memorias, estaba centrada en Mulaika y era más extrema: «Ella llevó a Feynman a su casa (de ella) y, simplemente, lo encerró en una habitación y se negó a dejarlo salir hasta que hubiera escrito el artículo. Creo que incluso se negó a darle de comer hasta que lo escribiera».

Sea como fuere, reelaborar su tesis le permitió no solo revisar sus viejas ideas, sino además extenderlas de manera que su formulación de la mecánica cuántica empezó a ser más visual. Comenzó a «pensar» en términos de caminos. De hecho, en su artículo, Feynman describe la mecánica cuántica explícitamente en



este nuevo lenguaje —en términos de «suma sobre caminos»— por primera vez. Como diría más tarde: «La claridad la conseguí al escribir el artículo de *RMP*. Podía ver el camino, cada camino tenía una amplitud». Con este trabajo, Feynman completó su reformulación de nuestro conocimiento de la mecánica cuántica. La verdadera significación de la reformulación y el reconocimiento de que en algún nivel profundo podría ser no solo más fundamental que las descripciones convencionales, sino también mucho más poderosa, tardaría algún tiempo en hacer mella, en Feynman y en el resto de la comunidad.

Liberado de esa carga, Feynman retomó entonces la tarea de tratar de formular una teoría cuántica relativista del electromagnetismo. Abordó esta tarea como hacía con ese tipo de problemas, explorando todas las maneras posibles de tener una imagen de ella. Como lo describió en una carta a Ted Welton: «La esperanza es que una ligera modificación de una de las imágenes arreglará algunas de las dificultades actuales. Verdaderamente solo *necesitamos* calcular. Pero una imagen es ciertamente una *conveniencia* y no se hace nada equivocado al construirla».

Para comprender la naturaleza de las imágenes con las que jugaba Feynman, primero necesitamos explorar un poco la notable nueva complejidad que Dirac había introducido en la mecánica cuántica al descubrir su famosa ecuación sobre las propiedades relativistas de partículas como los electrones. Como ya he comentado, los electrones poseen una propiedad llamada «espín», porque acarrean con ellos un «momento angular» intrínseco, la propiedad que tienen

los objetos extensos si están girando. Clásicamente no existe tal concepto para una partícula puntual, que no puede comportarse como si girase porque no hay ningún «centro» (esto es, otro punto) para girar en torno a él. A fin de poseer momento angular, como, por ejemplo, la rueda de una bicicleta dando vueltas, los objetos clásicos deben tener extensión espacial.

Este extraño momento angular de espín, que como todas las cosas en mecánica cuántica está «cuantizado» (es decir, existe solo en múltiplos enteros de cierta unidad), desempeña un papel central en el comportamiento no solo de los electrones sino, de hecho, de todos los materiales. Los electrones que orbitan alrededor de los núcleos en los átomos poseen momento angular, análogamente á como lo poseen los planetas que orbitan en torno al Sol, pero sus valores están cuantizados, como mostró por primera vez Niels Bohr. Resulta que el momento angular interno (o intrínseco) de los electrones vale la mitad de la unidad más pequeña de momento angular orbital, así que decimos que los electrones son partículas de espín  $\frac{1}{2}$ .

Esta propiedad es la que finalmente explica por qué existen objetos sólidos y se comportan como lo hacen. Wolfgang Pauli, el gran físico teórico austríaco, había explicado que se podían entender las propiedades atómicas si se postulaba lo que llamó «principio de exclusión», que reza: dos electrones, o cualquier otra partícula de espín  $\frac{1}{2}$  (protones y neutrones son partículas de ese tipo), no pueden coexistir en el mismo estado cuántico en el mismo lugar al mismo tiempo.

Los dos electrones que orbitan en el átomo de helio, por ejemplo, no podrían ocupar normalmente la misma órbita. Pero sí pueden hacerlo si «espinean» en dos direcciones diferentes (sus espines «apuntan» en dos direcciones diferentes), de modo que no se hallan en estados cuánticos idénticos. Si, por ejemplo, consideramos después el siguiente elemento, el litio, que tiene tres electrones orbitando en torno al núcleo, no queda ninguna opción independiente para el tercer electrón, el cual, por consiguiente, debe orbitar en torno al núcleo en una órbita diferente, presumiblemente de mayor energía.

Toda la química puede entenderse como resultado de la aplicación de este simple principio a la predicción de los niveles de energía de los electrones en los átomos.

De manera similar, si acercamos dos átomos uno al otro, no solo hay una repulsión eléctrica entre los electrones de un átomo y los del otro, sino que el principio de exclusión de Pauli nos dice que existe además una repulsión adicional porque dos electrones cualesquiera no pueden estar en el mismo lugar en el mismo estado cuántico. Por consiguiente, los electrones de un átomo son empujados para separarse de los de los átomos vecinos, de modo que no coincidan en la misma posición en la misma configuración orbital. Estos dos efectos, el segundo resultante del principio de exclusión de Pauli, se combinan para determinar las propiedades mecánicas de todos los materiales que conforman el mundo de nuestra experiencia.

El físico italiano Enrico Fermi analizó después la estadística de los sistemas de muchas partículas idénticas con espín  $\frac{1}{2}$ , tales como los electrones, y demostró que el principio de exclusión regía fuertemente el comportamiento de estos estados de muchas partículas. En la actualidad llamamos a todas esas partículas con espín  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ , y así sucesivamente «fermiones», en honor a Fermi. A otras partículas con valores enteros de espín, incluyendo los fotones —los cuantos de los campos electromagnéticos con espín 1—, así como aquellas partículas sin espín (o de espín 0), se las llama «bosones», en honor al físico indio Satyendra Bose, quien, junto con Albert Einstein, describió el comportamiento colectivo de estas partículas.

«Jugando», como lo describió después, con la descripción matemática de las partículas de espín  $\frac{1}{2}$ , en 1928 Dirac consiguió deducir una ecuación para los electrones que daba cuenta de su espín y estaba de acuerdo con los requisitos de cómo una teoría debe comportarse a velocidades cercanas a la de la luz («relativistas») según la teoría de la relatividad de Einstein. Fue un logro notable, y tuvo una predicción incluso más notable, tan extraordinaria, de hecho, que Dirac y otros físicos no la creyeron (en principio). La teoría predecía que además de electrones debían existir partículas como ellos, que eran soluciones de energía negativa de las ecuaciones. Sin embargo, como la energía negativa parecía no física —las ecuaciones de Einstein siempre asocian energía positiva con masa—, había que interpretar estas partículas de una manera algo diferente.

La interpretación a la que llegó Dirac me recuerda un viejo chiste que una vez oí acerca de dos matemáticos que están sentados en un bar en París mirando hacia un edificio cercano. Nada más empezar el almuerzo, ven a dos personas que entran en el edificio. Durante el postre, observan a tres personas saliendo del edificio. Entonces uno de los matemáticos se vuelve hacia el otro y dice: «¡Si una persona más entra en ese edificio, estará vacío!».

De forma análoga, si interpretamos la energía negativa como si tuviera menos energía que cero, podríamos imaginar perversamente que mientras que un electrón tiene energía positiva, y un estado sin ningún electrón tiene energía cero, entonces un estado de energía negativa simplemente tiene menos que cero electrones. Y un estado con energía negativa precisamente igual y opuesta a la energía de un solo electrón sería entonces descrito como teniendo un electrón menos que un estado con cero electrones.

Aunque como declaración formal esto es consistente, parece ridículo físicamente. ¿Qué significa físicamente «un electrón menos que cero electrones»? Una pista es pensar sobre la carga de un electrón: puesto que los electrones tienen carga eléctrica negativa, y un estado con cero electrones tiene cero carga eléctrica, entonces un estado con uno menos que cero electrones *tendría* carga eléctrica positiva. Dicho de otra manera, tener un número negativo de electrones es equivalente a tener un número positivo de partículas cargadas positivamente. Por consiguiente, el estado de energía negativa que aparecía en la ecuación de Dirac podía interpretarse

como que representa una partícula de energía positiva con carga igual y opuesta a la carga negativa del electrón.

Pero había al menos un gran problema con *esta* interpretación exótica. Se conocía *solo una* partícula con una carga positiva igual y opuesta a la del electrón: el protón. Pero el protón no se parece en nada al electrón; por ejemplo, es dos mil veces más pesado.

Pronto, inmediatamente después de deducir su ecuación, Dirac se había dado cuenta de otro importante problema con los estados de energía negativa. Recuérdese que en mecánica cuántica se exploran todas las configuraciones mientras evoluciona el sistema. En particular, como él lo expresó, en su nueva teoría «pueden tener lugar transiciones en las que cambia la energía de un electrón de un valor positivo a otro negativo incluso en ausencia de todo campo externo, y la energía excedente, al menos en la cantidad  $2mc^2$ , se emite en forma de radiación». Dicho en un lenguaje más sencillo, un electrón podía decaer espontáneamente en la partícula cargada positivamente correspondiente al estado de energía negativa. Pero esto cambiaría la carga total del sistema, lo que no está permitido en electromagnetismo. Además, si la partícula cargada positivamente fuera el mucho más pesado (que el electrón) protón, tal transición violaría también la conservación de la energía.

A fin de abordar estos problemas, Dirac hizo una propuesta radical. Recuérdese que los electrones son fermiones, y por tanto solo puede existir una partícula en cada estado cuántico diferente. Dirac imaginó lo que ocurriría si el espacio vacío contuviera realmente un «mar» infinito de electrones de energía negativa y todos los estados

cuánticos disponibles de estas partículas pudieran estar ocupados. No habría entonces estados accesibles en los que los electrones reales de energía positiva pudieran decaer. Además arguyó que si un estado de energía negativa se desocupara por algún proceso, esto dejaría un «agujero» en la distribución. El agujero, correspondiente a la ausencia de un electrón cargado negativamente en el mar, podría entonces identificarse con una partícula cargada positivamente, que él a su vez identificó con el protón.

La suspensión de la incredulidad que llevaba consigo la afirmación de Dirac era enorme. Implicaba primero que el vacío —es decir, el espacio vacío— contenía de alguna manera un número infinito de partículas no observables correspondientes a los niveles de energía negativa llenos, y además que el extraño agujero o hueco en estos niveles llenos se observaría como un protón, una partícula completamente distinta al electrón salvo por la magnitud de su carga.

Por intelectualmente valeroso que hubiera sido postular un mar infinito de partículas de energía negativa, la propuesta de que los huecos en este mar representaban protones fue un raro acto de cobardía intelectual por parte de Dirac. Los estados de energía negativa aparecían en su ecuación completamente simétricos a los estados de energía positiva, sugiriendo que tenían exactamente *la misma* masa, en manifiesta contradicción con el hecho de que el protón es mucho más pesado. Dirac trató de obviar este manifiesto problema mediante la suposición de que en el mar lleno las interacciones entre partículas serían tales que los pocos agujeros

que pudieran aparecer recibirían contribuciones adicionales de estas a su masa.

Si hubiera tenido más valor, Dirac podría sencillamente haber predicho que estos agujeros representaban nuevas partículas elementales en la naturaleza con masa igual a la del electrón, pero con carga opuesta. Pero como diría más tarde: «Simplemente no me atrevía a postular una nueva partícula en ese momento, pues el clima general de opinión entonces era contrario a nuevas partículas».

Dicho quizá más caritativamente, Dirac podría haber esperado explicar todas las partículas elementales entonces conocidas, electrones y protones, como resultantes de manifestaciones diferentes de una partícula única, el electrón. Esto refleja el espíritu de la física: explicar fenómenos manifiestamente distintos como una mera representación de las dos caras de la misma moneda. En cualquier caso, esta confusión no duró mucho. Otros físicos bien conocidos que habían examinado la teoría, entre quienes se encontraban Werner Heisenberg, Herman Weyl y Robert Oppenheimer, infirieron correctamente que las interacciones en el «mar de Dirac» nunca añadirían masa a los agujeros y entonces no resultaría que estos tuvieran distinta masa que los electrones. A la larga incluso Dirac se vio obligado a reconocer que su teoría predecía la existencia de una nueva partícula en la naturaleza, que llamó «antielectrón».

Dirac hizo esta concesión en 1931, y lo hizo justo a tiempo. Le llevaría solo un año a la naturaleza probarle que estaba en lo cierto,



pero existía tal escepticismo sobre la posibilidad de nuevas, pero aún no observadas, partículas elementales que, incluso tras hallar una fuerte evidencia de su existencia, el primer grupo que observó el antielectrón, o «positrón», como acabó por conocerse, no creyó sus propios datos.

Durante la década de 1930, antes de que se desarrollaran y se construyeran aceleradores de partículas, casi toda la información sobre las partículas elementales provenía de observaciones de los productos de aceleradores astrofísicos de la naturaleza, es decir, de rayos cósmicos que bombardean diariamente la Tierra, y cuyo origen se extiende desde un lugar tan «cercano» como el Sol hasta fuentes más energéticas como estrellas que explotan en distantes galaxias en los confines de nuestro universo. Dos grupos distintos de cada lado del Atlántico examinaban datos de rayos cósmicos en 1932. Un grupo, que trabajaba en el mismo laboratorio que Dirac en Cambridge (Inglaterra), bajo la dirección de Patrick Blackett, le dijo a Dirac que habían encontrado evidencias de su nueva partícula, pero que no se atrevían a publicar los resultados hasta hacer más pruebas. Entre tanto, algo quizá característico de una actitud americana más descarada, en California Carl Anderson publicó en 1933 una clara evidencia de la existencia del positrón, descubrimiento que a la larga le proporcionaría el Premio Nobel. Es interesante que, incluso después de que Blackett y su colaborador Giuseppe Occhialini fueran inducidos por el descubrimiento de Anderson a publicar sus resultados un año más tarde, aún dudaban en adscribir esta partícula a la propuesta de Dirac. A la

larga, hacia finales de 1933, incluso estos experimentadores tuvieron que admitir que si anda como un pato y grazna como un pato, probablemente es un pato. Las propiedades predichas por Dirac estaban impresionantemente de acuerdo con las observaciones, y, gustara o no, parecía que electrones y positrones —el primer ejemplo de antipartícula conocido en la naturaleza— podían ser creados en pares entre los chaparrones energéticos producidos por los rayos cósmicos al bombardear núcleos atómicos. De repente, los positrones eran reales. Reflexionando sobre sus dudas iniciales a aceptar las conclusiones de su teoría prediciendo la existencia de antipartículas, Dirac diría más tarde: «Mi ecuación era más lista que yo».

En el contexto de estos exóticos y revolucionarios avances, Richard Feynman se puso manos a la obra en 1947 y 1948 para inventar «nuevas» imágenes a fin de incorporar su propia imagen emergente de la suma espacio-temporal de caminos de la mecánica cuántica. Haciendo esto, se daría cuenta de que necesitaba reinventar otra vez su forma de hacer física, precisamente cuando también trataba de reinventarse a sí mismo, con el propósito de escapar del profundo vacío de su vida personal.

## Capítulo 8

### De aquí hasta el infinito

*Parece, por tanto, que sospeché correctamente que las dificultades de la electrodinámica y las de la teoría de los agujeros de Dirac eran independientes y una podía resolverse antes que la otra.*

*RICHARD FEYNMAN en una carta fechada en 1947*

Quizá se necesitaba un hombre dispuesto a romper todas las reglas para dominar completamente una teoría como la mecánica cuántica, que rompe todas las reglas. Mientras Richard Feynman dirigía su atención otra vez a la electrodinámica cuántica (en adelante, QED, de *Quantum Electrodynamics* en inglés), estaba ya cultivando una reputación por mofarse de las normas sociales en su trabajo, en su vida amorosa y en sus relaciones institucionales. Incluso cuando estaba en Los Álamos le encantaba armar follón, descubriendo huecos en vallas de seguridad, entrando a través de ellos, y saliendo después por la puerta principal cuando no existía ningún registro de su entrada, o forzando cajas de seguridad de alto secreto y dejando en ellas mensajes.

Después de la muerte de Arline y de su recién descubierto nihilismo tras la explosión de la bomba de Trinidad, Feynman respondió a su alboroto interno apartándose de lo convencional. En adelante,

empezó a mostrarse encantado de ser diferente. Aunque antes era tímido con las mujeres, se convirtió en un mujeriego. Unos meses después de la muerte de Arline, mientras aún estaba en Los Álamos, empezó a citarse con bellas mujeres a un ritmo frenético. Dos años después, cuando su pesar finalmente emergió, fue capaz de escribir una carta a Arline exponiendo su dolor: «Estarás sorprendida de que no tenga una novia (excepto tú, amor mío) después de dos años. Pero no puedes hacer nada, cariño, ni yo tampoco. No lo entiendo, porque he conocido a muchas chicas y muy bonitas, [...] pero después de dos o tres encuentros todas ellas parecen cenizas».

Las relaciones tal vez le hicieran sentirse vacío, pero no obstante continuaron. Cuando llegó a Cornell por primera vez, Feynman aún parecía un estudiante, y en su soledad se citaba con universitarias que conocía en bailes estudiantiles. Su búsqueda de mujeres era solo comparable en intensidad a su deseo de abandonarlas. En 1947, antes de poner las notas finales de grado a sus estudiantes, partió en un famoso viaje por todo el país con el entonces estudiante de posgrado Freeman Dyson. El propósito original de esta expedición era acabar un embrollo con una mujer de Los Alamos. Habían continuado una intensa relación a distancia, y ella estaba causando que otra mujer en Ithaca<sup>3</sup> lo abandonara por celos. Entre tanto, otra mujer más, una de las varias a las que parecía haber dejado embarazadas y que abortaron, reaccionó más estoicamente

---

<sup>3</sup> Ciudad del estado de Nueva York, sede de la Universidad de Cornell, donde Feynman trabajaba entonces. (N. del t.)

en una carta que le dirigió, en la que también corregía el error de él al escribir su nombre.

Durante el tiempo que permaneció en Ithaca no tuvo un solo domicilio. Solía permanecer con amigos, normalmente casados, y estas visitas acababan con frecuencia mal como resultado de sus impertinencias sexuales. Años más tarde, cuando pasó un año en Brasil, ideó un conjunto de reglas sencillas para seducir a mujeres, incluyendo a prostitutas, en los bares. Se hizo famoso por sus conquistas en los congresos en el extranjero.

Su atractivo era comprensible. Era brillante, divertido, confiado y carismático hasta el extremo. Era alto, y se había vuelto más atractivo con el paso de los años. Sus penetrantes ojos magnetizaban, y su energía y entusiasmo eran adictivos.

Pero no era solo en asuntos de sexo donde Feynman exhibía su falta de convencionalismo. Se rebelaba dondequiera, que se topara con lo que consideraba estupideces, con frecuencia independientemente de las formalidades acostumbradas. Un episodio con varios psiquiatras, que estaban haciendo un segundo bosquejo del estado de Feynman en el verano de 1947, fue digno de un número de Abbott y Costello<sup>4</sup> y después se hizo famoso. Como resultado de sus explosivas exclamaciones durante la entrevista psiquiátrica, Feynman fue declarado mentalmente no apto para el servicio, una conclusión que provocó que él y Bethe estuvieran riendo sin parar durante media hora antes de volver al trabajo.

---

<sup>4</sup> Pareja de actores cómicos de la década de 1940 que trabajaron en varias películas, generalmente de argumentos absurdos, muy populares en EE.UU. en esa época. (N. del t.)

Feynman cultivaría más adelante este tipo de anécdotas como parte de la «mitología de Feynman» que le gustaba fomentar. Pero en 1947 no era aún famoso, y la difusión de sus actitudes y comportamiento nada convencionales coincidió con lo que llegó a ser el periodo de dos años más activo de su vida, una etapa de descubrimientos experimentales que convirtieron la solución de un oscuro problema matemático en algo urgente para el progreso de la física.

El descubrimiento experimental del positrón en 1932 supuso una notable vindicación de la electrodinámica cuántica (QED) relativista de Dirac y representó la primera vez en la historia en que la existencia de una partícula elemental no observada previamente se intuyó sobre la base de un razonamiento puramente teórico. Sin embargo añadió, literalmente, un nuevo nivel infinito y frustrante de confusión para los físicos que trataban de dar sentido a las predicciones de la teoría. Pues una vez verificada la existencia de positrones, las horribles complicaciones introducidas por la posibilidad de un mar de Dirac y las interacciones de los electrones y estas nuevas partículas, los positrones, con la radiación —las mismísimas interacciones que Feynman había esperado eliminar de la teoría cuántica del electromagnetismo— le plantaron cara directamente a los físicos.

Mientras que las interacciones predichas de electrones individuales con fotones individuales o incluso con radiación electromagnética clásica —luz u ondas de radio, por ejemplo— estaban notablemente de acuerdo con las observaciones, cuando los físicos trataban de ir más allá de esta aproximación más simple, incluyendo interacciones

cuánticas múltiples o incluso tratando de abordar el perenne problema de un electrón interaccionando consigo mismo —el mismo problema al que Feynman intentó meter mano en primer lugar en la escuela graduada—, sus respuestas seguían siendo infinitas y por consiguiente físicamente insostenibles. Esta incapacidad de dar sentido a una teoría que era claramente correcta en algún nivel profundo podía ignorarse sin problemas por entonces en casi todas las aplicaciones prácticas, pero puso los nervios a flor de piel a un grupo selecto de ambiciosos físicos. El grado de desesperación imperante puede deducirse de declaraciones recogidas a algunos de los "físicos teóricos más importantes de la época. Heisenberg escribió en 1929 que se sentía frustrado tratando de entender las ideas de Dirac y que estaba preocupado de que pudiera estar «irritado para siempre por Dirac». Wolfgang Pauli escribió en 1929 sobre sus preocupaciones (que premonitoriamente reflejaban preocupaciones de las que muchos físicos, incluyendo Feynman, luego se hicieron eco acerca de desarrollos más recientes en física): «No estoy muy satisfecho [...]

En particular, la autoenergía del electrón me produce más dificultades que las que Heisenberg pensó al principio. Asimismo, los nuevos resultados a los que conduce nuestra teoría son muy sospechosos y el riesgo de que todo el asunto pierda contacto con la física y degenerare en pura matemática es muy grande».

Heisenberg a su vez escribió a Pauli en 1935: «Con respecto a la QED sabemos que todo está mal. Pero, a fin de encontrar la dirección en la que deberíamos ir, hemos de conocer las

consecuencias del formalismo existente mucho mejor que las conocemos». Después añadió en un artículo posterior: «La teoría actual del positrón y la QED deben considerarse provisionales». Incluso Dirac dijo acerca de la QED en 1937: «A causa de su extrema complejidad, la mayoría de los físicos estarían contentos de ver su final».

Las preocupaciones eran tan grandes que estos físicos, y en particular el gran físico danés Niels Bohr, tenían la inquietud de que quizá la misma mecánica cuántica podría estar en la raíz del problema y podría tener que ser reemplazada por una física distinta. Bohr escribió a Dirac en 1930: «Últimamente he estado pensando un montón sobre los problemas de la relatividad y creo firmemente que la solución de nuestras dificultades actuales no se alcanzará sin una revisión de nuestras ideas físicas generales más profunda que la contemplada en la mecánica cuántica actual».

Incluso Pauli sugirió, en 1936, que la mecánica cuántica podría tener que ser revisada cuando trataba sistemas, como la teoría de los agujeros de Dirac, que permiten que un número infinito de partículas esté presente en el espacio vacío. Pues aparte del bien conocido infinito asociado con la autoenergía del electrón debida a su interacción con su propio campo electromagnético, la introducción de las antipartículas por Dirac creó una nueva clase de interacciones infinitas que enfangaron más las aguas cuánticas. Estas nuevas interacciones no implicaban los fotones intermediarios que Feynman y Wheeler habían trabajado tan duramente para hacer desaparecer, sino pares de electrones y positrones «virtuales».



Los físicos ahora sabían que partículas y antipartículas pueden aniquilarse en radiación pura, y que el proceso inverso —la conversión completa de energía en masa— en principio también podía ocurrir. No obstante, existen limitaciones en esta conversión. Por ejemplo, un electrón y su antipartícula, un positrón, no pueden aniquilarse en una sola partícula de radiación (un fotón) por la misma razón que cuando explota una bomba todos los fragmentos no vuelan en una dirección única. Si el electrón y el positrón van el uno hacia el otro a velocidades iguales y opuestas, su momento total es cero. Si se produjera un solo fotón en su aniquilación, este saldría a la velocidad de la luz en alguna dirección, acarreando un momento distinto de cero. Por lo tanto, han de producirse al menos dos fotones al aniquilarse un electrón y un positrón, de modo que las partículas emitidas pueden moverse en la misma dirección y sentidos opuestos. Análogamente, un único fotón no puede convertirse súbitamente en un par electrón-positrón. Deben converger dos fotones para producir el par final.

Pero recuérdese que con las partículas virtuales todas las apuestas están hechas, y la energía y el momento no necesitan conservarse siempre que la partícula virtual desaparezca en un tiempo suficientemente corto para que no pueda ser medida directamente. Por lo tanto, un fotón virtual puede transformarse espontáneamente en un par electrón-positrón, con tal de que este se aniquile transformándose en el fotón virtual de partida en un tiempo muy corto.

El proceso en que un fotón se «divide» momentáneamente en un par electrón-positrón se llama «polarización del vacío». Recibe este nombre porque en un medio real, como cualquier objeto sólido constituido por átomos, que contiene cargas positivas y negativas, si enchufamos un campo eléctrico externo grande podemos «polarizar» el medio separando las cargas de tipo distinto; las cargas negativas serán impelidas en una dirección mientras que las positivas lo serán en la opuesta. Entonces un material neutro permanecerá neutro, pero las cargas de distintos signos se separarán espacialmente. Esto es lo que sucede momentáneamente en el espacio vacío, así que un fotón se divide temporalmente en un electrón cargado negativamente y una antipartícula cargada positivamente, el positrón. Por consiguiente, el espacio se polariza por poco tiempo.

Da igual cómo lo llamemos, un electrón, que previamente se había considerado que tenía una nube de fotones virtuales a su alrededor, ahora ha de considerarse rodeado por una nube de fotones virtuales *más* pares electrón-positrón. En cierto sentido, la imagen es solo otra forma de pensar acerca de la interpretación de Dirac de los positrones como «agujeros» en un mar infinito de electrones en el vacío. De cualquier manera, una vez incluimos la relatividad y la existencia de positrones, la teoría de un único electrón se convierte en una teoría de un número infinito de electrones y positrones.

Además, igual que la emisión y absorción de fotones virtuales por un solo electrón producía en los cálculos una autoenergía infinita del electrón, la producción de pares de partícula-antipartícula virtuales producía una nueva corrección infinita en los cálculos de

QED. Recuérdese una vez más que la fuerza eléctrica entre partículas puede considerarse debida al intercambio de fotones virtuales entre ellas. Si ahora los fotones podían dividirse en pares electrón-positrón, este proceso cambiaría la intensidad de la interacción entre partículas y entonces desplazaría la energía calculada de interacción entre un electrón y un protón en un átomo como el hidrógeno. El problema era que el desplazamiento calculado daba infinito.

El hecho frustrante era que la teoría de Dirac hacía predicciones muy precisas para los niveles de energía de electrones en átomos con tal de que se considerara solo el intercambio de fotones individuales y se descartaran los fastidiosos efectos de orden superior, que daban lugar a infinitos. Además, la predicción de Dirac de los positrones había sido confirmada por los datos experimentales. Si no hubiera sido por esos hechos, muchos físicos, como Dirac dio a entender, habrían preferido simplemente prescindir completamente de la electrodinámica cuántica (QED).

Resultó que lo que se necesitaba para resolver todas estas dificultades no era un completo abandono de la mecánica cuántica, ni tampoco dejar de lado todas esas partículas virtuales, sino más bien desarrollar una comprensión más profunda de cómo implementar los principios básicos de la teoría cuántica en el contexto relativista. Habría que seguir una larga y tortuosa ruta, y la guía proporcionada por algunos experimentos clave, antes de que este hecho, oculto en un cenagal de abrumadores y complejos cálculos, se revelara claro a Feynman y al resto del mundo.

El proceso de descubrimiento empezó de manera lenta y confusa, como es habitual. Tras acabar su artículo en *Reviews of Modern Physics*, Feynman dirigió su atención una vez más a la teoría de Dirac. Había decidido que la física volvía a ser divertida, y a pesar de su, por otra parte, agitada situación personal, su interés nunca se había alejado mucho del problema que le había obsesionado desde estudiante, la autoenergía infinita de un electrón. Era un enigma que aún no había resuelto, y era contrario a su naturaleza dejarlo pasar.

Feynman comenzó con un problema de calentamiento. Como el espín del electrón tiene sentido solo cuánticamente, empezó tratando de entender si era posible dar cuenta del espín directamente en el marco de su formulación de suma sobre caminos. Una complicación de la teoría de Dirac era que una sola ecuación tenía cuatro piezas separadas que describían, respectivamente, electrones de espín hacia arriba, electrones de espín hacia abajo, positrones de espín hacia arriba y positrones de espín hacia abajo. Puesto que el concepto normal de espín requiere tres dimensiones (un plano donde girar y un eje perpendicular en torno al cual se gira), Feynman razonó que el problema podría simplificarse si primero se considerara un mundo con solo una dimensión espacial y una dimensión temporal, donde las diferentes clases de caminos permitidos serían triviales: solo implicarían viajar hacia delante y hacia atrás en la única dimensión espacial; es decir, una línea.

Feynman era capaz de deducir la versión simplificada de la ecuación de Dirac apropiada para este mundo bidimensional si cada vez que el electrón «da la vuelta» pasando de moverse hacia la derecha a hacerlo hacia la izquierda, la amplitud de probabilidad del camino correspondiente se multiplicara por un «factor de fase», que en este caso era un «número complejo», un número exótico que lleva consigo la raíz cuadrada de  $-1$ . Los números complejos pueden aparecer en las amplitudes de probabilidad, y las probabilidades dependen del cuadrado de estos números, así que en el resultado final solo aparecen números reales.<sup>5</sup>

La idea de que de alguna manera el espín podía producir fases adicionales cuando se calculan amplitudes de probabilidad fue premonitoria. Sin embargo, cuando Feynman intentó ir más allá de una dimensión espacial y asociar factores de fase más complicados a caminos en los que los electrones daban la vuelta y salían con diferentes ángulos, obtuvo respuestas sin sentido y no pudo llegar a resultados que se correspondieran con los de la teoría de Dirac.

Feynman siguió probando diferentes opciones difusas para reformular la teoría, pero progresó poco. Sin embargo, existe un área en la que su metodología de suma sobre caminos era particularmente útil. La relatividad especial nos dice que el «ahora» de una persona puede no ser el «ahora» de otra; es decir, observadores en movimiento relativo pueden tener ideas diferentes de simultaneidad. La relatividad especial explica cómo esta idea loca) de simultaneidad es miope y cómo las leyes físicas

---

<sup>5</sup> Correctamente expresado, dependen del cuadrado del módulo de estos números. El cuadrado de un número complejo no es, en general, un número real. (N. del t.)

subyacentes son independientes de las preferencias sobre el «ahora» de diferentes observadores.

El problema con la imagen convencional de la mecánica cuántica era que esta dependía explícitamente de definir un «ahora», en el que se estableciera una configuración cuántica inicial y entonces determinar cómo evolucionaría esta configuración posteriormente. En el proceso, se entierra la invariancia relativista de las leyes físicas, ya que en el momento en que escogemos un sistema de referencia particular para definir la función de onda inicial y un instante a llamar  $t = 0$ , perdemos el contacto explícito con la subyacente relativista, marco independiente de la belleza de la teoría.

Sin embargo, la imagen espacio-temporal de Feynman estaba precisamente ajustada para hacer manifiesta la invariancia relativista de la teoría. En primer lugar, venía definida en términos de cantidades —las lagrangianas— que podían escribirse de forma explícita relativistamente invariable. Y, en segundo lugar, como el procedimiento se suma sobre caminos trata el espacio y el tiempo en conjunto, no hemos de restringirnos a definir puntos específicos del espacio o del tiempo. Por consiguiente, Feynman se había entrenado en unir cantidades en QED —que de otro modo podían considerarse separadamente— en combinaciones que se comportaban de una forma en la que las propiedades de la relatividad eran manifiestas. Aunque no había hecho ningún progreso real en reformular explícitamente la teoría de Dirac, a partir de primeros principios, de manera que resolviera los temas

que le preocupaban, los trucos que había desarrollado se mostrarían después de importancia crucial en la solución definitiva. La solución apareció a la vista, como suele ocurrir, con un experimento. Ciertamente, aunque los teóricos normalmente se dejan guiar por los resultados experimentales, resulta difícil excederse en recalcar lo literalmente importantes que fueron en impeler el progreso en este caso. Hasta este punto, los infinitos eran frustrantes para los teóricos, pero se quedaban prácticamente en eso. Con tal de que las predicciones de orden cero de la ecuación de Dirac fueran suficientes para explicar todos los resultados de la física atómica, dentro de la precisión experimental alcanzable, los teóricos podían estar preocupados por el hecho de que las correcciones de orden superior, que tendrían que haber sido pequeñas, fueran de hecho infinitas, pero los infinitos no eran todavía un impedimento práctico real para usar la teoría en un contexto físico.

A los teóricos les encanta especular, pero he descubierto que hasta que los experimentadores producen realmente resultados concretos que sondan la teoría en un nivel nuevo, es difícil para los teóricos tomar incluso sus propias ideas lo suficientemente en serio para explorar rigurosamente otras ramificaciones o proponer soluciones prácticas de problemas existentes. El preeminente físico experimental estadounidense de esa época, I. I. Rabi, que había hecho de la Universidad de Columbia la capital mundial de la física atómica, reflexionó sobre esta incapacidad de los teóricos de afrontar los desafíos de la electrodinámica cuántica en ausencia de

una guía experimental. Hay constancia de que en la primavera de 1947 le dijo un día a un colega mientras comían: «Los pasados dieciocho años han sido los más estériles del siglo».

Todo eso cambió en unos meses. Como ya he dicho, hasta entonces los cálculos de orden inferior llevados a cabo con la teoría relativista de Dirac producían resultados para el espectro de los niveles de energía de los electrones ligados a protones en los átomos de hidrógeno que eran suficientes no solo para entender las características generales del espectro, sino también para lograr un acuerdo cuantitativo con la observación, aparte de unas pocas posibles inconsistencias que surgían en el mismísimo límite de la precisión experimental y eran entonces ampliamente ignoradas. Sin embargo, esto fue así hasta que un valiente intento del físico americano Willis Lamb —que trabajaba en el grupo de Columbia de Rabi y fue uno de los últimos de una raza de físicos igualmente aptos en el laboratorio y realizando cálculos— lo cambió todo.

Recuérdese que el gran éxito inicial de la teoría cuántica en las primeras décadas del siglo XX residió en explicar el espectro de la luz emitida por el hidrógeno. Niels Bohr fue el primero en proponer una explicación mecánico-cuántica bastante *ad hoc* para los niveles de energía en el átomo de hidrógeno: los electrones eran capaces de saltar solo entre niveles fijos al absorber o emitir radiación. Más tarde, Schrödinger, con su famosa ecuación de onda, mostró que los niveles de energía del electrón en el átomo de hidrógeno podían ser calculados (deducidos) usando precisamente su «mecánica



ondulatoria», en lugar de «por decreto» como en el caso del átomo de Bohr.

Una vez que Dirac dedujo su versión relativista de la QED, los físicos podían intentar reemplazar la ecuación de Schrödinger por la de Dirac a fin de predecir niveles de energía. Así lo hicieron, y descubrieron que los niveles de energía de los diferentes estados eran «divididos» en niveles muy próximos entre sí, debido a efectos relativistas (por ejemplo, los electrones más energéticos en los átomos serían más masivos según la relatividad) y el espín no nulo de los electrones incorporado a la ecuación de Dirac. Y he aquí que las predicciones de Dirac estaban de acuerdo con las predicciones de los espectros del hidrógeno resueltos más finamente, en las que lo que se veía como frecuencias únicas de emisión y absorción aparecía ahora dividido en dos frecuencias diferentes y muy finamente separadas de la luz. Esta *estructura fina* del espectro, como llegó a ser conocida, fue otra justificación de la teoría de Dirac.

En 1946, Willis Lamb decidió medir la estructura fina del hidrógeno con más precisión que las medidas anteriores, a fin de poner a prueba la teoría de Dirac. La propuesta del experimento explicaba su motivación: «El átomo de hidrógeno es el más simple que existe, y el único para el que pueden hacerse cálculos teóricos esenciales exactos. No obstante, la presente situación experimental es tal que el espectro observado del átomo de hidrógeno no proporciona un test muy crítico. Se obtendría un test crítico a partir de una medida de la estructura fina».

El 26 de abril de 1947 (en la época en que el tiempo entre proponer un experimento en física de partículas y llevarlo a cabo era del orden de meses, no décadas), Lamb y su estudiante Robert Retherford llevaron a cabo con éxito una notable medida que antes había sido impensable. El resultado era de igual modo asombroso.

La teoría de Dirac de orden inferior, como antes la de Schrödinger, predecía que había que atribuir la misma energía a dos estados diferentes del electrón en el átomo de hidrógeno con el mismo momento angular total —resultante de la suma del momento angular de espín y el momento angular orbital—, incluso si las dos partes de la suma eran diferentes en los dos estados. Sin embargo, el experimento de Lamb probó definitivamente que la energía de los electrones en un estado difería de la energía de los electrones en el otro. Observó específicamente que las transiciones de los electrones entre uno de los estados y un estado fijo más alto (de mayor energía) en hidrógeno daba lugar a emisión o absorción de luz cuya frecuencia difería en unos mil millones de ciclos por segundo comparada con la de las transiciones de los electrones entre el otro estado y el estado más alto fijo. Esto puede parecer mucho, pero las frecuencias características de la luz emitida y absorbida entre niveles de energía en hidrógeno eran unos diez millones de veces mayores que esta diferencia de frecuencias; por consiguiente, Lamb tuvo que medir frecuencias con una precisión mejor que una parte en diez millones.

El estado de la física teórica siguiente al «golpe» de Dirac era tal que el impacto de esta casi imperceptiblemente pequeña, aunque

claramente no cero, diferencia con las predicciones de la teoría de Dirac fue profundo. De repente, el problema con la teoría de Dirac se concretaba. No daba vueltas alrededor de algún oscuro y mal definido conjunto de resultados infinitos, sino que ahora caía sobre datos experimentales reales y finitos que podían computarse. Feynman describió después este impacto a su típica y colorida manera: «Creyendo entender la geometría, y deseando ajustar la diagonal de un cuadrado de cinco pies, traté de calcular cuánto debe ser de larga. No siendo muy experto, obtuve infinito, lo cual no sirvió de nada [...] No es filosofía sino el comportamiento de cosas reales tras lo que vamos. Así que, desesperado, lo medí directamente. ¡Fíelo aquí! Aproximadamente siete pies, no infinito ni cero. Así pues, hemos medido esas cosas para las que nuestra teoría da respuestas tan absurdas».

En junio de 1947, la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos convocó un pequeño congreso de las mayores mentes teóricas que trabajaban en la teoría cuántica de la electrodinámica (afortunadamente, el antiguo supervisor de Feynman, John Wheeler, era uno de los organizadores, así que Feynman fue invitado) en un pequeño hotel en Shelter Island, al lado de Long Island, Nueva York. El propósito del Congreso sobre los fundamentos de la teoría cuántica era explorar los problemas destacados en teoría cuántica que habían sido dejados de lado durante la guerra, cuando Feynman y sus colegas se afanaban en producir la bomba atómica. Además de Feynman, se encontraban

allí todas las luces directoras de Los Alamos, de Bethe a Oppenheimer, y la joven superestrella teórica Julián Schwinger.

Fue en este pequeño encuentro, que empezó de manera adecuadamente espectacular, con la policía escoltando a los famosos héroes de guerra científicos «atómicos» a través de Long Island, donde Lamb presentó los resultados de su experimento. Este fue el momento culminante del encuentro, al que Feynman se refirió después como el congreso más importante de los que había asistido. Sin embargo, en lo concerniente al trabajo de Feynman, y probablemente para todos los teóricos dedicados a los problemas de la electrodinámica cuántica (QED), la consecuencia más importante del congreso no fue un cálculo que realizó Feynman, sino más bien un cálculo que su mentor, Hans Bethe, llevó a cabo en el tren de vuelta a Ithaca desde la ciudad de Nueva York, donde había permanecido unos días para visitar a su madre. Bethe estaba tan excitado por el resultado que había obtenido que telefoneó a Feynman desde Schenectady para contárselo. Como era habitual en él, cuando finalmente se le presentaba un número experimental, Bethe encontraba irresistible usar cualquier maquinaria teórica, por limitada que fuera, para obtener una predicción cuantitativa que pudiera ser comparada con el resultado experimental. Para su inmensa sorpresa y satisfacción, incluso sin una completa comprensión de cómo tratar los extraños infinitos de la QED, Bethe aseguró entender la magnitud y el origen del desplazamiento de frecuencia que ya había llegado a conocerse como «el desplazamiento Lamb».

Para Feynman, Schwinger y el resto de la comunidad, el guante había sido arrojado.

## Capítulo 9

### Dividiendo un átomo

*Puede llegar a conocerse una cantidad de verdad mucho más grande que la que puede ser probada.*

*RICHARD FEYNMAN, conferencia Nobel, 1965*

Cuando Willis Lamb presentó su resultado para empezar el congreso de Shelter Island, inmediatamente surgió la cuestión de lo que podría haber causado la discrepancia entre las observaciones y la teoría de la QED de Dirac. Oppenheimer, que dominaba la reunión, sugirió que quizá la fuente del desplazamiento de frecuencia podría ser la misma QED, si alguien pudiera realmente encontrar cómo domar los infinitos no físicos provenientes de correcciones de orden superior en la teoría. El esfuerzo de Bethe de hacer justo eso estaba basado en ideas de Oppenheimer y de los físicos H. A. Kramers y Victor Weisskopf, quien más tarde tomaría, este último, un permiso del MIT para pasar a ser el primer director general del CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear), en Ginebra.

Kramers hizo énfasis en que como el problema de las infinitas contribuciones del electromagnetismo retrocedían hasta la autoenergía clásica de un electrón, los físicos deberían centrarse en cantidades observables, que eran por supuesto finitas, al expresar

los resultados de los cálculos. Por ejemplo, el término de «masa» que aparecía en las ecuaciones, y a su vez recibía correcciones de autoenergía infinitas, no debía considerarse susceptible de representar la masa física medida de la partícula; llámesele en su lugar «masa desnuda». Si el término de «masa desnuda» de la ecuación fuera infinito, quizá la suma de este término y la corrección infinita de autoenergía podría hacerse finita si ambos infinitos se cancelaran mutuamente; entonces quedaría un residuo finito que podría ser igual a la masa medida experimentalmente.

Kramers propuso que todas las cantidades infinitas que se calculan en electrodinámica, al menos para electrones moviéndose a velocidades no relativistas, podían expresarse en términos de la contribución infinita de autoenergía a la masa en reposo del electrón. En este caso, con tal de que se quitara esta única cantidad infinita expresando todos los resultados en términos de la masa finita medida, todos los cálculos podrían proporcionar respuestas finitas. Al hacer eso, se cambiaría la magnitud, o la *normalización*, del término de masa que aparece en las ecuaciones fundamentales, y este proceso llegó a ser conocido como «renormalización».

Weisskopf y Schwinger consideraron explícitamente la teoría cuántica relativista de la electrodinámica en un esfuerzo para implementar esta idea. En particular, demostraron que el infinito que se calculaba en la autoenergía del electrón se hacía en realidad algo menos severo cuando se incorporaban efectos relativistas.

Motivado por estos argumentos, Bethe realizó un cálculo aproximado de tal contribución finita. Como dijo Feynman en su

discurso al recibir el Nobel: «El profesor Bethe es un hombre que tiene la siguiente característica: si existe un buen número experimental, ha de calcularse a partir de la teoría. Así que forzó la electrodinámica cuántica de la época a darle una respuesta a la separación de esos dos niveles [en hidrógeno]». El razonamiento de Bethe era sin duda algo así: si los efectos de los electrones y los agujeros y la relatividad parecían domar algo los infinitos, entonces quizá podía hacerse un cálculo con la teoría no relativista, que era mucho más fácil de manejar, y entonces simplemente ignorar la contribución de los fotones virtuales, mayor que una energía igual aproximadamente a la masa (energía) en reposo del electrón. Solo cuando las energías totales superan esta masa los efectos relativistas entran de golpe, y quizás al hacerlo aseguren que la contribución de partículas virtuales de energía superior se hace irrelevante.

Cuando Bethe realizó el cálculo con ese corte arbitrario en la energía de las partículas virtuales, el desplazamiento predicho de la frecuencia de la luz emitida o absorbida por los dos diferentes estados orbitales en hidrógeno era alrededor de 1.040 megaciclos por segundo, lo que estaba en concordancia con la observación de Lamb.

Feynman, con lo brillante que era, recordó más tarde no haber apreciado completamente los resultados de Bethe en ese momento. Fue después, en Cornell, cuando Bethe dio una conferencia sobre el tema, sugiriendo que si se conociera una manera completamente relativista de tratar las contribuciones de orden superior en la teoría



se podría ser capaz no solo de obtener una respuesta más precisa, sino también de demostrar la consistencia del procedimiento *ad hoc* que había empleado, cuando Feynman comprendió la importancia del resultado de Bethe y cómo todo el trabajo que había hecho hasta ese punto podía permitirle mejorar la estimación de este.

Feynman se dirigió hacia Bethe tras la conferencia y le dijo: «Puedo hacer eso para ti. Te lo traeré mañana». Su confianza se basaba en sus años de trabajo reformulando la mecánica cuántica usando su principio de acción y la suma sobre caminos, que le proporcionaba un punto de partida relativista que podía usar en sus cálculos. El formalismo que había desarrollado de hecho le permitía ajustar los caminos de partículas posibles de manera que restringieran los por lo demás términos infinitos en el cálculo cuántico mediante la limitación efectiva de la energía máxima de las partículas virtuales que entran en el cálculo, pero lo hizo de una manera que era consistente con la relatividad, justo como había requerido Bethe.

El único problema era que Feynman nunca había llevado a cabo realmente un cálculo de la autoenergía del electrón en la teoría cuántica, así que fue al despacho de Bethe, donde este podría explicarle cómo hacer el cálculo y a su vez él podría explicarle cómo usar el formalismo. En uno de esos serendípicos<sup>6</sup> accidentes que afectan al futuro de la física, cuando Feynman fue a visitar a Bethe y ambos desarrollaron sus cálculos en la pizarra, cometieron un error. Como resultado, la respuesta que obtuvieron entonces era no

---

<sup>6</sup> Serendipitous en inglés. Neologismo aún no aceptado por la RAE que viene a significar «algo fortuito que da lugar a un hallazgo inesperado, pero de alguna manera buscado indirectamente». El sustantivo, serendipity, puede traducirse como «serendipia». (N. del t.)

solo infinita, sino que además los infinitos eran de hecho peores que los que habían aparecido en el cálculo no relativista, haciendo más difícil aislar lo que eran las partes finitas.

Feynman volvió a su despacho, seguro de que el cálculo correcto debería ser finito. Al final, de una manera típicamente feynmanesca, decidió que tendría que enseñarse a sí mismo en exhaustivo detalle cómo hacer el cálculo de la autoenergía de la complicada manera tradicional usando agujeros, estados de energía negativa, etc. Una vez supo en detalle cómo hacer el cálculo de la manera tradicional, se sintió confiado en que sería capaz de repetirlo usando su nuevo formalismo de integral de camino, haciendo las necesarias modificaciones para conseguir un resultado finito, pero de manera que se obedeciera manifiestamente la relatividad.

Una vez limpiado de polvo, el resultado fue justo el esperado. Expresando todo en términos de la masa en reposo experimentalmente medida del electrón, Feynman fue capaz de obtener resultados finitos, incluyendo un resultado altamente preciso para el desplazamiento Lamb.

Resultó que otros también habían sido capaces de llevar a cabo un cálculo relativista más o menos al mismo tiempo, entre ellos Weisskopf y su estudiante Anthony French, así como Schwinger. Este, además, pudo demostrar que la doma de los infinitos que daba lugar a un desplazamiento Lamb finito y calculable también permitía un cálculo de otra desviación experimental de las predicciones de la teoría de Dirac no corregida descubierta por el

grupo de Rabi en Columbia. Este efecto tenía que ver con el momento magnético del electrón.

Puesto que el electrón actúa como si girara, y puesto que tiene carga eléctrica, el electromagnetismo nos dice que también debería comportarse como un débil imán. La intensidad de su campo magnético tendría por tanto que estar relacionada con la magnitud del espín del electrón. Pero la medida de la intensidad reveló que esta se desviaba de la simple predicción de orden inferior en alrededor de un 1 %. Esta es una cantidad pequeña, pero, no obstante, la precisión de la medida era tal que la diferencia con la predicción era real y significativa. Por tanto se necesitaba entender la teoría a un orden superior para saber si estaría de acuerdo con los datos experimentales.

Schwinger demostró que el mismo tipo de cálculo, aislando las partes infinitas y modificándolas de una manera bien definida, y expresando entonces todos los resultados calculados en términos de cantidades como la masa en reposo medida del electrón, predecía un desplazamiento en el momento magnético del electrón que se ajustaba al resultado experimental.

Rabi escribió a Bethe una exultante nota al tener noticia del cálculo de Schwinger, y Bethe replicó volviéndose a referir a los experimentos de Rabi: «Es verdaderamente maravilloso cómo esos experimentos tuyos han dado lugar a un sesgo completamente nuevo de la teoría y la teoría ha florecido en relativamente poco tiempo. Es tan excitante como en los días tempranos de la mecánica cuántica».

Finalmente, la QED había comenzado a emerger de un largo y lóbrego inicio. En los años transcurridos desde entonces, las predicciones de la teoría se han mostrado de acuerdo con los resultados experimentales con una precisión sin parangón en ningún otro lugar de la ciencia. Simplemente, no existe ninguna teoría científica mejor desde este punto de vista.

Si Feynman hubiera sido tan solo una de las personas que habían mostrado cómo calcular correctamente el desplazamiento Lamb, probablemente no estaríamos hoy conmemorando sus contribuciones. Pero el valor real de sus esfuerzos en calcular el desplazamiento Lamb, y su comprensión de cómo domar los infinitos implicados en el cálculo, era que empezó a calcular cada vez más cosas. Y en el proceso usó sus formidables habilidades matemáticas, junto con la intuición que había desarrollado en el proceso de reformular la mecánica cuántica, para desarrollar gradualmente una forma completamente nueva de representar los fenómenos implicados en la QED. Y lo hizo de una manera que dio lugar a un notable procedimiento para realizar cálculos teóricos, basado en imágenes diagramáticas espacio-temporales, las cuales estaban basadas en el método de suma sobre caminos.

El método de Feynman para resolver los problemas de la QED era a la vez original y de amplio alcance. Con frecuencia simplemente conjeturaba cuáles serían las fórmulas más probables y después comparaba sus conjeturas en diferentes contextos con resultados disponibles conocidos. Además, aunque su enfoque espacio-temporal le permitía escribir expresiones matemáticas de una

manera de acuerdo con la relatividad, los cálculos reales que llevaba a cabo no derivaban directamente de ningún marco matemático que unificara sistemáticamente la relatividad y la mecánica cuántica, aun cuando después todo funcionara correctamente.

Desde por lo menos la década de 1930 había existido, de hecho, un marco sistemático para combinar la relatividad y la mecánica cuántica. Se llamaba «teoría cuántica de campos» y era intrínsecamente una teoría de muchas, de hecho infinitas, partículas, lo que probablemente es la razón de que Feynman se mantuviera alejado de ella. En el electromagnetismo clásico, el campo electromagnético es una cantidad que viene descrita en cada punto en el espacio y el tiempo. Cuando se trata el campo cuánticamente, se encuentra que puede considerarse en términos de partículas elementales, en este caso fotones. En teoría cuántica de campos, el campo electromagnético puede considerarse un objeto cuántico, con cierta probabilidad de crear (o destruir) un fotón en cada punto del espacio. Esto permite la existencia de un número posiblemente infinito de fotones virtuales que pueden ser producidos por fluctuaciones del campo electromagnético. Fue precisamente esta complicación lo que originó que Feynman reformulara la electrodinámica de manera que esos fotones desaparecieran completamente y solo hubiera interacciones directas entre partículas. Trató entonces estas interacciones mecánico-cuánticamente usando su método de suma sobre caminos.

En medio de sus vacilaciones sobre cómo incorporar la teoría relativista de los electrones de Dirac a su procedimiento de cálculo

para la QED, Feynman tropezó con un bello truco matemático que simplificaba tremendamente los cálculos y dejaba fuera la necesidad de considerar partículas y «agujeros» como entidades separadas. Pero, al mismo tiempo, este truco deja claro el hecho de que desde el momento en que se incorpora la relatividad a la mecánica cuántica no es posible vivir en un mundo donde el número de posibles partículas es finito. La unión de la relatividad y la mecánica cuántica simplemente requiere una teoría que pueda tratar un número posiblemente infinito de partículas virtuales existiendo en cada instante.

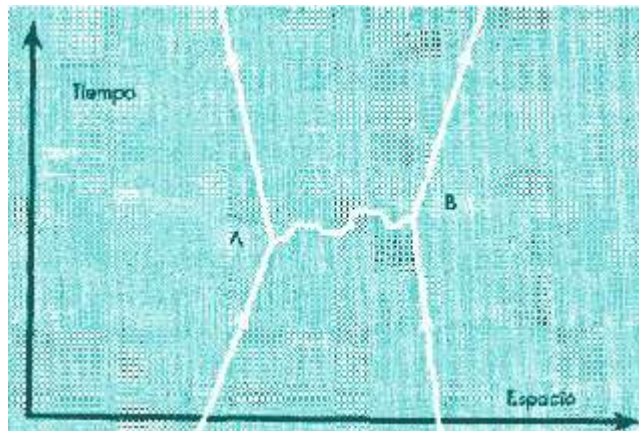
El truco usado por Feynman se hacía eco de la vieja idea que le propuso John Wheeler cuando arguyó que podría considerarse que todos los electrones del mundo surgirían de un solo electrón, con tal de que a este electrón le fuera permitido viajar tanto hacia delante como hacia atrás en el tiempo. Un electrón yendo hacia atrás en el tiempo aparecería justo como un positrón yendo hacia delante en el tiempo. De esta manera, un solo electrón yendo adelante y atrás en el tiempo (y enmascarándose como un *positrón en el* segundo caso) podría reproducirse un inmenso número de veces en cada instante. Naturalmente, Feynman señaló el fallo lógico en esta imagen arguyendo que si fuera cierta, por todas partes habría tantos positrones como electrones y no los hay.

No obstante, el que un positrón podía considerarse como un electrón viajando hacia atrás en el tiempo era una idea —Feynman se dio cuenta después de tantos años— que podía explotarse en un contexto diferente. Cuando intentó realizar cálculos relativistas, en

los que había que incluir normalmente electrones y agujeros, advirtió que podía obtener los mismos resultados incluyendo solo electrones en su imagen espacio-temporal, pero permitiendo procesos en los que los electrones pueden ir tanto hacia delante como hacia atrás en el tiempo. (La idea que mi profesor de instituto estropeó un poco cuando trató de que me interesara más la física aquel verano tanto tiempo atrás.)

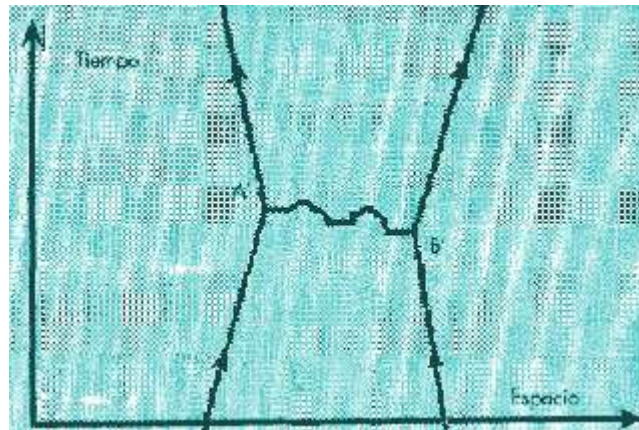
Para entender cómo apareció el tratamiento unificado de positrones y electrones de Feynman, es más fácil empezar a pensar en términos de los diagramas que este comenzó a dibujar en su momento a fin de representar el proceso espaciotemporal que surgía en su visión de suma sobre caminos de la mecánica cuántica.

Considérese el diagrama que describe el proceso espacio-, temporal de dos electrones intercambiándose un fotón virtual, emitido en *A* y absorbido en *B*:



Para calcular la amplitud mecánico-cuántica de dicho proceso, habríamos de considerar todos los posibles caminos espacio-

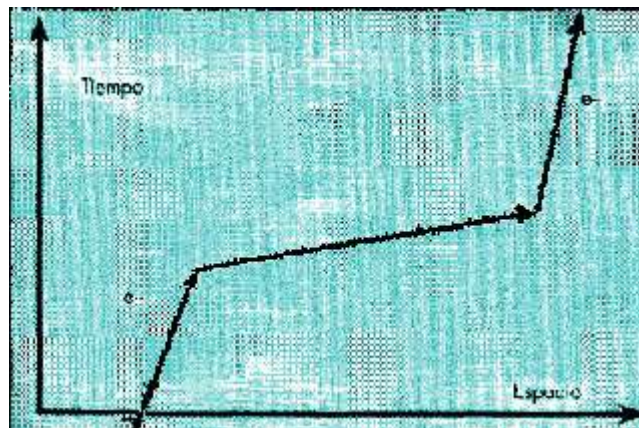
temporales correspondientes al intercambio de un fotón virtual entre las dos partículas. Puesto que no observamos el fotón, el siguiente proceso, en el cual el fotón se emite en  $B$  y se absorbe en  $A$ , cuando  $B$  es anterior a  $A$ , también contribuye a la suma.



Ahora bien, hay otra manera de considerar los dos diagramas por separado. Recuérdese que estamos tratando de mecánica cuántica, y por tanto en el tiempo entre medidas está permitido todo lo que sea consistente con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Así, por ejemplo, el fotón virtual no está restringido a viajar exactamente a la velocidad de la luz durante todo el tiempo que se mueve entre ambas partículas. Pero la relatividad dice que si viajara más deprisa que la luz, en algún sistema de referencia aparecería yendo hacia atrás en el tiempo. Si va hacia atrás en el tiempo, puede ser emitido en  $A$  y absorbido en  $B$ . En otras palabras, el segundo diagrama corresponde a un proceso idéntico al primero, excepto que ahora el fotón virtual viaja a mayor velocidad que la luz.



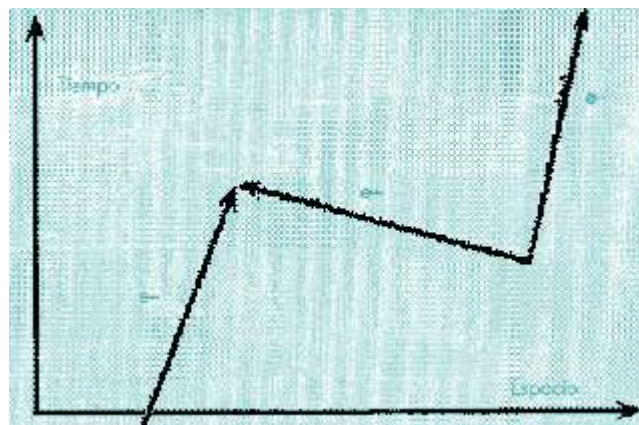
De hecho, aunque Feynman nunca lo describió explícitamente entonces, hasta donde yo sé, este mismo efecto explica por qué una teoría relativista de los electrones —esto es, la teoría de Dirac— *requiere* antipartículas. Un fotón, que no tiene carga, viajando hacia atrás en el tiempo de  $A$  a  $B$  parece igual que un fotón viajando hacia delante en el tiempo de  $B$  a  $A$ . Pero una partícula cargada viajando hacia atrás en el tiempo parece igual que una partícula de carga opuesta viajando adelante en el tiempo. Por consiguiente, el simple proceso en el que un electrón ( $e^-$ ) viaja entre dos puntos, representado en este diagrama espacio-temporal,



debe ser también acompañado por el siguiente proceso:



Pero el último proceso podría describirse con un positrón intermedio ( $e^+$ ), como sigue:



En otras palabras, parece que un solo electrón empieza el viaje, y en otro punto se crea un par electrón-positrón en el espacio vacío y un positrón virtual viaja adelante en el tiempo, aniquilándose finalmente con el primer electrón, quedando solamente el electrón final al acabar el viaje.

Más tarde, Feynman describió la situación maravillosamente en su artículo de 1949 «La teoría de positrones». Su famosa analogía era un artillero observando un camino con sus binoculares desde un

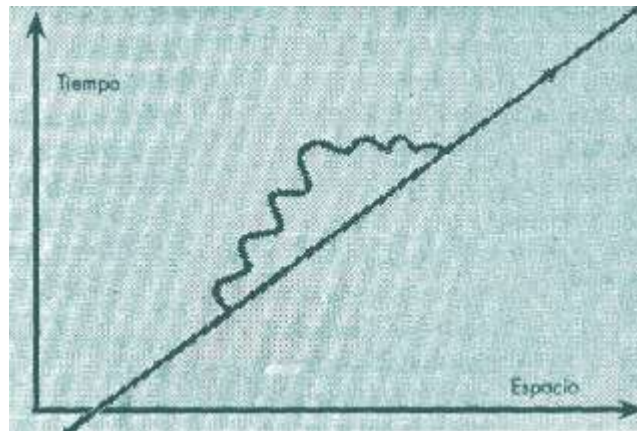
aeroplano (la guerra reciente, sin duda, le había influido en la elección de ejemplos): «Es como si un artillero que observa un solo camino a través de la mirilla de bombardero de un avión que vuela bajo de repente ve tres caminos y solamente cuando dos de ellos llegan a juntarse y desaparecen de nuevo es cuando se da cuenta de que había pasado sobre un largo zigzag en un único camino».

Por lo tanto, en teoría cuántica relativista el número de partículas ha de ser indeterminado. Justo cuando pensamos que tenemos una sola partícula, puede surgir del vacío un par partícula-antipartícula, haciendo que haya tres. Después de que la antipartícula aniquile una de las partículas (o bien su compañera o la partícula original), vuelve a haber solo una, justo como lo vería un artillero a través de su mirilla si fuera contando los caminos. El punto clave de nuevo no es simplemente que esto es *posible*, sino que viene *requerido* por la relatividad, así que en retrospectiva vemos que Dirac no tenía otra elección más que introducir antipartículas en su teoría relativista de electrones y luz.

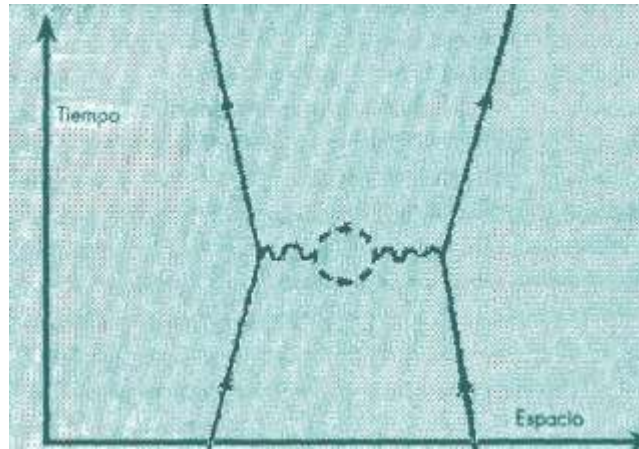
Resulta fascinante que Feynman fuera el único en indicar la posibilidad de tratar los positrones como electrones temporalmente invertidos en sus diagramas porque ello implica inmediatamente que su temprana aversión a la teoría cuántica de campos estaba fuera de lugar. Su desarrollo diagramático espacio-temporal para calcular efectos físicos en QED tenía implícitamente el contenido físico de una teoría en la que las partículas podían ser creadas y destruidas y por tanto el número de partículas en pasos intermedios del proceso físico era indeterminado. Feynman había sido forzado

por la física a reproducir el contenido físico de la teoría cuántica de campos. (De hecho, en un oscuro artículo de 1941 que se anticipó a Feynman en ocho años, el físico suizo Ernst Stückelberg se había visto impulsado a considerar diagramas espacio-temporales y a los positrones como electrones invertidos temporalmente, pero no tuvo el impulso suficiente para desarrollar el programa que finalmente llevó a cabo Feynman con estas herramientas.)

Ahora que estamos familiarizados con los diagramas que llegarían a ser conocidos como «diagramas de Feynman», podemos representar los sucesos que corresponden a los de otro modo términos infinitos asociados a la autoenergía del electrón y a la polarización del vacío:



*Autoenergía (un electrón interaccionando con su propio campo electromagnético)*



*Polarización del vacío (división de un fotón virtual en un par electrón-positrón)*

Para Feynman había, sin embargo, una diferencia fundamental entre estos dos diagramas. Podía imaginar el primero produciéndose naturalmente como un electrón que emitiera un fotón y luego lo reabsorbiera. Pero el segundo parecía antinatural porque no resultaría de la trayectoria de un solo electrón moviéndose e interaccionando hacia atrás y hacia delante en el espacio y el tiempo, y a él le parecía que dichas trayectorias eran las únicas apropiadas en sus cálculos. Por consiguiente, miraba con cautela la necesidad de incluir estos nuevos procesos, y al principio no lo hizo. Esta decisión le causó bastantes problemas al tratar de hallar un marco en el que pudieran obviarse todos los infinitos de la teoría de Dirac y en el que pudieran realizarse predicciones de procesos físicos de manera no ambigua.

El primer gran éxito de los métodos de Feynman fue el cálculo de la autoenergía del electrón. Fue muy importante que encontrara un modo de alterar las interacciones de electrones y fotones a escalas

muy pequeñas y energías muy altas de una manera consistente con los requisitos de la relatividad. Pictóricamente esto resulta de considerar el caso en el que el lazo en el diagrama de autoenergía se hace muy pequeño y después alterar las interacciones para los lazos más pequeños. De esta manera podía obtenerse un resultado finito. Además, podía demostrarse que este resultado era independiente de la forma de la alteración de las interacciones para pequeños lazos en el límite en que estos se hacen cada vez más pequeños. Era muy importante, como recalqué antes, que como los lazos tienen en cuenta un tiempo arbitrario de emisión y absorción y a la vez incluyen objetos que van adelante y atrás en el tiempo, la forma de esta alteración no estropeará el comportamiento relativista de la teoría, que no debería depender de la definición del tiempo por parte de ningún observador.

Como habían predicho Kramers y otros, la clave estaba en hacer finitas las contribuciones de los lazos alterados, o *regularizarlas*, como se dijo después, de manera consistente con la relatividad. Si entonces se expresaban las correcciones a cantidades físicas, tales como la energía de un electrón en el interior de un átomo de hidrógeno, en términos de la masa física y carga física del electrón, el resto, tras cancelar el término que sería infinito sin la alteración para lazos pequeños, era finito e independiente de la forma explícita de la alteración realizada. Más importante, el resto permanecía finito incluso si el tamaño de la escala en la que se alteran los diagramas de lazo se hace cero, donde el diagrama lazo se haría de otra manera infinito. La renormalización funcionaba. La corrección

finita concordaba razonablemente con el desplazamiento Lamb medido, y se confirmó la electrodinámica como una teoría cuántica. Sin embargo, desafortunadamente el mismo tipo de procedimientos que usaba Feynman para cambiar la teoría a pequeñas escalas de distancia al considerar la autoenergía del electrón no funcionaba cuando se consideraba el impacto infinito de los diagramas de polarización del vacío. Feynman no pudo encontrar ninguna alteración de los lazos electrón- positrón pequeños que mantuviera las buenas propiedades matemáticas de la teoría sin dicha alteración. Esta es probablemente otra razón, además de su sensación de que estos diagramas podrían no ser físicamente apropiados para el problema en cuestión, de por qué los ignoró en su cálculo original del desplazamiento Lamb.

Feynman peleó con este problema intermitentemente durante 1948 y 1949. Fue capaz de obtener resultados cuantitativamente precisos suponiendo intuitivamente que diversos términos extra en sus ecuaciones, inducidos al alterar la forma del lazo electrón-positrón, eran probablemente no físicos, ya que no respetaban las atractivas propiedades matemáticas de la QED, y por tanto podían ignorarse con seguridad. Esta situación insatisfactoria se resolvió cuando en 1949 Hans Bethe le contó a Feynman un truco descubierto por Wolfgang Pauli que permitía introducir una alteración matemáticamente consistente en los diagramas de polarización del vacío.

En cuanto Feynman incorporara este esquema a sus cálculos, se podrían domar todos los infinitos en la QED y se podría calcular

cualquier cantidad física con un orden arbitrariamente grande de precisión y comparar el resultado con los datos experimentales. Desde la perspectiva práctica de tener una teoría de electrones y fotones con la que podían hacerse predicciones finitas (y precisas) para todos los procesos, Feynman había conseguido el objetivo que le había motivado en primer lugar en su trabajo de posgrado con Wheeler.

Pero Feynman no pasaba fácilmente por alto sus dudas intuitivas, y en su famoso artículo de 1949, «A Space-Time Approach to QED» (Un enfoque espacio-temporal de la electrodinámica cuántica), en el que bosquejaba sus técnicas diagramáticas y resultados, añadió una nota al pie sugiriendo que se necesitaban experimentos sobre el desplazamiento Lamb más precisos, a fin de ver si la pequeña contribución debida a los efectos de polarización del vacío calculada por él y otros era real.

Lo era.



## Capítulo 10

### A través de un espejo en la oscuridad

*Mis máquinas venían de demasiado lejos.*

*RICHARD FEYNMAN a Sylvan Schweber, 1984*

La reacción indecisa de Feynman ante sus propios resultados puede parecer sorprendente, pero no lo es. Y tampoco es única. Las respuestas correctas en ciencia no resultan siempre evidentes en el momento en que se desarrollan. Cuando se trabaja con cautela, en el filo del conocimiento, dando vueltas muchas veces equivocadas, encontrando callejones sin salida y vías muertas, es fácil mostrarse escéptico cuando la naturaleza parece obedecer a las matemáticas *concebidas* en la mesa de trabajo. Por consiguiente, no acaba aquí esta *parte de* la historia de Feynman, al menos si nuestro objetivo es entender su verdadero legado científico. Necesitamos, en cambio, examinar algunos acontecimientos asociados, personalidades y vueltas del destino que realmente rigen la historia; la clase de cosas que se evita frecuentemente cuando se intenta presentar una exposición lógica de conceptos científicos *a posteriori*.

Dos personalidades dominaban el entorno inmediato en el cual se desarrollaron y percibieron los descubrimientos de Feynman: Julián Schwinger y Freeman Dyson. Ya hemos hablado de Julián Schwinger, el niño prodigio. Al igual que Feynman, se sintió atraído por la cuestión más fundamental de la física teórica en ese tiempo:

cómo convertir la QED en una teoría de la naturaleza sistemática. Como Feynman, Schwinger había contribuido al esfuerzo bélico, y su trabajo de entonces tendría una profunda influencia en su enfoque. Schwinger, que trabajaba en el Laboratorio de Radiación del MIT, empezó a seguir un método ingenieril basado en electrodinámica clásica, centrándose en fuentes y respuestas. Y, como Feynman, se sentía intensamente impulsado por una competición principalmente consigo mismo y por lo que pensaba que sería capaz de hacer.

Pero las semejanzas acababan aquí. Aunque también era i originario de Nueva York, Schwinger creció) en Manhattan, un mundo aparte de Long Island, y quizá ningún físico podría haber proyectado un aura como la suya. Brillante y elegante, fue reclutado en Columbia por Rabi a los diecisiete años después de que le ayudara a resolver un debate sobre un sutil punto de mecánica cuántica que este mantenía con un colega en el pasillo. Obtuvo su doctorado en Física por Harvard a los veintiún años, y ocho años después se convirtió en el catedrático más joven en la historia de Harvard. Proyectaba un aire de confianza y organización supremas. Aunque Schwinger siempre daba las clases sin usar notas, todo parecía planeado, desde el sitio en que la tiza empezaba a tocar el encerado al sitio donde finalmente lo dejaba, o más bien los sitios, ya que a veces escribía con las dos manos a la vez. El flujo de ideas podía ser complicado, muchos dirían que más de lo necesario, pero era totalmente preciso, lógico y elegante.

La brillantez de Feynman se manifestaba en cambio en una clase de impaciencia intelectual. Si estaba interesado en un problema se lanzaba hacia delante para llegar a la respuesta y luego retrocedía para comprender y completar los pasos. A veces mostraba poca paciencia con quienes no podían seguirlo, y pocos podían. Como dijo en respuesta a una oferta posterior de trabajo del Caltech (Instituto Tecnológico de California): «No me gusta sugerir un problema y sugerir un método para su solución y sentirme después responsable de que el estudiante sea incapaz de resolver el problema por el método propuesto en el momento en que su mujer va a dar a luz, razón por la cual él no puede conseguir un trabajo. Lo que pasa es que creo que yo no sugiero lo que no sé si funcionará, y la única forma que sé que funciona es habiéndolo probado antes en casa. De manera que encuentro el viejo dicho: “Una tesis doctoral es la investigación hecha por un profesor bajo circunstancias particularmente penosas” absolutamente verdadero». Tal vez por esta razón Feynman tuvo muy pocos estudiantes de éxito en física. Schwinger, en cambio, dirigió a más de 150 estudiantes de doctorado durante su carrera, tres de los cuales ganaron más tarde el Premio Nobel, dos en física y uno en biología. No es, por tanto, extraño que la comunidad física acudiera en masa a escuchar a Schwinger, sobre todo cuando estaba tratando de resolver el mayor enigma en la frontera de la física fundamental. Tras la reunión de Shelter Island, Schwinger también se lanzó a la tarea de obtener un cálculo en QED consistente con la relatividad de una de las cantidades que diferían de las predicciones de orden

inferior de la teoría de Dirac, la anomalía del momento magnético del electrón. Usando un conjunto de herramientas que desarrolló para abordar los problemas de QED y las ideas de renormalización que él, Víctor Weisskopf y H. A. Kramers habían estado promocionando, fue el primero en llegar a una respuesta, a finales de 1947.

Casi inmediatamente comenzó a difundirse en la comunidad física el logro de Schwinger. En la reunión de enero de 1948 de la Sociedad Americana de Física —el mayor encuentro anual de física—, Schwinger dio una conferencia titulada: «Desarrollos recientes en QED». El interés fue tan grande que se le pidió que repitiera la conferencia al final de ese día, a una audiencia incluso más numerosa, para satisfacer la demanda de escuchar sus resultados.

Entretanto, Feynman se levantó tras la charla e informó de que había calculado las mismas cantidades que Schwinger y de hecho pretendía alguna mayor generalidad en el cálculo del momento magnético anómalo. Pero le faltaba aún explicar sus métodos, de modo que su anuncio causó significativamente menos impacto.

Las ideas de Feynman generaron menos interés en la comunidad científica de entonces, y no porque no tuviera el mismo foro en la reunión, sino porque su enfoque en abordar los problemas que finalmente resolvió era único. Había dejado de lado durante mucho tiempo la red de seguridad de la teoría cuántica de campos convencional, y aunque sus diagramas le permitían obtener notables resultados, a otros puede que les parecieran bosquejos

garabateados en un esfuerzo por adivinar la respuesta a los problemas de la época.

Esta reticencia de la comunidad de físicos a entender su trabajo se mostró en particular en la primera oportunidad que Feynman tuvo de dar una charla sobre su idea, unos meses más tarde, en otra reunión más especializada subvencionada por la Academia Nacional de Ciencias, la llamada «reunión de Pocono». Dio su charla, titulada «Formulación alternativa de la electrodinámica cuántica», después de la de Schwinger, ¡que duró casi todo el día! A pesar de lo imperturbable que era Schwinger, no pudo evitar ponerse nervioso de vez en cuando, con Bohr, Dirac y otros peces gordos en el público interrumpiéndolo constantemente.

Hans Bethe advirtió que a Schwinger lo interrumpían menos cuando su presentación se hacía más formal, así que sugirió a Feynman que hiciera su exposición más formal, así como más matemática. Esto era como pedirle a Bono que interpretara a Bach en el clavecín. Feynman había planeado presentar el material de una manera casi análoga a como lo había trabajado, haciendo énfasis en los cálculos exitosos y los resultados que lo llevarían hacia atrás para motivar sus ideas. Sin embargo, como deferencia a la sugerencia de Bethe, Feynman puso el énfasis en las matemáticas asociadas con sus sumas espacio-temporales antes que en la física. El resultado fue, en palabras de Feynman, «una presentación desahuciada».

Dirac le interrumpió para preguntarle si su teoría era *unitaria* —una forma matemática de expresar el hecho, como he descrito *antes, de*

que la suma calculada de las probabilidades de todos los resultados físicos debe ser igual a la unidad (esto es, hay un 100 % de probabilidad de que suceda *algo*)—, pero Feynman no había pensado realmente en ello, y como las partículas se movían hacia delante y hacia atrás en el tiempo, respondió que sencillamente no lo sabía.

Después, cuando Feynman introdujo la idea de positrones actuando como electrones desplazándose hacia atrás en el tiempo, un participante preguntó si en alguno de los caminos espacio-temporales que incluía en sus cálculos podrían aparecer varios electrones en el mismo estado, en clara violación del principio de exclusión de Pauli. Feynman respondió afirmativamente porque en este caso los diversos electrones no eran realmente partículas diferentes, sino simplemente las mismas partículas yendo hacia delante y hacia atrás en el tiempo. Feynman recordaba más tarde que entonces sobrevino el caos.

Al final esto condujo a Bohr a cuestionar la misma base física del concepto espacio-temporal de Feynman. Argüía que la imagen de caminos espacio-temporales violaba los principios de la mecánica cuántica, que decían que las partículas no se desplazan en trayectorias individuales en absoluto. En ese momento Feynman dejó de tratar de convencer a su audiencia de que su esquema era correcto.

Bohr estaba equivocado, desde luego. La suma sobre caminos de Feynman explicitaba claramente que deben considerarse muchas trayectorias simultáneamente al calcular resultados físicos, y de

hecho el hijo de Bohr se dirigió después a Feynman y se disculpó, diciendo que su padre no lo había entendido. Pero el tipo de cuestionamiento reflejaba lo que era claramente un profundo escepticismo y una duda creciente de que Feynman hubiera desarrollado una imagen completamente consistente. Estaba requiriendo demasiado de su audiencia, que, aunque incluía a algunas de las mentes más brillantes de la física del siglo XX, no podía esperarse que se adaptara en una sola conferencia a esa totalmente nueva y aún incompleta forma de pensar acerca de procesos fundamentales. Al fin y al cabo, al mismo Feynman le había costado años y miles de páginas de cálculo desarrollarla.

Podría pensarse que Feynman tuviera envidia de Schwinger, en particular teniendo en cuenta las distintas reacciones a sus trabajos. Sin duda ambos eran competitivos. Pero como al menos lo recordaba Feynman, eran más como co-conspiradores. Ninguno de ellos podía entender completamente lo que hacía el otro, pero ambos conocían sus mutuas capacidades y las respetaban, y los dos tenían la impresión de que habían dejado atrás a los demás. La memoria de Feynman podría haber sido autocomplaciente, pues ciertamente en esa ocasión estuvo descontento de no ser comprendido. Desconsolado tras el congreso de Pocono, decidió que tendría que publicar sus ideas para poder explicar apropiadamente lo que estaba haciendo. Para Feynman, que detestaba escribir su trabajo para publicación, la motivación era clara.

Recuérdese que el método de Feynman para resolver problemas físicos podría reducirse a «el fin justifica los medios». Con esto

quiero decir que podría llamarse la atención con una idea o un método mal concebido, pero su validez reside en los resultados. Si los resultados del cálculo estuvieran de acuerdo con la naturaleza, a través de la experimentación, el método seguiría entonces probablemente el buen camino y merecería la pena explorarlo más.

Feynman tenía la impresión de que su método de suma sobre caminos era correcto. Por entonces había calculado casi todas las cantidades que se pueden calcular en QED y sus resultados estaban de acuerdo con otros métodos cuando estos estaban disponibles. Construía sus métodos sobre la marcha, a fin de abordar las cuestiones específicas inmediatas. Pero ¿cómo presentar esto impreso a una comunidad de físicos acostumbrados a trabajar no hacia atrás sino hacia delante para entender una teoría?

Para Feynman, obtener una comprensión de sus ideas suficientemente clara para exponerlas a los demás significaba hacer más cálculos para sí mismo. En el verano de 1948 refinó sus métodos de cálculo y los generalizó, desarrollando incluso unos más poderosos. Haciendo los métodos de cálculo más sucintos, y más generales, pensó que podía comunicar los resultados más fácilmente a la comunidad de físicos. Finalmente, en la primavera de 1949, el gran esfuerzo de Feynman hizo que este acabara sus dos trabajos históricos: «La teoría de positrones» y «Enfoque espacio-temporal de la electrodinámica cuántica», que esencialmente contienen la base de todas sus ideas y prósperos cálculos llevados a cabo en los dos años anteriores.



Otros dos factores clave contribuyeron a cimentar la resolución de Feynman y su legado. El primero tuvo que ver con un notable joven matemático convertido en físico a quien ya hemos conocido, Freeman Dyson, que llegó a EE.UU. en 1947 procedente de la Universidad de Cambridge como estudiante de posgrado para trabajar bajo la dirección de Bethe, y que en su momento explicaría la obra de Feynman al resto del mundo.

Conocido en el Reino Unido por sus logros matemáticos, a la edad de veintitrés años Freeman Dyson había decidido que las cuestiones intelectuales verdaderamente interesantes de entonces residían en la física teórica, particularmente en el esfuerzo de entender la teoría cuántica del electromagnetismo. Así que, mientras era miembro del Trinity College, Cambridge, preguntó a varios físicos adonde tendría que ir para ponerse al día en los desarrollos recientes más excitantes, y todo el mundo le indicó el grupo de Bethe en la Universidad de Cornell.

En un año, Dyson había acabado un artículo en el que calculaba las correcciones cuánticas al desplazamiento Lamb en una teoría relativista «de juguete» con partículas sin espín. Igual que Feynman, estaba muy influido por su profundo respeto y admiración por Bethe, y su impresión de él era notablemente similar a la de Feynman. Como escribió Dyson: «Su punto de vista era que comprender algo significaba ser capaz de calcular el número. Esto era para él lo esencial al hacer física».

En la primavera de 1948, Dyson se centró en profundidad en los problemas conceptuales de la QED, y junto con el resto del mundo

de la física, alertado por Robert Oppenheimer, leyó el primer volumen de la nueva revista japonesa *Progress in Theoretical Physics*. Se asombró al descubrir que, aunque estuvieron completamente aislados, los físicos teóricos japoneses habían hecho un notable progreso durante la guerra. En particular, Sin-Itiro Tomonaga había desarrollado, esencialmente de manera independiente, un método para resolver los problemas de QED usando técnicas similares a las de Schwinger. La diferencia era que el método de Tomonaga le parecía mucho más simple a Dyson, quien escribió: «Tomonaga explicaba el suyo en un lenguaje claro y simple que todo el mundo podía entender, y Schwinger no».

Durante todo este tiempo, Dyson interactuó con Feynman, aprendiendo en la pizarra exactamente lo que este había logrado. Esto le proporcionó la oportunidad casi única de aprender el método de Feynman en una época en la que este tenía aún que publicar su trabajo, o incluso dar una charla coherente sobre el tema.

Si había alguien a quien Dyson llegara a admirar tanto o más que a Bethe, ese era Feynman, cuya brillantez, combinada con energía, carisma y arrojo, le cautivaban. Dyson se dio cuenta pronto de que el enfoque espacio-temporal de Feynman no solo era poderoso, sino que, si fuera correcto, debería ser posible poner en claro una relación entre este enfoque y las técnicas desarrolladas por Schwinger y Tomonaga.

Al mismo tiempo, Dyson había impresionado tanto a su mentor, Bethe, que este le sugirió que pasara el segundo año de su beca para graduados de la Commonwealth en el Instituto de Estudios

Avanzados de Princeton, con Oppenheimer. Durante el verano, antes de desplazarse a New Jersey, Dyson acompañó a Feynman en ese profético viaje en coche cruzando el país hasta Los Alamos, después asistió a una escuela de verano en Michigan e hizo otro largo viaje, esta vez en autobús, hasta Berkeley (California) y regresó. Durante el viaje de regreso de California, tras cuarenta y ocho horas de lo que para mucha gente habría sido un viaje en autobús mentalmente agotador, Dyson concentró sus pensamientos intensamente en la física, y fue capaz de completar en su mente las características básicas de una prueba de que los enfoques con relación a la QED de Feynman y Schwinger eran de hecho equivalentes. Fue asimismo capaz de fundirlos, como describió en una carta, en una «nueva forma de la teoría de Schwinger que combina las ventajas de los dos».

En octubre de 1948, antes de que Feynman hubiera acabado su épico artículo sobre QED, Dyson sometió a publicación su famoso artículo «Las teorías de la radiación de Tomonaga, Schwinger y Feynman» probando su equivalencia. El impacto psicológico de este trabajo fue profundo. Los físicos confiaban en Schwinger, pero sus métodos eran tan complejos que resultaban intimidatorios. Al demostrar que el enfoque de Feynman era igualmente consistente y de I confianza y proporcionaba un método sistemático mucho I más fácil para calcular las correcciones cuánticas de orden  $j$  superior, Dyson puso ante el resto de la comunidad de físicos una nueva herramienta efectiva que todos podían empezar a usar.

Dyson continuó ese artículo con otro artículo fundamental a principios de 1949. Tras haber desarrollado los métodos que permitían la adaptación del formalismo de Schwinger a los métodos de Feynman a fin de poder realizar el cálculo de contribuciones de orden superior arbitrariamente complicadas a la teoría, Dyson se puso a la tarea de probar que todo eso tenía sentido, de una manera rigurosa, o al menos suficientemente rigurosa para los físicos. Demostró que, una vez que se resolvían los problemas con los infinitos en los cálculos más simples de la autoenergía y la polarización del vacío, ya no existían otros infinitos que aparecieran en los cálculos de orden superior. Esto completaba una prueba de lo que hoy se conoce como «renormalizabilidad» de la teoría, en la que todos los infinitos, una vez controlados al principio mediante trucos matemáticos del tipo que permite tan fácilmente el método de Feynman, pueden incorporarse a los términos correspondientes a los inmensurables términos de «carga» y «masa desnudas» en la teoría. Cuando todo se expresa en términos de masas y cargas físicamente medibles, todas las predicciones se vuelven finitas y razonables.

Después de los dos artículos de Dyson, la QED se dominaba ya totalmente. Podía ahora elevarse al rango de «teoría» en el mejor sentido científico de ser un formalismo lógicamente consistente que hacía predicciones únicas que podían ser comparadas con los resultados experimentales, y lo habían sido con éxito.

Curiosamente, el artículo original de Dyson probando las equivalencias de los métodos de Schwinger y Feynman contenía un

único diagrama espacio-temporal fundamental. Pero como los artículos fundamentales de Feynman sobre sus propios resultados no habían aparecido todavía, el primer «diagrama de Feynman » impreso fue realmente de Dyson.

Resulta difícil sobrestimar la importancia e impacto del trabajo de Dyson. Se convirtió inmediatamente en casi una celebridad entre la comunidad de físicos; pero lo más importante es que su trabajo llevó a otros, que no podían entender el enfoque diagramático de Feynman o tenían dudas acerca de él, a aprender el formalismo y a empezar a aplicarlo. Aunque la exposición de Feynman de su propio trabajo llegaría en dos artículos fundamentales de 1949 y 1950, fueron los artículos de Dyson más que cualquier otra cosa los que proporcionaron la ventana a través de la cual las ideas de Feynman fueron capaces de cambiar el modo en que los físicos pensaban sobre física fundamental.

Dyson trabajó duramente, quizá más duramente que Feynman, para convencer al resto del mundo de la utilidad de las ideas de este. Realmente, mucho del uso posterior por parte de los físicos de diagramas de Feynman en la década siguiente al trabajo de este puede atribuirse a la influencia de Dyson, quien, a través de su contacto personal con Feynman, se había convertido en su discípulo número uno.

Los artículos de Dyson al final reflejaban su punto de vista de que aunque los métodos de Feynman, Schwinger y Tomonaga eran equivalentes, el de Feynman era el más esclarecedor y útil para quienes desearan usar la QED para resolver problemas físicos.

Cuando la marea de interés empezaba a alejarse de Schwinger, él era consciente de ello, y más tarde puntualizó: «Había puntos de vista de todo tipo, que se proclamaban de una forma algo similar a la de los apóstoles que utilizaban la lógica griega para llevar el Dios judío a los gentiles».

Más tarde Schwinger hizo un comentario irónico, que era quizás incluso más característico de su idea de que solo obtendrían el esclarecimiento los que estuvieran dispuestos a hacer un duro esfuerzo: «Como el chip de silicio de años más recientes, el diagrama de Feynman traía la computación a las masas».

El historiador David Kaiser ha estudiado la «dispersión» del método diagramático de Feynman en la comunidad de física en los años inmediatamente anteriores y posteriores a la publicación de su trabajo. Kaiser ha mostrado que el crecimiento fue exponencial con un tiempo de duplicación de alrededor de dos años, y en 1955 había unos 150 artículos que contenían diagramas de Feynman. Lo que empezó como una curiosidad entendida por Feynman y unos cuantos colegas en Cornell, y después en segundo lugar por Dyson y otros en el Instituto de Estudios Avanzados, llegó a convertirse en una técnica que desde entonces ha aparecido en todos los volúmenes de *The Physical Review*, la revista estándar de referencia en el campo. Lo que empezó como un esfuerzo para tratar la QED se usa hoy día en casi todos los campos de la física.

De hecho, Feynman y Dyson entendían de manera muy diferente sus diagramas. Feynman, influenciado por sus propias imágenes espacio-temporales, su formalismo de suma sobre caminos y su

insistencia en pensar en partículas en movimiento antes que en campos cuánticos, consideraba los diagramas como imágenes de procesos físicos reales, en los que los electrones rebotarían de un lugar a otro y de un instante a otro (hacia delante y hacia atrás). Escribía fórmulas basadas en estas imágenes y podía después comprobar si daban las respuestas correctas. Era realmente un enfoque de «autofuncionamiento», sin mucha otra base fundamental que su notable intuición.

El trabajo de Dyson cambió todo eso. Mostró cómo los diagramas podían surgir de conjuntos fundamentales de ecuaciones basadas en la teoría cuántica de campos. Para Dyson, cada parte de cada diagrama representaba un término bien definido en una serie de ecuaciones. Los diagramas eran un punto de apoyo para ayudar a aclarar las ecuaciones, y las «reglas de Feynman» asociadas para traducir los diagramas a ecuaciones no eran *ad hoc*, como las había inventado Feynman, sino más bien podían justificarse mediante manipulaciones bien definidas asociadas a la mecánica cuántica y la teoría especial de la relatividad. Quizá por esta razón la adopción de los diagramas de Feynman tuvo lugar más rápidamente que la de su enfoque de la física basado en la integral de camino espacio-temporal, al que, como veremos, le costaría varias décadas cambiar completamente el paisaje de la física.

*Dyson* había apreciado inmediatamente cómo los métodos de Feynman podían ayudar a los comunes mortales a realizar sistemáticamente complejos cálculos en teoría cuántica de campos. Como después expresó en una autobiografía: «El cálculo que hice

para Hans Bethe usando la teoría ortodoxa me costó varios meses de trabajo y centenares de hojas de papel. Dick Feynman podía obtener la misma respuesta haciendo cálculos en una pizarra en media hora».

La propia iluminación de Feynman, cuando supo que había descubierto algo verdaderamente importante, ocurrió durante el encuentro de enero de 1949 de la Sociedad Americana de Física en Nueva York, el mismo encuentro en que Dyson fue felicitado por su trabajo por, entre otros, Robert Oppenheimer durante su discurso presidencial. En ese tiempo, cuando todos los físicos estadounidenses investigadores en activo cabían esencialmente en un gran hotel, el evento de enero se había convertido quizás en la reunión de física más importante del mundo. En 1949, el ambiente era de celebración, pues los físicos habían empezado a ver por fin, a través de la niebla de los infinitos, la electrodinámica cuántica como una teoría cuántica factible. Además, con el desarrollo del primer acelerador de partículas significativo, el ciclotrón de Berkeley de 184 pulgadas, se creó una plétora de nuevas partículas elementales que interaccionaban bajo la extraña fuerza fuerte<sup>7</sup> «en condiciones controladas y en grandes números», como lo describió entonces Feynman en un artículo de revisión que escribió en 1948 para la nueva revista *Physics Today*. La excitación acerca de ese extraño nuevo mundo de fenómenos y la esperanza de que los nuevos métodos desarrollados para tratar la QED podían esclarecerlo eran

---

<sup>7</sup> En inglés, *strong force*. En español es inevitable la redundancia. Una expresión equivalente quizá más precisa es «interacción fuerte». (N. del t.)



palpables. El catalizador del entusiasmo de Feynman no provenía de las discusiones sobre la misma QED, sino más bien de un debate sobre las interacciones de las nuevas partículas creadas llamadas «mesones».

Un joven físico, Murray Slotnick, había usado los métodos pre-Feynman de calcular en teoría cuántica de campos para determinar, en un esfuerzo hercúleo, los efectos que podían producir esas nuevas partículas si fueran intercambiadas como partículas virtuales entre los neutrones en los núcleos y los electrones orbitando a su alrededor. Había descubierto que solo un tipo posible de interacción daba lugar a resultados finitos, los cuales entonces calculó. Slotnick presentó su trabajo en una sesión del encuentro.

Después de la presentación, Oppenheimer se levantó y, a su manera, rechazó rápida y precipitadamente los resultados de Slotnick. Oppenheimer manifestó que un investigador posdoctoral del instituto (de Princeton) había probado un teorema general que decía que todas las posibles interacciones diferentes de los mesones acabarían teniendo los mismos efectos en las interacciones neutrón-electrón, un resultado en manifiesto desacuerdo con la afirmación de Slotnick.

Feynman llegó después de esta sesión, pero le informaron sobre la nueva controversia y pidió comentar acerca de su percepción de quién estaba en lo cierto. Hasta entonces Feynman no había llevado a cabo ningún cálculo teórico con mesones, pero esa tarde, después de que alguien le explicara de qué iban las teorías, trasladó sus métodos de QED a este nuevo contexto y pasó varias horas

calculando las distintas teorías posibles de mesones. Por la mañana comparó sus resultados con los de Slotnick, quien realmente había hecho su cálculo solo en un límite especial de la teoría. Feynman había realizado un cálculo completamente general, pero, cuando tomó el mismo límite, sus resultados estaban de acuerdo con los de Slotnick.

Slotnick, que sin duda se tranquilizó con el resultado de Feynman, estaba también asombrado. Había pasado casi dos años formulando y acabando un cálculo que Feynman había hecho en una tarde. Para Feynman esta verificación fue embriagadora. Fue entonces, y solo entonces, cuando se dio cuenta del verdadero poder de sus nuevas técnicas. Como dijo después: «Entonces realmente me di cuenta de que tenía algo. No supe realmente que tenía algo tan maravilloso hasta que esto sucedió. Ese fue el momento en que me di cuenta de que tenía que publicar, que había ido por delante del mundo |...| El momento en que obtuve mi Premio Nobel fue cuando Slotnick me dijo que había estado trabajando dos años. Cuando obtuve el premio de verdad no significó nada, porque ya sabía que yo era un éxito. Ese fue un momento emocionante».

Por añadidura, cuando el colega posdoctoral de Oppenheimer presentó su trabajo al día siguiente, Feynman no pudo resistirse a aguijonear a Oppenheimer. Tras la presentación del investigador posdoctoral en cuestión, llamado Case, Feynman se levantó y afirmó con brusquedad que tenía que estar mal porque, como podía ahora afirmar acerca del trabajo de Slotnick: «Un simple cálculo muestra que es correcto».

Este incidente no solo encendió el fuego necesario para convencer a Feynman de que tenía que publicar sus resultados, sino que también lo obligó a desarrollar las herramientas con las que le sería posible presentar su trabajo de una manera que el resto de la comunidad pudiera entenderlo. En primer lugar, Feynman se sentía obligado a entender lo que Case había hecho mal. Pero, para hacerlo, tenía que entender exactamente lo que este había hecho, lo cual le resultaba difícil porque Case había usado las técnicas tradicionales de teoría cuántica de campos que Feynman había ignorado hasta entonces. Al aprender estas técnicas, gracias a un estudiante de posgrado de Cornell, Feynman fue capaz no solo de descubrir el error de Case, sino también de cosechar un dividendo adicional del gasto de tiempo: pudo finalmente entender los procesos del vacío de una manera que antes se le había escapado. Su nueva interpretación desempeñó un papel vital en la presentación en el primero de sus épicos artículos sobre QED, «La teoría de positrones».

Luego, con su recién descubierta familiaridad con las teorías de mesones que estaban de moda entonces, Feynman fue capaz de formular sus reglas diagramáticas para estas teorías y reproducir rápidamente cualquier resultado que otros físicos habían obtenido a lo largo de los años. Estos resultados fueron resumidos en su siguiente artículo clásico, «Enfoque espacio-temporal de la electrodinámica cuántica», elevando indudablemente el interés de este entre la hueste de físicos que estaban batallando para dar sentido a esas nuevas partículas que interaccionaban fuertemente.

Como había sido impelido en el congreso de Pocono, donde había hecho una presentación muy chapucera, decidió publicar primero sus métodos diagramáticos de cálculo de manera coherente y los detalles matemáticos formales después. Reconociendo que este enfoque espacio-temporal «venía de demasiado lejos», en la introducción de su artículo se lee: «El método lagrangiano se modificó de acuerdo con los requisitos de la ecuación de Dirac y el fenómeno de la creación de pares. Esto lo facilitó la reinterpretación de la teoría de los agujeros. Finalmente, para cálculos prácticos las expresiones se desarrollaron en serie de potencias. Era evidente que cada término de la serie tenía una interpretación física simple. Puesto que el resultado era más fácil de entender que la deducción, se pensó que era mejor publicar primero los resultados en este artículo».

Aunque minimizando las motivaciones teóricas y matemáticas en su exposición inicial, la cual, se dio cuenta, no podía «llevar la convicción de certeza que acompañaría a la deducción», Feynman no obstante hizo evidente para el lector la ventaja significativa de sus métodos. Al comparar su enfoque espacio-temporal para tratar la teoría relativista de Dirac —contrariamente a la teoría no relativista de Schrödinger— con el método hamiltoniano, más tradicional, escribió: «Además, la invariancia relativista será evidente por sí misma. La forma hamiltoniana de las ecuaciones desarrolla el futuro a partir del presente instantáneo. Pero para diferentes observadores en movimiento relativo el presente instantáneo es diferente y corresponde a un diferente corte

tridimensional del espacio-tiempo. Abandonando el método hamiltoniano, la unión de la relatividad y la mecánica cuántica puede efectuarse de manera más natural».

Durante el año siguiente, Feynman acabó los dos artículos restantes necesarios para presentar una deducción más completa y formal de sus resultados —usando un nuevo tipo de cálculo que había desarrollado— y para demostrar formalmente la equivalencia de sus técnicas y las de la teoría cuántica de campos convencional. Con la publicación de los cuatro artículos de Feynman, la QED estaba esencialmente completada. Lo que había empezado como un deseo, cuando era estudiante de posgrado, de reformular la QED como una teoría sin infinitos, había llegado a convertirse en una precisa y pasmosamente eficaz metodología de tratamiento de infinitos para obtener resultados que podían compararse con los experimentos.

Feynman no perdió el contraste entre esperanza y realidad. Mediante sus cuatro artículos, aun reconociendo el logro que representaban, transmitió una sensación palpable de insatisfacción. En «Enfoque espacio-temporal...», al comparar sus técnicas de cálculo con las de Schwinger, por ejemplo, escribió: «Aunque en el límite los dos métodos están de acuerdo, ninguno de ellos parece completamente satisfactorio desde el punto de vista teórico. No obstante, parece que contamos ahora con un método completo y definido para el cálculo de procesos físicos a cualquier orden en electrodinámica cuántica».

Durante muchos años, hasta 1965, en que le otorgaron el Premio Nobel por su trabajo, Feynman tuvo la impresión de que sus

métodos eran meramente útiles, no profundos. No había descubierto nuevas propiedades fundamentales de la naturaleza que librarán la teoría de infinitos, sino que había encontrado un método para ignorarlos con toda seguridad. Tenía la sensación de que la esperanza auténtica —que las integrales de camino producirían las revelaciones en nuestro conocimiento básico de la naturaleza que él había esperado que curaran los males de la física cuántica relativista— no se había materializado. Como declaró a un periódico estudiantil el día en que anunciaron el Premio Nobel: «Fue con el propósito de hacer más accesibles estos métodos simplificados por lo que publiqué mi artículo en 1949, pues aún no creía haber resuelto ningún problema real. Todavía esperaba que algún día llegaría al otro extremo de mi idea original y obtener resultados finitos, arrojar fuera esa radiación propia y arreglar los lazos de vacío y todas esas cosas [...], lo que nunca hice». Y como lo describió después en su discurso al recibir el Nobel: «Esto completa la historia del desarrollo de la visión espacio-temporal de la electrodinámica cuántica. Me pregunto si se puede aprender algo de ello. Lo dudo».

La historia probaría al final lo contrario.

## Parte II

### El resto del universo

*Hoy no podemos ver si la ecuación de Schrödinger contiene (o no) ranas, compositores musicales o moralidad. No podemos decir si se necesita (o no) algo como Dios más allá de ella. Y así todos podemos mantener opiniones firmes en ambos sentidos.*

RICHARD FEYNMAN

## Capítulo 11

### La materia del corazón y el corazón de la materia<sup>8</sup>

*Lo que trato de hacer es dar a luz la claridad, que es realmente una especie de semivisión pictórica meditada a medias.*

RICHARD FEYNMAN

Richard Feynman no envainó su espada en 1949. Había logrado algo maravilloso, aunque él no se diera cuenta de todo su alcance. Mientras tanto, la naturaleza seguía haciendo señas. Y, para Feynman, interesarse en la física significaba ser intensamente

---

<sup>8</sup> «La materia del corazón» en el sentido de «los asuntos del corazón»; se ha mantenido la traducción más literal que muestra el juego de palabras en inglés, y en cierto modo también en español. (N. del t.)

curioso acerca de *todos* los aspectos del mundo físico, no solo de una sola frontera apasionante. La finalización de su obra magna en QED coincidió también con una transición más personal y más difícil para él, de su querida Cornell a la excitación y fascinación de climas más exóticos.

Con lo nada convencional que era Feynman en su comportamiento y en su manera de tratar las normas sociales, esos años de la posguerra permaneció extrañamente provinciano. Ya he mencionado su temprano desinterés por la música clásica y las artes. Y aunque podía haber parecido mundano, en gran parte por su experiencia en la guerra y su trato con colegas de otros países, a los treinta y un años nunca se había aventurado más allá del extremo continental de EE.UU. Eso cambiaría pronto.

La mente de Feynman siempre estaba buscando nuevos problemas y nuevos desafíos intelectuales. También manifestaba esa actitud en su vida personal. Una vez me dijo: «Hay que buscar aventuras donde se pueda».

Yo sospecho que tras el intenso esfuerzo entre 1946 y 1950 peleándose con la QED, la mente de Feynman deseaba ahora desplazarse hasta muy lejos, no solo en temas, sino en estilo. Emocionalmente inquieto y desdichado, y anhelando la aventura, deseaba escapar de la oscura Ithaca invernal, y quizá de los muchos embrollos sexuales en que se hallaba envuelto. La soleada California le hacía señas, pero América del Sur parecía aún más tentadora.

Como en muchas decisiones de la vida, en esta se mezcló algo de serendipia. Un antiguo colega de Los Alamos, Robert Bacher, iba a



desplazarse a Pasadena (California) para relanzar un inactivo programa de física en Caltech, e inmediatamente pensó en Feynman. Lo llamó en el momento adecuado. El hombre que había rechazado Princeton, la Universidad de Chicago, Berkeley y otras muchas instituciones accedió a visitar Pasadena. Al mismo tiempo, la imaginación de Feynman tomaba una deriva incluso más lejana. Por alguna razón, había decidido visitar Sudamérica y había empezado a aprender español cuando un físico visitante brasileño lo invitó a Brasil para el verano de 1949. Feynman aceptó rápidamente, obtuvo un pasaporte y cambió de español a portugués.

Dio clases de física en el Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (Centro Brasileño de Investigaciones Físicas), en Río de Janeiro, y volvió a Ithaca en el otoño, más conocedor del portugués y de las maneras de los brasileños gracias a una belleza de Copacabana, o *garota*, llamada Clotilde, a quien había persuadido para que lo acompañara de regreso a Estados Unidos durante una temporada corta. El invierno en Ithaca le había convencido de que tenía que irse, y Caltech, además de contar con un mejor clima, tenía la atracción de no ser una universidad de artes liberales como Cornell, donde, según dijo: «La amplitud teórica proveniente de tener muchas disciplinas de humanidades en el campus queda compensada por la memez general de quienes estudian estas cosas». Aceptó la oferta de Caltech y negoció un contrato que le proporcionó el mejor de todos los mundos posibles. Podía tomar un año sabático inmediato y volver a su amado Brasil, donde podría mantener el

contacto con la física a la vez que bañarse en la playa de Copacabana y retozar por la noche, todo ello por cortesía de Caltech y con ayuda del Departamento de Estado norteamericano.

El interés principal de Feynman durante aquella época residía en los recientemente descubiertos mesones y la confusión que introdujeron en la física nuclear. Mantuvo el contacto con sus colegas de Estados Unidos mediante un aparato de radioaficionado y el correo, formulando preguntas o dando consejos. Fermi se lo reprochó sin acritud: «Ya me gustaría a mí también refrescarme las ideas bañándome en Copacabana».

Pero Feynman también se tomó en serio su propia misión de ayudar a rejuvenecer la física brasileña. Impartió cursos en el Centro Brasileño de Investigaciones Físicas y criticó severamente a las autoridades de ese país por enseñar a los estudiantes a memorizar nombres y fórmulas y no a pensar acerca de lo que estaban haciendo. Se quejaba de que aprendían cómo expresar palabras en términos de otras palabras, pero realmente no entendían nada y no sentían ninguna motivación por los fenómenos reales que supuestamente estudiaban. Para Feynman, entender significaba ser capaz de aplicar el propio conocimiento a nuevas situaciones.

A pesar de lo brillante que era Feynman, el aislamiento en Brasil le impidió mantenerse en la que entonces era la vanguardia de su campo. Consiguió reproducir por separado resultados ya obtenidos, pero no impulsó el campo emergente de la física de partículas. En cambio, vivió un despertar cultural y un festín sexual.

Primero, la música. Feynman aseguraba que era musicalmente sordo, pero todos los que lo conocían bien sabían que tamborileaba continuamente con los dedos cuando trabajaba, en papel, en paredes, en cualquier cosa que tuviera a mano. En Río, Feynman encontró la música perfecta para su psique: la samba, un caliente, rítmico y poco pretencioso híbrido de tradiciones latinas y africanas. Se apuntó a una escuela de samba y empezó a tocar el tambor en bandas samberas. Incluso le pagaron por sus esfuerzos. El punto culminante era durante el carnaval anual, un licencioso festival callejero donde podía irse de jarana sin preocupaciones. Y se fue de jarana. (Por pura coincidencia estoy escribiendo esto mientras observo la playa de Copacabana desde un hotel.)

Es fácil de entender la fascinación que a Feynman le producía Río. La ciudad es asombrosamente bella, rodeada de espléndidas montañas y un paisaje oceánico, y vibrante con los cariocas, paisanos ocupados en reunirse, discutir, jugar al fútbol y flirtear en la playa. El espectro completo de la actividad humana se halla casi siempre a la vista. La ciudad está desgastada, es sexy, intensa, asustadiza, amistosa y relajada, todo a la vez. Allí Feynman podía escapar de la reclusión de una ciudad universitaria, donde nunca se puede estar lejos de colegas o estudiantes. Además, los brasileños son gente amable, amistosa y receptiva. Feynman pudo integrarse. Su propio intenso entusiasmo, nunca lejos de exteriorizarse, debió de resonar con todos los de su entorno, físicos, cariocas locales y, naturalmente, mujeres.

Feynman vivía en el Hotel Miramar Palace en la playa de Copacabana, donde se sumergía en orgías de alcohol (hasta que se asustó lo suficiente para abandonar el alcohol por su bien) y sexo. Escogía mujeres en la playa, en clubs y en el bar del patio del hotel, cuya proximidad a la actividad de Copacabana era, y aún es, adictiva. Durante un corto tiempo se especializó en azafatas que se alojaban en el hotel, y como lo ha descrito célebremente muchas veces, le agradaba ser más listo que las mujeres que conocía en los bares. Convenció a una de ellas no solo de acostarse con él, sino también de que le devolviera el dinero de la comida a la que la había invitado en el bar.

Sin embargo, como sucede con frecuencia, este sexo anónimo, aunque divertido, solo reforzaba su apartada soledad, y esa fue quizá la razón de que cometiera un error extremadamente ridículo y ajeno a su personalidad. Se declaró, por carta, a una mujer con la que había salido en Ithaca, una mujer tan diferente de las demás y tan diferente de Feynman que tal vez este se convenció de que ella era el complemento perfecto.

Muchas de sus novias anteriores se dieron cuenta de que el placer que creían compartir con Feynman no era del todo recíproco. Feynman podía concentrarse completamente en la mujer con la que estaba, de un modo que resultaba extremadamente cautivador. Pero, al mismo tiempo, por intensa que su participación física pudiera haber parecido, realmente él estaba solo con sus pensamientos. Mary Louise Bell, no sabedora de este defecto, lo persiguió sin disimulo desde Ithaca a Pasadena. Rubia platino con

inclinación a los tacones altos y vestidos ajustados, de alguna manera pensó que podía modelar a Feynman dándole una estructura a su gusto, un Feynman con un aspecto externo más pulido y un mayor aprecio de las artes y que no anduviera rodeado de tantos científicos.

Se casaron en 1952. En retrospectiva, algunos han dicho que el divorcio era inevitable, pero no hay auténticas reglas con las que puedan hacerse predicciones precisas en los asuntos del corazón. No obstante, uno de los puntos llevados a las actas del proceso de divorcio es revelador. Ella informaba: «Empezaba realizando cálculos mentales desde que se despertaba, hacía cálculos mientras conducía, mientras estaba sentado en la sala de estar y mientras estaba tumbado en la cama por la noche».

Durante los primeros años juntos, al instalarse en Pasadena tras su año salvaje en Brasil, y mientras su bonanza doméstica se convertía poco a poco en otro infierno privado, Feynman pensó que había cometido un error no solo en la elección de compañera, sino también en la elección de lugar. Incluso le escribió a Hans Bethe para discutir su retorno a Cornell. Pero el atractivo de Caltech era mayor que el de Mary Louise, y cuatro años después de su matrimonio, en 1956, ambos separaron sus caminos pero él permaneció) en Pasadena.

Su nueva universidad estaba creciendo muy rápidamente hasta llegar a convertirse en un rival de su propia *alma mater* del este, el MIT. Caltech era una institución que, con su creciente prominencia experimental y teórica en campos que iban desde la astrofísica a la

biología y la genética, combinada con las inclinaciones prácticas de una escuela de ingeniería, parecía totalmente conveniente. Lo era. Permanecería allí el resto de su vida.

La física estaba experimentando un periodo de agitación al mismo tiempo que los cataclismos personales de Feynman. Las partículas elementales recientemente descubiertas, mesones y similares, estaban proliferando en los nuevos aceleradores excesivamente. El zoo de las partículas elementales estaba siendo poblado de manera preocupante. Tan poblado, de hecho, que no estaba claro cuáles de los nuevos chasquidos en registradores y de las nuevas trazas en cámaras de burbujas podían representar nuevas partículas elementales y cuáles eran simplemente reordenaciones de las ya existentes.

Aunque Feynman se había interesado pronto en la teoría de mesones cuando estaba perfeccionando su comprensión de la QED, era también lo bastante listo y realista como para saber que sus métodos diagramáticos eran inapropiados para esa tarea. No solo muchos experimentos no eran concluyentes, sino que las interacciones entre las partículas eran generalmente tan fuertes que los esfuerzos sistemáticos de usar diagramas de Feynman para calcular pequeñas correcciones cuánticas a los procesos parecían fuera de lugar. Le escribió a Enrico Fermi desde Brasil: «¡No creas ningún cálculo en teoría de mesones que use un diagrama de Feynman!». En otro lugar se refirió a la física de mesones, diciendo: «Quizá no haya suficientes pistas para que incluso una mente humana imagine cuál es el patrón».

Sospecho que, desde su punto de vista, el mundo experimental de los mesones no estaba aún listo para su interpretación, y deseaba tomar otra dirección intelectual, la cual no estuviera tan regida por intentar desenmarañar las complejidades matemáticas del mundo cuántico como por intentar descifrar directamente sus consecuencias físicas. Deseaba pensar en algo que pudiera sentir y con lo que pudiera jugar, y no en algo que solo pudiera ver en su mente. Por consiguiente, poco después de llegar a Caltech, Feynman dirigió su atención a un problema completamente diferente en un área de la física completamente distinta. Empezó a explorar no el mundo *cuántico* de lo muy pequeño, sino de lo muy frío.

El físico holandés Kamerlingh Onnes, que trabajó a finales del siglo XIX y durante las primeras décadas del siglo XX, dedicó toda su vida profesional a la física de lo muy frío, enfriando sistemas cada vez más cerca del cero absoluto, la temperatura en la que, al menos clásicamente, se detienen todos los movimientos internos de los átomos. Mientras trabajaba en esto, hizo un maravilloso descubrimiento en 1911. A una temperatura de 4 grados sobre el cero absoluto (Onnes llegó después a menos de 1 grado sobre el cero absoluto, que era la temperatura más baja jamás alcanzada en la Tierra hasta entonces), fue testigo de una espectacular transición en el mercurio, en el cual de repente las corrientes eléctricas circulaban sin ninguna resistencia en absoluto.

Se había especulado que la resistencia eléctrica disminuía a muy bajas temperaturas, basándose en la simple observación de que dicha disminución se había producido ya a temperaturas más altas.

El mismo Onnes había especulado que la resistencia caería a cero a cero absoluto, una temperatura que no puede ser obtenida directamente en el laboratorio. Sin embargo, su asombroso resultado era que la resistencia caía de manera brusca exactamente a cero a una temperatura pequeña, pero no a cero. En tal estado, una corriente eléctrica después de empezar no dejaría ya de circular. Onnes había descubierto un fenómeno al que llamó «superconductividad».

Es interesante que cuando Onnes ganó el Premio Nobel, dos años después, no lo obtuvo explícitamente por este descubrimiento, sino, en general, por sus «investigaciones sobre las propiedades de la materia a bajas temperaturas que condujeron *inter alia* a la producción de helio líquido». El premio mostró una inusual presciencia (realmente pura suerte) por parte del comité Nobel porque resultó, por razones que nadie podría haber sospechado en 1913, que el mismo helio líquido tenía propiedades tan fascinantes como las relacionadas con la conductividad del mercurio y otros metales a bajas temperaturas. En 1938 se descubrió que el helio líquido, cuando se enfría lo suficiente, exhibe un fenómeno conocido como «superfluidez», que superficialmente parece incluso más extraño que la superconductividad. De nuevo, igual mente curioso, Onnes probablemente enfrió helio hasta temperaturas en las que este era superfluido, pero en cualquier caso pasó por alto este fenómeno sorprendente.

En su fase superfluida, el helio fluye sin ninguna fricción en absoluto. Métaselo en un contenedor y fluirá espontáneamente



como una película delgada por encima de los bordes. Fluirá a través de una grieta sin que importe lo pequeña que esta sea. A diferencia de la superconductividad, en la que la magia se esconde tras la resistencia y las medidas de la corriente, la superfluidez se muestra completamente ante nuestros ojos.

En una fecha tan tardía como son los primeros años de la década de 1950, ninguno de estos notables fenómenos se había explicado en términos de una teoría microscópica. En palabras de Feynman, eran como «dos ciudades sitiadas rodeadas completamente de conocimiento aunque ellas mismas permanecían aisladas e inexpugnables». Al mismo tiempo, Feynman se sentía hechizado por todos los fascinantes nuevos fenómenos que revelaba la naturaleza a bajas temperaturas, y dijo: «Me imagino que los físicos experimentales deben de mirar a menudo con envidia a hombres como Kamerlingh Onnes, que descubrió un campo como las bajas temperaturas, que parece no tener fondo y en el que se puede descender cada vez más». Feynman estaba fascinado por todos estos fenómenos, pero dirigió su atención principalmente a los misterios del helio líquido, aunque continuó batallando, al final sin éxito, para desentrañar el origen de la superconductividad.

Si bien por entonces el campo de lo que luego se llamaría «física de la materia condensada» era pequeño, aun así resulta difícil sobrestimar el espectacular salto que había decidido dar Feynman. Aunque los problemas de la superconductividad y la superfluidez no se habían aún resuelto, entre quienes trabajaban en ese campo se contaban algunos de los cerebros más brillantes de la física, que

habían estado pensando en dichos problemas desde hacía algún tiempo.

Feynman, sin embargo, tenía claro que se necesitaba un nuevo enfoque, y entre todos sus esfuerzos en la investigación ninguno mostró de qué manera su notable intuición física, combinada con su destreza matemática, podía rodear, antes que romper, las barreras preexistentes del conocimiento. La descripción física que finalmente obtuvo consiguió todos sus objetivos para entender la superfluidez, y *a posteriori* parece sorprendentemente simple, tan simple que uno se pregunta por qué a nadie se le había ocurrido antes. Pero esto era una característica del trabajo de Feynman. De antemano todo estaba inmerso en la niebla, pero una vez él había mostrado el camino todo era tan claro que parecía casi evidente.

Aparte de su fascinación general con todos los fenómenos interesantes en física, uno podría preguntarse qué tenía el helio en particular, y las aplicaciones de la mecánica cuántica a las propiedades de los materiales en general, para que desviara su interés a esta área. Sospecho que, una vez más, la motivación podría haber procedido de sus tempranos esfuerzos por entender las propiedades de las nuevas partículas elementales con interacción fuerte, los mesones. Mientras que se daba cuenta de que los diagramas de Feynman probablemente no ayudarían a despejar la confusa situación experimental asociada con la multitud de tales partículas que eran producidas en los aceleradores, estaba no obstante interesado en otros caminos físicos a través de los que se

podiera entender la física relevante que regía otros sistemas con interacciones fuertes.

Las propiedades de electrones y átomos en materiales densos le proporcionaban precisamente un problema similar, pero en el que la situación experimental era más limpia y el paisaje teórico estaba entonces mucho menos poblado.

De hecho, hasta que Feynman abordó el problema, nadie había intentado usar la mecánica cuántica a nivel microscópico para obtener directamente las propiedades generales de la transición del helio líquido desde un estado normal a otro superfluido.

Que la mecánica cuántica desempeñaba un papel clave en la superfluidez se sabía desde hacía tiempo. En primer lugar, los únicos sistemas conocidos en la naturaleza que se comportaban de manera similar, sin ninguna disipación ni pérdida de energía, eran los átomos. Según las leyes del electromagnetismo clásico, los electrones que orbitan en círculos alrededor de protones deberían perder energía por radiación, de modo que los electrones tendrían que caer rápidamente en espiral al núcleo. Sin embargo, Niels Bohr postuló, y Erwin Schrödinger demostró después con su ecuación de ondas, que los electrones podían existir en niveles de energía estables en los que sus propiedades permanecerían fijas en el tiempo, sin disipación alguna de energía.

Eso está bien para electrones individuales o átomos, pero ¿podía un sistema macroscópico, como una cantidad visible de helio líquido, existir en un único estado cuántico? Aquí había otra clave de que la mecánica cuántica era importante. Clásicamente, el cero absoluto

se define como la temperatura en la que cesa todo el movimiento. No existe energía calorífica para que los átomos vibren o choquen entre sí, como en un gas estándar o en un líquido, o incluso en un sólido. Además, suponiendo que átomos separados de helio tenían alguna pequeña atracción residual entre sí, lo necesario para que un líquido no se fragmente en un gas de átomos individuales, entonces en el cero absoluto, o cerca de él, el helio líquido debería congelarse en un sólido rígido, con los átomos fijos en sus posiciones por su atracción mutua y sin ninguna energía en el entorno para moverlos. Sin embargo, no es este el caso. El helio líquido no se solidifica a ninguna temperatura alcanzable por baja que sea, incluso por debajo de  $1$  grado, como ya demostró Onnes. La mecánica cuántica es de nuevo la culpable. Incluso el estado de mínima energía de un sistema cuántico tiene siempre una energía distinta de cero, asociada a las fluctuaciones cuánticas. Entonces, incluso en el cero absoluto, los átomos de helio todavía se agitarían. El helio es muy ligero y al mismo tiempo la atracción entre sus átomos es lo bastante pequeña como para que la energía del estado cuántico fundamental de los átomos sea suficiente para superar esta atracción y que estos puedan moverse en forma líquida, antes que quedar fijos en una red como un sólido. En los átomos de hidrógeno, que son incluso más ligeros, se daría el mismo fenómeno, si no fuera porque los átomos de hidrógeno se atraen mucho más fuertemente entre sí, de manera que la energía de su estado fundamental a bajas temperaturas no es suficiente para romper los enlaces de un sólido, y el hidrógeno se congela.

El helio es, por tanto, único en seguir siendo un líquido a bajas temperaturas, y esta peculiaridad es intrínsecamente mecánico-cuántica en origen. Por consiguiente, tiene sentido que la mecánica cuántica también rija la transición que hace pasar el helio de un líquido normal a un superfluido en torno a 2 grados por encima del cero absoluto.

Ya en 1938, el físico Fritz London había sugerido que la transición a la superfluidez podría ser un ejemplo macroscópico de un fenómeno que Einstein y el físico indio Satyendra Nath Bose habían predicho en un gas ideal de bosones —esto es, partículas con valores del espín enteros—. A diferencia de los fermiones, que, como ya ha sido descrito, están sujetos al principio de exclusión de Pauli y no pueden hallarse en el mismo estado en el mismo lugar y al mismo tiempo, los bosones se comportan justo del modo opuesto. Como Bose y Einstein predijeron, un gas de bosones puede, a una temperatura suficientemente baja, *condensarse* en un único estado cuántico macroscópico, en el que todas las partículas se hallan precisamente en el mismo estado cuántico, y la configuración macroscópica se comportaría como un objeto mecánico-cuántico y no como uno clásico. (En un objeto clásico, las partículas individuales tienen amplitudes de probabilidad sin ninguna correlación con las de sus vecinas. Por lo tanto, se pierde cualquier supuesta interferencia cuántica entre partículas, que procede de las cancelaciones de amplitudes de probabilidad diferentes y que da lugar a muchos de los aspectos extraños del mundo cuántico.)

El problema, no obstante, es que la «condensación de Bose-Einstein», como se la conoce, ocurre en un gas ideal, en el que las partículas individuales no interaccionan entre sí. Sin embargo, los átomos de helio tienen una débil atracción cuando están lejos y una fuerte repulsión cuando están muy cerca. ¿Era posible que tal sistema pudiera con todo tener una condensación tipo Bose-Einstein? Este era uno de los problemas que motivó el interés de Feynman.

Y no solo estaba interesado, sino que también había desarrollado la herramienta que le permitía obtener una comprensión intuitiva de los efectos mecánico-cuánticos. Su método de reformular la mecánica cuántica como una suma sobre caminos, con cada camino ponderado por su acción, proporcionaba, creía él, el marco perfecto para describir los fenómenos microscópicos que gobernaban el helio líquido a bajas temperaturas.

Dos factores clave guiaban a Feynman cuando empezó a considerar la suma sobre caminos para cada partícula en el líquido cuántico. Primero, como los átomos de helio son bosones, la amplitud mecánico-cuántica que describe su configuración es independiente de dónde está cada bosón —no cambia al intercambiar las posiciones de dos átomos de helio cualesquiera—. Esto significa que los caminos que dominan la integral de camino (es decir, los de mínima acción), en los que las partículas individuales retornasen a su posición inicial, habrían de tratarse como idénticos a los caminos donde las posiciones finales de todas las partículas reprodujeran la configuración inicial, aunque algunas partículas hubieran

intercambiado sus posiciones. A primera vista, esto puede parecer una sutileza matemática irrelevante, pero resulta que afecta profundamente a la física.

El segundo factor se concentraba en la acción asociada con el movimiento de cualquier átomo de helio en el fondo de todos sus vecinos. Recuérdese que la acción clásica asociada a cualquier trayectoria comporta sumar la diferencia entre la energía cinética y la energía potencial en todos los puntos a lo largo de la misma. Feynman razonaba que como cualquier átomo de helio se movía a alguna velocidad, podía alcanzar cualquier otro punto sin acercarse a otro átomo de helio y experimentar un potencial repulsivo grande (lo que aumentaría la acción del camino), siempre que los átomos de helio vecinos simplemente se recolocaran para dejar sitio al primer átomo de helio al moverse de un lugar a otro. Si este átomo se moviera lentamente, los átomos vecinos solo tendrían que moverse lentamente para despejar el camino. En el proceso de salir del camino, estos átomos de helio ganarían energía cinética que contribuiría a la acción, pero su energía cinética dependería de la velocidad, y por tanto de la energía cinética, del primer átomo de helio.

El efecto neto de esto, razonaba Feynman, era simplemente cambiar la que normalmente consideraríamos como masa del átomo en cuestión. Esto se debe a que, cuando este se moviera, con él también tendrían que moverse otros átomos saliendo del camino para minimizar la acción. Todo lo demás permanecería igual.

Como resultado de ello, Feynman demostró que las trayectorias que más contribuirían a la suma sobre caminos —es decir, las de acción mínima— serían aquellas en las que cada partícula se moviera como si fuera una partícula libre, pero con una masa ligeramente aumentada. Las de otra manera fuertes interacciones repulsivas a pequeñas distancias podían tenerse completamente en cuenta mediante este efecto y entonces olvidarlas. Pero si las partículas se comportaban como partículas libres, la imagen de un gas ideal de Bose-Einstein era correcta y una transición Bose-Einstein era ciertamente posible.

Que Feynman fuera capaz de demostrar que partículas con interacción fuerte podían no obstante comportarse, en lo concerniente al cálculo de su comportamiento mecánico-cuántico, como si fueran partículas libres tenía claramente una significación para él más allá del caso del helio líquido. Como afirmó en su primer artículo sobre este tema: «Este principio puede usarse en otras ramas de la física, por ejemplo en física nuclear. Ahí existe el enigmático hecho de que los nucleones actúen con frecuencia como partículas independientes a pesar de las interacciones fuertes. Los argumentos que hemos presentado para el helio pueden también aplicarse a este caso». Feynman estaba profundamente impresionado por este fenómeno. Veremos una y otra vez cómo aproximadamente durante los veinte años siguientes su trabajo volvía precisamente a esta situación, en la que objetos que pueden interaccionar fuertemente pueden al mismo tiempo comportarse como si no lo hicieran.



Su interés iba más allá de únicamente los nucleones (esto es, protones y neutrones). Una vez más, estaba interesado en tratar de entender los nuevos mesones de la interacción fuerte, en los que los diagramas de Feynman resultaban inadecuados. Si pudiera utilizar su intuición física, combinada con la riqueza de información experimental sobre el helio líquido, a fin de poner a prueba nuevos métodos para estudiar sistemas con interacción fuerte, tal vez entonces podría aplicarlos al estudio de los mesones. Tanto como eso dijo en el siguiente artículo, que escribió en 1954. Este artículo no involucraba al helio *per se*, sino que más bien exploraba el movimiento de electrones lentos en materiales que se polarizan en su presencia, una vez más usando métodos de integral de camino espacio-temporal para desentrañar la física. De nuevo en sus palabras: «Aparte de su interés intrínseco, el problema es análogo, aunque muy simplificado, a los que aparecen en la teoría convencional de mesones cuando el tratamiento perturbativo es inadecuado». Y, luego, en otro artículo casi una década después: «Es interesante como fenómeno en sólidos, pero tiene un interés más extenso, ya que es uno de los ejemplos más simples de interacción de una partícula y un campo. Es en muchos aspectos análogo al problema de un nucleón interaccionando con un campo mesónico (...| Es el aspecto de fuerte combinación del problema lo que ha despertado tanto interés».

Claramente, aunque Feynman se deleitaba en la unidad de la física —la aplicabilidad de la comprensión de fenómenos en una esfera del universo a la comprensión de fenómenos en una esfera distante—,

sus continuadas referencias a mesones y nucleones a lo largo de todos esos años sugieren que siempre era reconducido al misterio del floreciente mundo subatómico de las partículas elementales y sus exóticas nuevas interacciones. Pronto volvería a ese mundo, pero aún no había resuelto completamente el problema que se había planteado —esto es, explicar la superfluidez y con ella quizás encontrar el santo grial de la superconductividad— y no estaba en su naturaleza abandonar un problema que había empezado antes de obtener las respuestas que deseaba. Placiéndolo, ayudaría a transformar la manera en que comprendemos el comportamiento cuántico de los materiales.

## Capítulo 12

### Ordenando el universo

*La resistencia es fútil.*

*Los Borg al capitán Picard en Star  
Trek: The Next Generation*

Feynman había explicado cómo la transición que conducía al helio superfluido podía *entenderse* como una condensación tipo Bose-Einstein en la que todos los átomos se condensaban en un estado cuántico visible macroscópicamente. Pero eso no resolvía el problema. El mundo no nos parece cuántico porque las misteriosas correlaciones mecánico-cuánticas en el nivel atómico que producen todos los *fenómenos extraños* pueden ser rápidamente destruidas por interacciones con el entorno. Cuando un sistema se va haciendo cada vez mayor, el número y la variedad de estas interacciones, incluyendo ahora interacciones internas entre los muchos constituyentes, aumentan, y la «coherencia cuántica» se pierde en escalas microscópicas de tiempo. Por consiguiente, una cosa es condensarse simplemente en un estado cuántico macroscópico y otra por qué la más pequeña perturbación no destruye este estado. ¿Qué mantiene el helio superfluido como un superfluido?

Hasta que Feynman empezó a trabajar en este tema, las respuestas que había a esta cuestión eran «fenomenológicas». En otras palabras, como los experimentos demostraban claramente que la superfluidez existía, podía extraerse el comportamiento general del sistema de los resultados experimentales y entonces inferir cuáles

tendrían que ser las propiedades físicas microscópicas para reproducir esos resultados. Esto puede parecer una explicación física completa, pero no lo es. Deducir propiedades físicas microscópicas de los experimentos es diferente a explicar por qué la naturaleza origina estas propiedades. Este fue el objetivo que se propuso alcanzar Feynman, y lo consiguió en gran parte.

Lev Landau había propuesto el modelo fenomenológico correcto. Landau dominaba la física en la Unión Soviética con una fuerte personalidad y una amplitud de intereses parejas a las de Feynman, y este lo respetaba tremendamente. De hecho, cuando en 1955 la Academia Soviética de Ciencias invitó a Feynman a asistir a un congreso, conocer a Landau era una de las razones para que inicialmente aceptara la oferta. Desgraciadamente, sin embargo, las tensiones de la guerra fría causaron que el Departamento de Estado le aconsejara no ir, y él siguió ese consejo.

A diferencia de Feynman, cuyo «centro» intelectual parecía volver siempre a la física de partículas, Landau permaneció constantemente en la física de materiales, justo la misma área en la que Feynman se concentraba ahora. Landau había sostenido que la persistencia de la superfluidez implicaba que no existían estados accesibles de baja energía cercanos al estado coherente del condensado Bose-Einstein tales que las perturbaciones pudieran «meter» en ellos el fluido cuántico. Un líquido normal tiene resistencia a fluir (esto es, viscosidad) porque los átomos y las moléculas se mueven agitándose y chocan con otros átomos y moléculas del fluido, con otras impurezas o con las paredes del

recipiente. Estas excitaciones internas solo cambian el estado de movimiento de los átomos individuales, pero disipan energía del fluido al recipiente y hacen más lento el flujo del fluido. Sin embargo, si no existieran nuevos estados cuánticos accesibles para meter en ellos las partículas, estas no podrían cambiar su estado de movimiento como resultado de alguna colisión. Entonces el superfluido continuará moviéndose uniformemente, igual que un electrón en movimiento orbital en un átomo continúa con este movimiento sin disipar energía.

Lo que Feynman esperaba demostrar sobre la base de los primeros principios en mecánica cuántica, usando el método de la integral de camino, era que la conjetura de Landau era correcta. Para ello utilizó un hecho crucial que ya se ha comentado: los átomos de helio son bosones, lo que significa que la amplitud mecánico-cuántica que describe el estado de  $N$  átomos de helio no cambiará si cualquier conjunto de átomos se limita meramente a intercambiar sus posiciones.

Como ya se ha dicho antes, el argumento de Feynman era engañosamente simple. Primero, arguyó que a causa de la repulsión de corto alcance de los átomos de helio, el estado fundamental de más baja energía del líquido será el de aproximadamente densidad uniforme. Feynman consideró que cada átomo se hallaba confinado en una «jaula» definida por las posiciones de todos sus vecinos, cada uno de los cuales ejerce repulsión si los átomos se acercan demasiado. Si la densidad del líquido fuera más elevada en algún lugar, esto significaría que la jaula que rodea uno de los átomos

sería más pequeña, confinando el átomo en cuestión a un espacio más pequeño. Pero el principio de incertidumbre de Heisenberg nos dice que al confinar un átomo a un espacio más pequeño se aumenta su energía. Entonces, la energía del sistema será más baja cuando todos los átomos se encuentren lo más lejos posible de sus correspondientes vecinos, con casi densidad media uniforme.

Un estado de baja energía siempre existente involucra «ondas de sonido» de longitud de onda muy grande. Las ondas de sonido son «ondas de densidad», lo que quiere decir que las ondas de densidad varían lentamente a través del líquido, y las fuerzas atómicas que resisten la compresión actúan como pequeños resortes, causando que un exceso de densidad viaje a cierta velocidad, que define la velocidad del sonido, a través del líquido. Siempre que su longitud de onda sea muy grande, de modo que su variación de densidad es muy paulatina, estas ondas de sonido cuestan muy poca energía. Tampoco cambian las propiedades del líquido, ni —más importante— afectan a su flujo.

Pero, de nuevo, ¿por qué no existen otros estados de baja energía?

Recuérdese que la mecánica cuántica implica que todas las partículas pueden considerarse como ondas de probabilidad, en las que la amplitud de la onda está relacionada con la probabilidad de encontrar las partículas en diversos sitios. Pero no se les llama «funciones de onda» sin una buena razón. Una característica general de las ondas en mecánica cuántica es que la energía asociada a la onda viene determinada por la longitud de onda de esta. Las

funciones de onda que vibran mucho en regiones pequeñas comportan mayores energías que otras que no lo hacen.

La razón de ello está, de hecho, estrechamente relacionada con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Si una función de onda varía de un valor alto a otro bajo en una distancia muy pequeña, entonces se puede localizar la partícula que describe esta función de onda en una extensión muy pequeña. Pero esto significa que la incertidumbre en el momento —y, por tanto, la de la energía— de la partícula es muy grande.

La clave, pues, de encontrar un estado cuántico de baja energía es tener una función de onda sin muchas vibraciones rápidas (sacudidas) muy poco espaciadas. Ahora bien, como ya he explicado, el hecho de tener ondas de sonido de baja longitud de onda no destruye la superfluidez, así que debemos considerar otras posibilidades. Feynman dijo: comencemos con la configuración del estado fundamental, cualquiera que sea, con densidad uniforme, e imaginemos cómo podemos crear un estado que difiere de él, pero solo a largas distancias, de manera que no haya vibraciones rápidas de la función de onda muy cercanas entre sí. Podríamos imaginar hacer esto moviendo algún átomo individual, *A*, una distancia larga, a alguna nueva posición *B*. Pero si la nueva configuración es también una de densidad uniforme, los otros átomos deben reagruparse y alguno de ellos debe moverse para ocupar el sitio del primero.

Ahora bien, al haber movido el átomo a una gran distancia, podríamos pensar que este estado difiere significativamente del

primero solo a distancias largas porque se ha desplazado la partícula A. Pero, como señaló Feynman, todos los átomos de helio son partículas idénticas, bosones para más señas. Por lo tanto, incluso aunque los desplazamientos hayan sido largos, como el resultado final ha sido simplemente un intercambio de bosones idénticos, esto no representa una nueva configuración.

Reflexionando un momento acerca de este ejemplo, no es difícil darse cuenta de que, independientemente de lo lejos que movemos una partícula, la nueva función de onda resultante del sistema no puede nunca reflejar movimientos de la partícula que varíen en más de alrededor de la mitad de la distancia media entre partículas vecinas. Cualquier movimiento que comporte una distancia mayor puede sustituirse por un conjunto de intercambios de otros átomos de helio, lo que no cambiará la función de onda en absoluto.

Esto significa que las mayores vibraciones rápidas adicionales que podemos introducir en la función de onda para describir un nuevo estado del sistema no pueden exceder el espaciado interatómico medio. Pero las vibraciones a esta escala o menores corresponden a energías relativamente altas, ciertamente más altas de lejos que las que podrían producir fluctuaciones térmicas aleatorias a las bajas temperaturas a las que se observa la superfluidez.

Así pues, Feynman demostró) mediante este elegante razonamiento físico que la estadística de los bosones implicaba la no existencia de estados excitados cerca del nivel fundamental, que pudieran ser fácilmente accesibles a través del movimiento de los átomos produciendo así cierta resistencia al flujo de la corriente. El estado



fundamental superfluido persistiría siempre que la energía térmica disponible para el sistema fuera menor que la separación (en energía) entre el estado fundamental y el estado excitado de menor energía.

Pero, desde luego, hizo más. Al usar su formalismo de integral de camino, Feynman fue capaz de estimar la energía de los estados excitados, a los que Landau había llamado «rótenes», haciendo variar la función de onda entre todas las suposiciones razonables y calculando el estado de energía mínima. Las aproximaciones eran crudas y al principio no se ajustaban demasiado bien a los datos existentes, pero a lo largo de la década refinó sus análisis e hizo predicciones que concordaban con los datos.

Antes de que Feynman hubiera empezado a trabajar en el helio líquido, el físico László Tisza, a quien conocí más tarde cuando ya era un encantador profesor retirado en el MIT, había propuesto lo que él llamó un «modelo de dos fluidos» para describir cómo tendría lugar la transición entre el helio líquido superfluido y el fluido normal. Landau extendió después la idea. Imaginó que a la temperatura de cero absoluto, todo el helio líquido estaría en estado superfluido. Al calentar el fluido, se crearían algunas excitaciones y estas se moverían en el fondo superfluido, pero podrían chocar con las paredes y disipar energía, actuando por consiguiente como un componente de fluido normal. Cuando se calienta más el sistema, se crean más excitaciones y finalmente el componente de fluido normal ocupa todo el volumen.

Las estimaciones cuantitativas de Feynman basadas en primeros principios reproducían de nuevo la imagen física general, pero pasarían treinta y dos años antes de que pudieran realizarse cálculos suficientemente detallados para obtener una buena concordancia con los datos. En 1985, usando un supercomputador para llevar a cabo el cálculo de las integrales de camino detalladas a las que Feynman se había aproximado en líneas generales, los físicos fueron capaces de verificar que este método podía dar lugar a un acuerdo excelente con la naturaleza detallada de la transición entre las fases normal y superfluida del helio líquido.

Pero quizás el pedazo más impresionante de prestidigitación física que Feynman se sacó de la manga era el relacionado con la solución del problema siguiente: ¿qué le pasaría a un cubo lleno de helio superfluido al girarlo muy rápidamente? Como ocurre con muchas cuestiones físicas, esta no parece ser demasiado apremiante, hasta que se piensa en ella. Feynman señaló que debido a la naturaleza del estado fundamental y a la energía requerida para las excitaciones por encima de él, este había de ser «irrotacional», lo que significaba que no podían formarse remolinos que obstruyeran el flujo de la corriente. ¿Pero qué sucedería ahora si hiciéramos que todo el fluido girara mediante una rotación del recipiente que lo contiene? Feynman desarrolló el elemento clave de lo que sucedería, sin tener ni idea de que el químico noruego- americano y premio Nobel Lars Onsager también había sugerido una solución similar. Una vez más, las reglas de la mecánica cuántica desempeñaban un papel decisivo.

Recuérdese que Niels Bohr había empezado la revolución cuántica con la hipótesis de que cuando un electrón orbitaba en un átomo solo estaban permitidos ciertos niveles de energía. Las energías estaban entonces cuantizadas. Pero el principio que determinaba la regla de cuantización procedía realmente del momento angular de la rotación del electrón en dicho átomo. Bohr postuló que este momento angular estaba cuantizado en términos de cierta unidad (la misma que ya he introducido antes para electrones, en la que su momento angular de espín vale  $\frac{1}{2}$ ).

Si el fluido también se rige por la mecánica cuántica, su momento angular orbital, si estuviera forzado a girar, estaría también cuantizado en términos de la misma unidad fundamental. Esto querría decir que habría una cantidad mínima de rotación.

Feynman meditó detenida y cuidadosamente sobre cómo minimizar la energía en un fluido así, y al final llegó a una imagen física en la que el fluido no rotaría globalmente, sino que lo harían muchas pequeñas regiones —lo más pequeñas posible, de hecho, del orden de varios átomos en longitud—, cada una en torno a su correspondiente región central. Estas regiones centrales se alinearían en la dirección vertical para formar líneas de vórtice, como los embudos de un tornado o el agua que se arremolina al caer por un desagüe (como decía Feynman). Estas líneas de vórtice se distribuirían en todo el fondo —el fluido no rotante— con densidad uniforme.

El hecho de pensar sobre vórtices permitió a Feynman estimar muchas facetas del comportamiento del helio líquido, incluyendo

cómo se establece la resistencia al producirse las excitaciones tipo vórtice. Estos vórtices se retorcerían y enmarañarían entre sí al fluir el líquido, y, a una velocidad que resultaba cien veces menor de lo que en principio podría imaginarse, la superfluidez desaparecería.

La imaginación creativa de Feynman produjo al final una imagen muy física de los rotones de Landau, las excitaciones locales de energía más baja. Feynman notó que un vórtice no necesitaba alinearse completamente desde la cima al fondo de un recipiente, sino que también podía ondularse en forma de anillo. Pensó en los anillos de humo que había estudiado en el bachillerato y se dio cuenta de que quizá la versión cuántica del menor de los anillos de los átomos que podían existir en el líquido podía describir un rotón, a partir de lo cual dedujo sus propiedades. Cuando desarrollaba las matemáticas en su cabeza y trataba de resolver las ecuaciones para intentar compaginar la imagen intuitiva de un anillo de humo con las matemáticas de la ecuación de Schrödinger, llegó finalmente a otra imagen muy física: la de unos niños deslizándose rápidamente por una barandilla y luego volviendo a subir lentamente la escalera para volver a bajar de nuevo. El rotón podría ser una región local donde el fluido se moviera a una velocidad diferente relativa al fluido de fondo, pero, para que se cumplan las propiedades del momento angular, el fluido debería moverse de nuevo hacia atrás en algún otro sitio, como un vórtice. Y, al enrollarse en un anillo, el vórtice se contraería hasta transportar la mínima energía posible, la energía de un rotón.

Todas estas meditaciones son divertidas, pero lo que es particularmente importante acerca de ellas es cómo una vez más cambiaron la manera de pensar de los físicos sobre este tema. Las conjeturas intuitivas de Feynman para «poner a prueba funciones de onda», esto es, variar dichas funciones para explorar cuáles tenían la energía mínima, establecieron el uso de lo que se llama «el método variacional en física» de la materia condensada, un método que se está usando desde hace más de cincuenta años para abordar problemas fundamentales en el estudio de la materia.

Feynman no pudo resolver algunos de ellos, pero la influencia de sus ideas fue inconfundible. Considérese *la que se le escapó*, la superconductividad. Feynman nunca tuvo éxito en conseguir el avance que lograron los físicos John Bardeen, León Cooper y Robert Schrieffer para explicar este fenómeno —debido en gran parte a que no intentó seguir completamente el trabajo previo en el campo, una inoportuna característica que le haría perder buenas oportunidades en algunos descubrimientos fundamentales—, pero el enfoque de estos tenía mucho de prestado de las ideas que él introdujo para estudiar las propiedades de los materiales en general, y específicamente de las que desarrolló para explicar la superfluidéz. El primer artículo de Feynman aplicando su enfoque espacio-temporal a entender las propiedades de los electrones en materiales detallaba la importancia del acoplamiento de los electrones a modos vibracionales en el material. Este acoplamiento resultó de vital importancia para comprender las interacciones que permitían que pares de electrones se ligaran entre sí y formaran condensados en

un superconductor. De hecho, un año antes de que él y sus colegas resolvieran finalmente el problema que les proporcionó el Premio Nobel, Schrieffer estuvo entre el público que escuchaba a Feynman contar en detalle sus propias ideas —equivocadas— sobre la superconductividad. El enfoque de ellos tres hacia la comprensión de la superconductividad era determinar, justo como lo había hecho Feynman, cómo podía formarse un condensado tipo Bose-Einstein, en este caso para partículas como los electrones que no eran bosones. Igualmente importante era demostrar, como había demostrado Feynman, que había un salto de energía entre el estado fundamental y los estados excitados, de modo que, a bajas energías, no podía haber colisiones que produjeran excitaciones que disipan energía.

Las ideas de Feynman acerca de cómo había de introducirse el momento angular en un superfluido obligado a rotar, a través de la formación de vórtices, eran también notablemente clarividentes. En los superconductores ocurre un fenómeno similar. Normalmente, un superconductor no permitirá que exista un campo magnético en su interior, igual que un superfluido tenderá a no moverse en remolinos circulares. Sin embargo, como mostró Feynman, si el fluido es obligado a rotar (digamos, sometiéndolo a una presión alta y congelándolo, y entonces girándolo y permitiéndole fundirse), la circulación ocurrirá mediante la producción de vórtices. Más tarde, Alexei Abrikosov mostró que se pueden forzar líneas magnéticas a través de un superconductor, pero también ellas permearán el superconductor en líneas de vórtice delgadas. Abrikosov ganó el

Premio Nobel por su trabajo, y en su discurso pronunciado al recibirlo dijo que metió su propuesta original en un cajón porque Landau no la valoraba mucho. Fue después de conocer las ideas de Feynman acerca de vórtices rotacionales en superfluidos cuando Abrikosov tuvo el coraje de publicar las suyas sobre vórtices magnéticos. La incursión de Feynman en la física de la materia condensada fue, por consiguiente, notable, no solo por la manera en que su intuición condujo a pistas clave, sino sobre todo por el modo en que, en el curso de menos de media docena de trabajos, dejó en el campo una huella manifiesta.

Durante este periodo, a Feynman le complació tender la mano a una nueva comunidad de físicos, pero padeció las ansiedades que se dan cuando se entra en un campo fuera de la propia experiencia. A veces uno se siente pisado. Por ejemplo, después de sorprender a los estudiantes de Onsager con sus predicciones de vórtices en un congreso en el que se le invitó a hablar, Feynman tuvo ocasión de conocer a Onsager en un encuentro de física de la materia condensada. En la comida, antes de que Feynman diera una *charla*, *Onsager* le preguntó: «¿Así que cree tener una teoría del helio líquido?». Feynman respondió: «Sí, la tengo». Onsager replicó simplemente: «Bah», lo que llevó a Feynman a pensar que Onsager no esperaba mucho de él.

Sin embargo, al día siguiente, cuando Feynman dijo que había un aspecto de la transición de fase que no entendía, Onsager habló inmediatamente, diciendo: «El señor Feynman es nuevo en nuestro campo, y evidentemente hay algo de lo que no sabe, y debemos

formarlo». Feynman se quedó petrificado, pero Onsager continuó diciendo que lo que Feynman no entendía acerca del helio no se entendía para ningún material, y «por consiguiente el hecho de que no pueda hacerlo para He II no resta en absoluto el valor de su contribución a la comprensión del resto de los fenómenos».

Feynman se sintió tan cautivado por esta muestra de cordialidad que continuó viéndose con Onsager y discutiendo con él de diversas cosas, aunque Feynman era con mucho quien más hablaba. Onsager no era uno de los granjeros noruegos solteros de Minnesota salidos de la pluma de Garrison Keillor, pero procedía de la misma estirpe noruega y hablaba solo cuando sentía que tenía realmente algo que decir.

Y aunque Feynman pudo haberse saltado unos cuantos premios más, el mayor para él residía siempre en entender la física. Y si alguna vez sintió envidia o pena por haber perdido un premio, o por un crédito no reconocido, nunca lo demostró. Abundan los ejemplos en los que él había desarrollado algo para su propia satisfacción, pero no sentía la necesidad de escribir un artículo, con lo que simplemente alguien más conseguía atención por la misma idea. Asimismo, si descubría que alguien tenía una idea similar, con frecuencia citaba el trabajo de este antes que el suyo propio. Por ejemplo, quizás en respuesta a la muestra de generosidad intelectual de Onsager en su primer encuentro, siempre acreditaba a Onsager con la idea de los vórtices, incluso aunque descubrió el trabajo de Onsager mucho después de que hubiera obtenido sus propios resultados.



Uno de los mejores ejemplos de la magnanimidad de Feynman en este aspecto ocurrió veinte años después de que empezara a pensar en el helio líquido y en los vórtices. Al pensar acerca de sistemas bidimensionales como las capas delgadas de helio líquido, Feynman se dio cuenta de que la posible aparición de vórtices podía cambiar espectacularmente sus propiedades, dando lugar a un tipo de transición de fase que, según parece, violaba un famoso teorema matemático sobre el comportamiento de dichos sistemas bidimensionales. Incluso escribió un artículo sobre el tema. Sin embargo, descubrió que dos jóvenes, y entonces desconocidos, físicos, Michael Kosterlitz y David J. Thouless, precisamente habían hecho un trabajo sobre la misma idea. Antes que abrumarlos o adelantarse a ellos, Feynman decidió no enviar su artículo a publicación, contentándose solo con haber resuelto el problema. Esta extraordinaria transición de fase ha llegado a conocerse como «la transición de Kosterlitz-Thouless».

No obstante, por más que a Feynman le agradara este respiro fuera del inquieto terreno experimental y teórico de la física de partículas, todavía ansiaba descubrir una nueva ley de la naturaleza, y la frontera de la física fundamental era la mejor posibilidad. Así pues, aunque trabajaba en el helio líquido, trataba de estar al día de lo que ocurría en su propio territorio. Dirac había tenido su ecuación, Feynman aún no tenía la suya.

## Capítulo 13

### Escondiéndose en el espejo

*Ese fue el momento en que supe  
cómo funcionaba la naturaleza.*

*RICHARD FEYNMAN*

Los mismos mesones que habían empezado a invadir el mundo de Richard Feynman en 1950 habían vuelto del revés el mundo de los físicos de partículas en 1956. Se seguían descubriendo nuevas partículas, cada una más extraña que la anterior. Se producían enérgicamente partículas en los rayos cósmicos, pero la misma física que regía su producción debería también haber causado su rápida desintegración. En cambio, duraban tanto como una cienmillonésima de segundo, lo que no parece demasiado pero es, en realidad, millones de veces mayor que lo que se predeciría sobre la base de los primeros principios.

Hacia 1956, la fama de Feynman entre los físicos estaba asegurada. Los diagramas de Feynman se habían convertido en una parte de la caja de herramientas estándar de la comunidad de físicos, y todo el que pasaba por Caltech hacía esfuerzos por rendirle homenaje. Todos querían conversar con Feynman porque deseaban hablar de sus propios problemas de física. La misma característica que le hacía tan irresistible para las mujeres hacía también milagros con los científicos. Era una característica que compartía con el prestigioso físico italiano Enrico Fermi, el premio Nobel que ayudó a dirigir el Proyecto Manhattan para construir el primer reactor

nuclear controlado en la Universidad de Chicago y el último físico nuclear o de partículas experto tanto en teoría como en experimentación. Fermi había desarrollado una teoría simple que describía el proceso nuclear asociado a la desintegración del neutrón en un protón (y un electrón y finalmente una nueva partícula que Fermi había llamado «neutrino», «neutrón pequeño» en italiano), llamada «desintegración beta», uno de los procesos esenciales que formaba parte de las reacciones que condujeron a la bomba atómica y, después, a las armas termonucleares.

Como el neutrón vivía casi diez minutos antes de desintegrarse,<sup>9</sup> una eternidad virtual si se compara con la vida media de los mesones inestables fuertemente interactivos descubiertos en la década de 1950, se advirtió que las fuerzas que regían su desintegración tienen que ser muy débiles. A la interacción de la que Fermi desarrolló un modelo para la desintegración beta se la llamó, por tanto, «interacción débil». Hacia mediados de la década de 1950, había quedado claro que la interacción débil era una fuerza completamente distinta de la naturaleza, separada de las interacciones fuertes que producían todas las nuevas partículas que se estaban observando en los aceleradores, y que la fuerza débil era probablemente responsable de las desintegraciones de todas las partículas con vidas medias anómalamente largas. Pero, aunque el modelo de Fermi era simple, no existía una teoría subyacente que

---

<sup>9</sup> En realidad, vive en promedio casi quince minutos. La vida media del neutrón es de 886 segundos. (N. del t.)

conectara todas las interacciones que se observaban y adscribían a la nueva fuerza.

Fermi había convertido el grupo de física teórica de la Universidad de Chicago en un influyente centro internacional. Todo el mundo deseaba estar allí, para compartir no solo el entusiasmo de la física, sino también la emoción de trabajar con Fermi. Este tenía una característica muy poco común, que también poseía Feynman: ¡cuando escuchaban, lo hacían *de verdad*! Concentraban toda su atención en lo que se hablaba y trataban de entender las ideas que se expresaban y, si era posible, intentaban mejorarlas.

Desgraciadamente, Fermi murió de cáncer en 1954, provocado probablemente por el manejo descuidado de materiales radiactivos en una época en que no se entendían los peligros que esto acarrea. Su muerte fue un duro golpe tanto para la física como para la Universidad de Chicago, donde había ayudado a entrenar a jóvenes teóricos y experimentales que llegarían a dominar por completo el campo en la siguiente generación.

Tras la muerte de Fermi, muchos teóricos jóvenes empezaron a sentirse atraídos por el magnetismo de Feynman. Al contrario que Fermi, él no tenía el carácter o la paciencia para ayudar diligentemente a formar científicos. No obstante, nada era tan lisonjero para ellos como tener a Feynman escuchando atentamente sus ideas. Pues una vez que Feynman agarraba un problema, no descansaba hasta que lo hubiera resuelto o hubiera decidido que era irresoluble. Muchos físicos jóvenes confundían el interés de

Feynman en sus problemas con un interés por ellos. El resultado era en extremo seductor.

Un hombre que se sintió atraído desde Chicago por la luz de Feynman fue un niño prodigio de veinticinco años llamado Murray Gell-Mann. Si Feynman dominó la física de partículas en la época inmediatamente posterior a la Segunda Guerra Mundial, Gell-Mann hizo lo propio en la década posterior. Como Feynman lo expresó después, en una de sus características muestras de elogio del trabajo de los demás: «Nuestro conocimiento de la física fundamental no contiene una sola idea que no lleve el nombre de Murray Gell-Mann».

Y no exageraba al decirlo. El talento de Gell-Mann se ajustaba perfectamente a los problemas de la época, y él dejó una marca indeleble en el campo de las partículas, no solo a través de palabras exóticas como «extrañeza» o «quarks», sino sobre todo por sus ideas, que, como las de Feynman, continúan matizando discusiones en la vanguardia de la física actual.

Gell-Mann era, sin embargo, lo contrario de Feynman en muchas cosas. Como Julián Schwinger, fue un niño prodigio. Al acabar el bachillerato a los quince años, recibió la mejor oferta de Yale, que no le gustó mucho, pero fue allí de todos modos. Se graduó a los diecinueve años y se marchó al MIT, donde obtuvo su doctorado a los veintiuno. En una ocasión me dijo que podría haberse doctorado en un solo año si no hubiera estado perdiendo el tiempo tratando de perfeccionar el tema de su tesis.

Gell-Mann no solo dominaba la física a los veintiún años; lo dominaba todo. Lo más notable era su fascinación por las lenguas, su etimología, pronunciación y las relaciones entre ellas. Es difícil encontrar a alguien que conozca a Murray que no lo haya oído corregir la pronunciación de su propio nombre.

Sin embargo, Gell-Mann mostraba una clara diferencia con Schwinger que le condujo a su atracción hacia Feynman. No tenía paciencia con quienes empleaban sus a menudo marginales esfuerzos en un caprichoso formalismo. Gell-Mann podía ver a través del subterfugio, y había pocos físicos que pudieran ser tan descalificadores del trabajo de los demás como él. Pero Gell-Mann sabía, por el trabajo de Feynman, y por lo que decía, que este hacía física. No había bobadas, ni pretensión; nada salvo física. Además, las soluciones de Feynman realmente importaban. Como dijo Gell-Mann: «Lo que siempre me gustaba del estilo de Richard era la falta de pomposidad en su presentación. Yo estaba cansado de teóricos que revestían su trabajo con un lenguaje matemático caprichoso o inventaban pretenciosos marcos para sus a veces bastante modestas contribuciones. Las ideas de Richard, frecuentemente poderosas, ingeniosas y originales, eran presentadas de una manera directa que yo encontraba refrescante».

Había otra faceta del carácter de Feynman, la de *showman*, que atraía mucho menos a Gell-Mann. Como lo expresó después: «Gastaba una gran cantidad de tiempo y energía generando anécdotas sobre sí mismo». Pero aunque esta característica le pondría después de los nervios, cuando Gell-Mann, tras la muerte

de Fermi en 1954, estuvo considerando dónde le gustaría trabajar si abandonara Chicago, y con quién, la elección era clara.

Gell-Mann, junto con el físico teórico Francis E. Low, había realizado un notable y temprano cálculo en 1954, usando la QED de Feynman, que pretendía abordar la cuestión de qué le ocurriría precisamente a la teoría cuando se exploraban distancias cada vez más pequeñas, exactamente el régimen tradicionalmente inobservable en el que la prescripción de Feynman para eliminar infinitos comportaba alterar artificialmente la teoría. El resultado era sorprendente, y aunque técnico y difícil de evaluar entonces, fundamentó muchos de los desarrollos en física de partículas en la década de 1970.

Gell-Mann y Low encontraron que, debido a los efectos de pares virtuales partícula-antipartícula que habían de incorporarse al considerar efectos mecánico-cuánticos en QED, las cantidades que eran medibles físicamente, como la carga eléctrica de un electrón, dependían de la escala en que se medían. En el caso de la QED, de hecho, la carga efectiva del electrón, y por tanto la intensidad de la interacción electromagnética, crecería conforme se penetrara en la nube de pares virtuales electrón-positrón que rodearían a cada partícula.

A Feynman, que era famoso por ignorar los artículos de los demás ya que trataba de obtener, o más frecuentemente reobtener, todos los resultados físicos, sin embargo le impresionó mucho el artículo de Gell-Mann y Low, y así se lo dijo a Gell-Mann cuando este visitó Caltech por primera vez. De hecho, Feynman dijo que era el único

cálculo de QED que conocía que no había realizado él mismo de manera independiente. En retrospectiva, esto era algo sorprendente porque el efecto del enfoque de Gell-Mann y Low llevó a una interpretación de la eliminación de infinitos en teoría cuántica de campos completamente distinta a la que Feynman continuó manteniendo durante algún tiempo. Ello sugiere, como se verá, que el enfoque de Feynman a la renormalización, el cual este siempre había considerado como un mero artificio que un día se sustituiría por un verdadero conocimiento fundamental de la QED, reflejaba en cambio una realidad física subyacente que es básica en la manera en que funciona la naturaleza en sus escalas más pequeñas.

Cuando Gell-Mann llegó a Caltech, tenía claro, como lo tenía gran parte del resto de la comunidad de la física, que quizá las dos mejores mentes de los físicos en toda una generación se encontraban ahora en la misma institución. Todo el mundo estaba preparado para una combustión espontánea.

Aunque es inevitablemente injusto escoger una sola cualidad para caracterizar el trabajo de una mente tan inventiva y profunda, Gell-Mann había empezado ya a poner su marca en la física, y continuaría haciéndolo, mediante el descubrimiento de nuevas simetrías de la naturaleza en sus escalas más pequeñas. La simetría es vital para nuestro conocimiento actual de la naturaleza, pero el público no suele entender su trascendencia, en parte porque las simetrías en física se perciben como menos interesantes en sentido artístico. Tradicionalmente, cuanto más ornamentales sean las simetrías de una pieza de arte, más se la aprecia. Así, un bello



candelabro con muchas piezas curvas idénticas se considera un tesoro. El trabajo artístico de M. C. Escher, en el que muchas copias de un pescado u otro animal están estrechamente insertadas en un dibujo, es otro ejemplo. Pero en física las simetrías máspreciadas son las que hacen a la naturaleza menos ornamentada. Una aburrida esfera es mucho más simétrica que un tetraedro, por ejemplo.

Esto es así porque las simetrías en física nos dicen que los objetos o los sistemas no cambian cuando cambiamos nuestra perspectiva. Así, por ejemplo, un tetraedro parece no cambiar cuando lo rotamos 60 grados sobre cualquiera de sus caras. Sin embargo, una esfera tiene mucha más simetría porque cuando la rotamos sobre *cualquier* ángulo, pequeño o grande, parece la misma. Reconocer que el que las simetrías impliquen que algo no cambia al cambiar nuestra perspectiva refleja la importancia de estas en física parece, retrospectivamente, algo casi trivial. Pero no sería hasta que la joven matemática alemana Emmy Noether desvelara en 1918 lo que ahora se llama «teorema de Noether» cuando las implicaciones definitivas de las simetrías en física se hicieron manifiestas.

Lo que Noether (que no pudo al principio obtener un puesto en la universidad por ser mujer) demostró era que para cada simetría existente en la naturaleza también tiene que existir una cantidad que se *conserva*, esto es, que no cambia con el tiempo. Los ejemplos más famosos son la conservación de la energía y la conservación del momento. Los estudiantes aprenden normalmente que estas cantidades se conservan, pero se les enseña como si fuera un acto

de fe. El teorema de Noether nos dice que la conservación de la energía surge porque las leyes de la física no cambian con el tiempo (eran las mismas ayer que hoy) y que la conservación del momento procede de que estas leyes no varían de un punto a otro (serán las mismas si hacemos experimentos en Londres o en Nueva York).

El intento de usar simetrías para restringir o gobernar las leyes fundamentales de la física se hizo más común en los primeros años de la década de 1950, cuando la plétora de nuevas partículas que aparecían en los aceleradores obligó a los físicos a buscar algún orden entre el caos manifiesto. El esfuerzo se dirigió a la búsqueda de cantidades que no sufrían ningún cambio cuando, por ejemplo, una partícula se desintegraba en dos partículas. La esperanza se cifraba en que tales cantidades conservadas permitirían trabajar hacia atrás para encontrar las simetrías subyacentes de la naturaleza, y que estas regirían entonces la forma matemática de las ecuaciones que describirían la física relevante. Esa esperanza se ha realizado.

Gell-Mann fue conocido primero tras proponer en 1952 que los nuevos mesones, cuya producción era tan fuerte pero cuya desintegración era tan débil, se comportaban así porque alguna propiedad asociada con las nuevas partículas se conservaba en la interacción fuerte. Llamó a esta extraña cantidad, quizá no inapropiadamente, «extrañeza». Sin embargo, los conservadores editores de *Physical Review*, en la que publicó primero sus ideas, creyeron que ese nombre era inapropiado en una publicación de física y rehusaron usarlo en el título de su artículo sobre el tema.

El argumento de Gell-Mann era el siguiente: puesto que la extrañeza se conserva, las nuevas partículas han de producirse en pares partícula-antipartícula, con valores opuestos de este nuevo *número cuántico*. Las partículas serían entonces absolutamente estables, porque el desintegrarse en cualesquiera partículas no extrañas violaría esta ley de conservación —cambiando el *número de extrañeza* en uno—, si la interacción fuerte fuera la única que actuara. Sin embargo, si la fuerza débil, la responsable de la desintegración de los neutrones y de las reacciones que producen energía en el Sol, no respetara esta ley de conservación, dicha fuerza podría inducir desintegraciones de estas nuevas partículas. Pero, como la fuerza era débil, las partículas sobrevivirían entonces un tiempo largo antes de desintegrarse.

A pesar de lo atractiva que era esta idea, el éxito en física no involucra solo «postdicción». ¿Qué predeciría que fuera posible verificar? Ciertamente, esta fue la reacción inmediata entre muchos de los colegas de Gell-Mann. Como dijo Richard Garwin, un brillante físico experimental que había desempeñado un papel clave en el desarrollo de la bomba de hidrógeno: «No veo qué uso podría tener».

El salto se produjo cuando Gell-Mann se dio cuenta de que este número cuántico de extrañeza podía usarse para clasificar conjuntos de partículas existentes, e incluso hizo una predicción más extraña. Predijo que una partícula neutra llamada «K-cero» habría de tener una antipartícula, el «anti-K-cero», diferente de ella. Puesto que prácticamente todas las demás partículas neutras, como

el fotón, son equivalentes a sus antipartículas, esta propuesta era inusual. Pero al final se probó que era correcta, y el sistema K-cero-anti-K-cero ha servido como un extraordinario laboratorio para sondear la nueva física, cimentando la reputación de Gell-Mann entre la entonces naciente nueva generación de físicos de partículas. Fue después de su introducción de la extrañeza, y tras la muerte de Fermi, cuando Gell-Mann empezó a recibir ofertas para trabajar fuera de Chicago. Deseaba ir a Caltech a trabajar con Feynman, y Caltech animó su decisión igualando otras ofertas competidoras y haciendo a Gell-Mann, con veintiséis años, el catedrático más joven de su historia. La esperanza era que este no fuera el acontecimiento histórico más importante que Gell-Mann, junto a Feynman, pudiera brindar a la universidad.

Feynman y Gell-Mann mantenían una notable asociación en lo referente al toma y daca intelectual. Ambos podían debatir sin parar en sus despachos, una especie de discusión amistosa, o, como Gell-Mann lo llamó más tarde, «retorciéndole el rabo al cosmos», cuando trataban de desvelar los misterios más recientes en la vanguardia de la física de partículas. Esto también tuvo impacto en sus estudiantes y colaboradores posdoctorales. Recuerdo, cuando era un joven investigador en Harvard, trabajar con Sheldon L. Glashow, un antiguo estudiante de Schwinger y premio Nobel. Nuestros encuentros estaban puntuados con una mezcla de argumentos y risas. Sheldon L. Glashow había sido investigador posdoctoral en Caltech con Gell-Mann, y supongo que estaba fuertemente influenciado por el estilo de discusión que observó allí, del que yo, y

espero que mis estudiantes, hemos sido beneficiarios posteriores. La asociación entre Feynman y Gell-Mann también fue un inquieto matrimonio de opuestos. Gell-Mann era la personificación por excelencia del científico culto, y Feynman no lo era. Gell-Mann era, por naturaleza, sentencioso con la gente y sus ideas, y le preocupaba siempre la prioridad intelectual. Feynman no tenía paciencia con las tonterías en física o con la pomposidad y apreciaba el talento, pero si se le ganaba, como he comentado antes, lo que más le importaba era si él había tenido razón o no, no quién se llevaba al final los méritos. Era una interesante asociación, que, dada la diferencia en carácter y estilo de cada uno, estaba destinada a tener problemas en algún momento, pero no inmediatamente.

No obstante, aquella era una época en la que ambos científicos se hallaban cerca de sus picos creativos. Gell-Mann estaba empezando a revolucionar el mundo de las partículas elementales, y Feynman acababa de completar su propia revolución en mecánica cuántica. Cuando empezaron a trabajar juntos, había surgido otro fastidioso problema en la física, también relacionado en parte con las nuevas partículas extrañas que Gell-Mann había estado clasificando. Este problema era de lejos más enigmático que las meramente vidas medias extralargas que explicaba la teoría de Gell-Mann. Tenía que ver con una de las simetrías más comunes (y de sentido común) de la naturaleza que caracterizan el mundo físico.

En algún momento de nuestra infancia todos aprendemos la diferencia entre derecha e izquierda. No es fácil, y Feynman solía decir a sus estudiantes que a veces incluso tenía que mirar el lunar

de su mano izquierda para estar seguro. Esto se debe a que la distinción entre derecha e izquierda es arbitraria. Si llamáramos «izquierda» a lo que llamamos «derecha», y viceversa, ¿qué cambiaría excepto los nombres? La auténtica cuestión es si «izquierda» y «derecha» son realmente meros constructos semánticos humanos o si, por el contrario, la naturaleza tiene una manera más fundamental de distinguirlas.

Pensémoslo de otro modo, según las líneas que Feynman describió en una ocasión. Si estuviéramos en comunicación con alienígenas de otro planeta, ¿cómo les explicaríamos la diferencia entre derecha e izquierda? Bueno, si el planeta tuviera un campo magnético como el de la Tierra y orbitara su estrella en la misma dirección que lo hace la Tierra, podríamos hacerles coger una barra de imán y alinear su polo norte para que señale el Norte geográfico, y entonces la izquierda podría definirse como la dirección en la que su Sol se pone. Pero ellos dirían: «Sí, tenemos una barra de imán, pero ¿qué extremo es el Norte?».

Podemos seguir así indefinidamente hasta convencernos de que términos como «izquierda» y «Norte» son convenciones arbitrarias que hemos inventado, pero que no tienen un significado último en la naturaleza. ¿O lo tienen? El teorema de Noether nos dice que si la naturaleza no cambia al intercambiar derecha e izquierda, tendría que existir una cantidad, que llamamos «paridad» —que se conserva— y que no cambia con independencia de los procesos físicos que tengan lugar.

Sin embargo, esto no significa que todos los objetos individuales sean simétricos izquierda-derecha. Mírese en el espejo. Su cabello puede tener la raya a un lado, o su pierna izquierda puede ser algo más larga que la derecha. Su doble en el espejo, sin embargo, tiene la raya al lado contrario, y su pierna derecha es más larga. Las cosas que permanecen idénticas al intercambiar derecha e izquierda, como, por ejemplo, una esfera, se dice que tienen paridad *par* (o positiva) y las que cambian que tienen paridad *impar* (o negativa). Lo que nos dice el teorema de Noether es que los objetos pares y los impares obedecerían no obstante las mismas leyes de la física en un mundo de detrás del espejo. La ley de conservación asociada nos dice que objetos de paridad positiva no cambian de manera espontánea a objetos de paridad negativa (y viceversa). Si lo hicieran, podríamos usar esta transformación espontánea para definir una derecha o izquierda absolutas.

Las partículas elementales pueden clasificarse por sus propiedades de paridad asociadas por lo general con la manera en que interaccionan con otras partículas. Algunas tienen interacciones de paridad positiva y otras las tienen de paridad negativa. El teorema de Noether nos asegura que una partícula de paridad positiva no puede desintegrarse en una partícula de paridad negativa más una de paridad positiva. Sí puede, sin embargo, desintegrarse en dos partículas de paridad negativa, porque si una de ellas sale hacia la izquierda y la otra hacia la derecha, si la identidad de las partículas también se intercambia bajo ese cambio de paridad a la vez que sus direcciones se invierten como resultado de intercambiar derecha e

izquierda, entonces la configuración saliente parecería idéntica después (esto es, tendría paridad positiva, como tenía la partícula original).

Hasta aquí todo bien. Sin embargo, los físicos descubrieron que la desintegración de los mesones extraños llamados «mesones K» — aquellos cuya larga vida media había explicado Murray Gell-Mann mediante la extrañeza— no obedecían las reglas. Se observó que los kaones —como también se los conoce— se desintegraban en partículas más ligeras llamadas «piones», pero a veces se desintegraban en dos piones y a veces en tres piones. Puesto que los piones tienen paridad negativa, un estado de dos piones tiene propiedades de reflexión diferentes que un estado de tres piones. Pero entonces sería imposible que una partícula de un único tipo se desintegrara en las dos configuraciones diferentes, porque eso significaría que la partícula inicial tendría unas veces paridad positiva y otras veces paridad negativa.

La solución más simple era que deben de existir dos tipos diferentes de kaones, uno con paridad par que se desintegra en dos piones y otro con paridad impar que lo hace en tres piones. El problema era que esos dos tipos de kaones, que los físicos habían apodado «la partícula tau» y «la partícula theta», por lo demás parecían idénticos; tenían la misma masa y la misma vida media. ¿Por qué la naturaleza produciría tales partículas idénticas pero diferentes? Se podrían haber inventado diversas simetrías exóticas que les darían la misma masa, y Gell-Mann y otros habían estado ponderando tales posibilidades, pero producir también la misma vida media



parecía imposible, porque la probabilidad genérica de desintegrarse en tres partículas es mucho menor que la de desintegrarse en dos partículas, siendo igual todo lo demás.

Esta era la situación en la primavera de 1956, cuando Feynman y Gell-Mann empezaron a trabajar juntos en Caltech y ambos asistieron al mayor congreso de física de partículas de esa época, llamado «el congreso de Rochester», que entonces se celebraba en Rochester, Nueva York. Allí se enteraron de nuevos datos determinantes que una vez más implicaban que la tau y la theta parecieran gemelas.

La situación se hizo tan difícil como para justificar que algunos físicos comenzaran a preguntarse en privado si la tau y la theta eran distintas. En el congreso, Feynman compartía habitación con un joven físico experimental, Martin Block. Los registros indican que, en la sesión del sábado, Feynman se levantó y formuló a los expertos una pregunta que atribuyó a Block: quizá las dos partículas podrían ser realmente la misma y las interacciones débiles podrían no respetar la paridad; esto es, la naturaleza podría, en algún nivel, distinguir la derecha de la izquierda.

Se dijo más tarde que Murray Gell-Mann había estado provocando sin piedad a Feynman después por no haber tenido el coraje de formular la pregunta en su propio nombre, así que me dirigí a mi viejo amigo Marty Block y le pregunté qué ocurrió realmente. Este confirmó que le había preguntado a Feynman por qué la paridad no podía ser violada por la interacción débil. Feynman había estado tentado de llamarle «idiota» hasta que se dio cuenta de que no podía

proponer una respuesta, y él y Marty debatieron el *asunto* cada noche durante el congreso hasta que Feynman sugirió que Marty propusiera esa posibilidad en el encuentro. Marty dijo que nadie le escucharía y pidió a Feynman que lo hiciera por él. Feynman pasó la idea a Gell-Mann para ver si este conocía algunas buenas razones para que esto no fuera posible, y no las conocía. Así que Feynman, en su línea, estaba dando crédito a quien había que dárselo, antes que evitar el ridículo por proponer una ultrajante y en potencia evidentemente falsa posibilidad.

La pregunta de Feynman recibió una respuesta por parte de un joven teórico, Chen Ning Yang (Frank), quien, de acuerdo con el informe oficial, contestó que él y su colega Tsung-Dao Lee habían estado estudiando este asunto y no habían llegado a ninguna conclusión. (Block me dijo que el informe era incorrecto, que recordaba que Yang había respondido que no existía ninguna evidencia de tal violación.)

Cuando Feynman y Gell-Mann hubieron discutido la pregunta de Block en el encuentro, se dieron cuenta de que no podían proponer una buena razón empírica de por qué la ruptura de la simetría de paridad en la desintegración débil de los kaones sería imposible. Si la interacción débil violaba la paridad, ¿en qué otro lugar de la física de partículas podría manifestarse esta violación? La misma interacción débil no se entendía bien. Como he mencionado antes, Fermi había propuesto un simple modelo de la desintegración débil prototipo, la desintegración de un neutrón en un protón, llamada «desintegración beta», pero no había aparecido aún ninguna

descripción unificada de las diferentes desintegraciones débiles conocidas.

Precisamente cuando los dos gigantes teóricos Feynman y Gell-Mann meditaban sobre esta extraña posibilidad, y otros físicos en el congreso se sentían lo suficientemente interesados en la cuestión como para hacer apuestas, los dos jóvenes físicos Lee y Yang, ambos antiguos colegas de Chicago de Gell-Mann, tuvieron el valor y la temeridad intelectual de volver a casa y explorar seriamente todos los datos entonces disponibles para ver si se podía descartar la violación de la paridad en la interacción débil. Descubrieron que no existían experimentos que pudieran dar una respuesta definitiva a la cuestión. Y, lo que es más importante, propusieron un experimento que involucraba la interacción débil. Si se violase la paridad y los neutrones se polarizaran de modo que se hiciera rotar sus espines en cierta dirección, entonces la violación de la paridad implicaría que los electrones, uno de los productos de su desintegración, se producirían preferentemente en un hemisferio antes que en el otro. Lee y Yang escribieron un precioso artículo sobre su especulación que fue publicado en junio de 1956.

La posibilidad parecía disparatada, pero merecía la pena intentarlo. Convencieron a su colega de la Universidad de Columbia, Chien-Shiung Wu, una experta en desintegración beta, de renunciar a unas vacaciones por Europa con su marido a fin de llevar a cabo un experimento sobre desintegración de neutrones en cobalto 60. Esta era una época muy distinta a la actual, en la que el tiempo entre propuestas teóricas en física de partículas y su verificación

experimental puede ser de décadas. En seis meses, Wu tenía la evidencia preliminar no solo de que los electrones emergían asimétricamente de su aparato, sino también de que la asimetría parecía tan grande como era físicamente posible.

Esto convenció a otro físico experimental, el futuro premio Nobel León Lederman, a quien Lee había intentado cazar para que realizara un experimento similar en la desintegración del pión, a llevar a cabo el experimento. De nuevo con una velocidad casi inimaginable para los físicos de una generación posterior, Lederman y su colega Richard Garwin reconfiguraron su aparato un viernes, después de una comida de trabajo para discutir la posibilidad del experimento, y el lunes tenían el resultado, un día después de que Wu acabara su experimento. La paridad era en efecto violada al máximo. Dios, parafraseando la analogía del béisbol expresada por el escéptico teórico Wolfgang Pauli, no era un «zurdo débil», sino uno fuerte.

El resultado causó sensación. Que una simetría tan sacrosanta del mundo a nuestro alrededor no se respete a un nivel fundamental por una de las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza produjo un efecto de marea en el mundo de la física, con reverberaciones también en todos los medios de comunicación (Lee y Yang dieron en Columbia una de las primeras conferencias de prensa modernas sobre física para anunciar la confirmación experimental de su propuesta). En uno de los procesos más rápidos de este tipo en la historia de la física, Lee y Yang compartieron el Premio Nobel en 1957 por su sugerencia, hecha justo un año antes.

¿Por qué Feynman no continuó con esta cuestión en el encuentro de Rochester? Una vez más, se había encontrado cerca de la respuesta a una cuestión vital en física pero no se había esforzado en llegar a la conclusión. Esta tendencia tal vez reflejara una característica que volvería a perseguirlo: no deseaba seguir las iniciativas de otros físicos. Si la comunidad tenía fijación en un problema, él deseaba evitarlo y mantener abierta su mente de modo que pudiera resolver enigmas como a él le gustaba hacerlo, del principio al fin. Además detestaba leer el material publicado de física, algo que fue esencial para el trabajo que habían realizado Lee y Yang.

O también podría ser que Feynman tuviera mayores piezas que cobrar, o así lo creyera él. Advertir que las interacciones débiles violan la paridad era una cosa, pero no era lo mismo que ofrecer una nueva teoría de la naturaleza. Eso era algo que Feynman ansiaba hacer. Había creído durante mucho tiempo que su trabajo sobre QED era meramente un artificio técnico, no realmente fundamental, no como la ecuación que su héroe Dirac desarrolló.

Lo que más atraía a Feynman era la posibilidad de construir una teoría que unificara en una sola descripción todos los diferentes fenómenos de la interacción débil observados, que involucraban desintegraciones de partículas de muy diversos tipos, como neutrones, piones y kaones. Fermi había creado un tosco pero bello, aunque *ad hoc*, modelo para la desintegración beta, pero los datos sobre las desintegraciones débiles de otras partículas diversas no eran concluyentes y eludían la unificación. La cuestión básica era

por lo tanto: ¿existía una sola interacción débil unificada que describía todos esos procesos, y, de ser así, cuál era su forma?

La hermana de Feynman, que también era física, le regañaba por su timidez con respecto a la no conservación de la paridad. Ella sabía que solo un poco de trabajo, combinado con la diligencia en escribirlo, habría marcado la diferencia. Le apremió a no ser tan intelectualmente *laissez-faire* con respecto a sus ideas sobre la interacción débil.

En la actualidad, la violación de la simetría de reflexión en la interacción débil se expresa muy fácilmente mediante una simple afirmación: las partículas exóticas llamadas «neutrinos» —los productos de la desintegración beta así bautizados por Fermi, las únicas partículas conocidas que interaccionan solo débilmente—son «zurdos». Como ya he comentado, la mayoría de las partículas poseen momento angular y se comportan como si estuvieran girando. Los objetos que giran en un sentido se observarían girando en el sentido opuesto al verlos reflejados en un espejo. En el resto de las partículas conocidas, su comportamiento es como si giraran o bien en sentido dextrógiro o en sentido levógiro, dependiendo del experimento. Sin embargo, los neutrinos, las escurridizas partículas que interaccionan solo débilmente, violan al máximo la simetría de reflexión, al menos hasta donde sabemos. Solo giran en un sentido (levógiro).

Tsung-Dao Lee aludía realmente a esta implicación cuando describía su trabajo con Yang en el congreso de Rochester de 1957, y ello atrajo la *atención* de *Feynman*. En sus años iniciales, cuando

Feynman trataba al principio de reproducir la ecuación de Dirac con Ted Welton, siendo un estudiante de grado, había errado el tiro, obteniendo una ecuación más simple que no incorporaba propiamente el espín del electrón. La ecuación de Dirac tenía cuatro componentes diferentes, para describir las dos configuraciones de espín distintas de los electrones y las de sus antipartículas los positrones.

Feynman se daba cuenta ahora de que, usando su formalismo de integral de camino, podía obtener de manera natural una ecuación que se parecía a la de Dirac pero que era más simple: tenía solo dos componentes. Esto lo entusiasmó. Advirtió que, si la historia hubiera sido distinta, su ecuación podría haberse descubierto primero, y la ecuación de Dirac deducirse de ella después. Desde luego, su ecuación acababa teniendo las mismas consecuencias que la de Dirac —su ecuación describía un estado de espín del electrón y uno para su antipartícula, y había otra ecuación similar que describía los otros dos estados—, así que no era realmente nueva. Pero sí ofrecía una nueva posibilidad: para los neutrinos, que parecían tener solo un estado de espín, su formalismo sería, creía él, más natural.

Sin embargo, había un problema. Si se intentara incorporar matemáticamente esta clase de ecuación para describir la interacción débil que conducía a la desintegración beta y a la producción de neutrinos, daría resultados diferentes de los que los experimentadores parecían estar descubriendo en sus experimentos. Lo extraño, no obstante, era que estos resultados

experimentales no eran concluyentes y eran inconsistentes con la acción de una sola fuerza. Si se clasificaran todas las formas matemáticas distintas que podían escribirse para las interacciones de un neutrón, protón, electrón y neutrino (los tres últimos productos de la desintegración del primero), se encontrarían cinco posibilidades diferentes: *Escalar (S)*, *Pseudoescalar (P)*, *Vector (V)*, *Vector Axial (A)* y *Tensor (T)*. Este esquema de clasificación matemática describe las propiedades de las interacciones bajo rotaciones y cambios de paridad. Cada interacción tiene propiedades diferentes. El hecho de que la interacción débil viole la paridad quiere decir que se han de combinar al menos dos tipos diferentes de interacciones, cada una de ellas con distintas propiedades de paridad. El problema era que los experimentos de desintegración beta sugerían que la combinación era *S* y *T*, o *V* y *T*, mientras que la imagen de dos componentes de Feynman requería una combinación de *V* y *A*.

Feynman no era el único que pensaba en estas cuestiones. Gell-Mann, que se venía interesando por los asuntos de paridad desde hacía algún tiempo, estaba también ansioso de unificar las diversas desintegraciones débiles, habiendo sido adelantado por Lee y Yang, y quizá más preocupado por eso que Feynman. Mientras Feynman se hallaba de nuevo en Brasil, en sus extravagancias veraniegas, Gell-Mann permanecía en California trabajando.

Pero también había otros, y hay un caso particularmente trágico en el que estuvo involucrado George Sudarshan, un joven físico indio que había llegado a la Universidad de Rochester en 1955 para



trabajar con el físico Robert Marshak. En 1947, Marshak había sugerido que en los experimentos se habían observado dos clases diferentes de mesones: uno, el pión, correspondiente a la partícula de la interacción fuerte que los físicos habían esperado, y otro distinto, el muón, al que ahora se considera simplemente una versión pesada del electrón. Marshak era también bien conocido en la comunidad por ser el organizador de los congresos de Rochester, donde se discutían los problemas del momento en física de partículas, como el problema de la tau-theta y el de la violación de la paridad.

Como estudiante de posgrado, Sudarshan poseía un amplio conocimiento de física nuclear, y en particular de la desintegración beta, y, después del descubrimiento de la violación de la paridad, investigó junto con Marshak los datos experimentales existentes y ambos decidieron que la asignación convencional de  $S$  y  $T$  para la desintegración beta nuclear tenía que estar equivocada. Además, se dieron cuenta de que todas las desintegraciones débiles, incluyendo las de los mesones, podían unificarse solo si la interacción era de la forma  $V-A$ .

Es digno de notar que estaba establecido que Sudarshan presentara estos resultados en el séptimo congreso de Rochester en 1957, en el que Marshak era el moderador. Sin embargo, Marshak decidió que un estudiante de posgrado, Sudarshan, no era un delegado apropiado para el congreso, y puesto que él, Marshak, iba a dar una charla de revisión sobre otro asunto, le pareció que no podía hablar acerca del tema, así que se perdió la oportunidad de anunciar como

primicia a la comunidad la propuesta de los dos. Como los datos referentes a la desintegración del pión en muones, que a su vez seguidamente sufren desintegraciones débiles dando electrones y neutrinos, no eran muy sólidos, Marshak probablemente tuvo dudas de hacer aserciones definitivas en ese momento.

En lugar de ello, Marshak y Sudarshan acabaron ese verano un análisis sistemático de los datos existentes hasta entonces, y prepararon un artículo en el que proponían una forma universal  $V-A$  de la interacción débil, que Marshak presentaría ese otoño en Padua, Italia. Era una aserción valiente, ya que requería nada menos que cuatro resultados experimentales diferentes para estar equivocada. Durante este periodo, Marshak y Sudarshan estaban en California, en UCLA (Universidad de California en Los Angeles), y se dejaron caer en Caltech para hablar con Gell-Mann, que arregló para ellos un encuentro con el físico experimental de ese centro Felix Boehm. Marshak y Sudarshan explicaron a Gell-Mann (que había considerado la forma  $V-A$  pero abandonó la idea porque no estaba de acuerdo con algunos datos) que tenían la impresión de que esos experimentos podrían estar equivocados. Boehm les infundió confianza al explicarles que sus hallazgos experimentales eran ahora consistentes con  $V-A$ .

Gell-Mann, que también se había dado cuenta de que  $V-A$  era la única forma razonable de una interacción débil universal, si realmente existía alguna, le dijo al ansioso dúo de Marshak y Sudarshan que no planeaba escribir un artículo sobre el tema, pero podría mencionar la posibilidad en un párrafo de un largo artículo

de revisión sobre la interacción débil que estaba escribiendo. Gell-Mann se fue inmediatamente después de vacaciones, y Marshak y Sudarshan volvieron a casa.

Entre tanto, Feynman se había obsesionado con la idea de una *interacción* débil universal, tal vez su única esperanza de descubrir una ley fundamental. Sin embargo, el confuso estado de los diversos experimentos seguía siendo un impedimento. Tras volver a Pasadena mientras Gell-Mann estaba de vacaciones, se enteró de que Boehm y Gell-Mann habían estado hablando acerca de la posibilidad de que *V-A* satisficiera después de todo todas las restricciones experimentales.

Entonces fue cuando a Feynman le sonaron las campanas. Si eso era cierto, su idea de describir los neutrinos por dos componentes de una forma matemáticamente simple que podía acomodar la desintegración beta era correcta. Como lo expresó más tarde: «Salté de la silla en ese momento y dije: “Entonces ya lo entiendo todo. Lo entiendo todo y os lo explicaré mañana por la mañana”. Cuando dije eso, ellos creyeron que era una broma. Pero no bromeaba. La liberación de la tiranía de pensar que eran *S y T* era todo lo que necesitaba, porque tenía una teoría en la que si *V* y *A* eran posibles, *V* y *A* eran ciertas, porque era algo pulcro y era bonito». Feynman estaba tan entusiasmado que se auto-convenció de que era la única persona en el mundo que comprendía que *V-A* daría lugar a una forma universal de la interacción débil. Ciertamente, tenía sus propias razones peculiares para pensar así, debido, como era habitual, a su propio y único formalismo. Con una velocidad poco

característica en él, procedió a bosquejar un artículo: su gran esperanza de una nueva teoría de la naturaleza, según creía.

Gell-Mann, entre tanto, regresó a Caltech y se enteró de que Feynman estaba escribiendo su propuesta, mientras que Gell-Mann había tenido sus propias razones para pensar acerca de  $V-A$ , que tenían que ver con las simetrías de las *corrientes*, o el flujo de las cargas que estaban asociadas con las partículas entrantes y salientes de la reacción. Decidió, a pesar de sus garantías a Marshak, que tenía que escribir su propio artículo.

En uno de esos momentos que hacen que la vida de un director de departamento sea poco divertida (momentos que me resultan demasiado familiares a causa de mis doce años en ese puesto), el director del departamento de Física de Caltech decidió que sus dos estrellas no deberían estar interpretando papeles de duelistas, y les dijo que formaran un equipo y escribieran un único artículo. Sorprendentemente, Feynman y Gell-Mann estuvieron de acuerdo.

El artículo Feynman-Gell-Mann era una extraña mezcla de estilos, pero no obstante una pieza maestra. Tenía lo mejor de ambos, el formalismo del neutrino de dos componentes de Feynman (que después resultó útil, aunque entonces parecía algo amañado) y las brillantes ideas de Gell-Mann sobre cantidades conservadas y simetrías asociadas a las corrientes débiles (que serían útiles mucho más allá de la comprensión de la desintegración beta durante los años siguientes).

Huelga decir que la noticia del artículo Feynman-Gell-Mann se difundió rápidamente, y el pobre Sudarshan tuvo que soportar

charla tras charla oyendo atribuir la idea de V-A a esos dos faros guía. Era cierto que Gell-Mann había insistido en agradecer en su artículo las discusiones con Marshak y Sudarshan y siempre trataba de escribir cartas de apoyo a Sudarshan; y Feynman más tarde reconoció a Sudarshan que desde entonces había dicho que este fue el primero que tuvo la idea de V-A, y después lo admitió en público. Pero, durante años, el artículo Feynman-Gell-Mann fue la clásica y única referencia citada al discutir la idea.

Esta podría haber sido la única vez en su carrera en que Feynman se sintió tan motivado y entusiasmado por una idea que deseaba publicar como suya propia. Tenía la impresión de que ese era su momento de máximo orgullo, o como él mismo dijo: «Hubo un momento en que sabía cómo funcionaba la naturaleza. Tenía elegancia y belleza. La condenada cosa brillaba». Y fue un bello trabajo, como podía esperarse de las dos mentes más creativas en la física de partículas de su época. Aunque no de importancia fundamental, ni siquiera del todo sorprendente, y ciertamente no una teoría completa de algo (la teoría completa de la interacción débil tardaría una década en ser escrita y otra década más en ser aceptada), a pesar de la valoración subjetiva de Feynman, para todo el mundo parecía tener importancia que la asociación que había empezado en 1954 cuando Gell-Mann se trasladó a Caltech para estar cerca de Feynman había alcanzado una especie de fruición que prometía grandes cosas en el futuro. La revista *Time* los situó entre los faros guía de la física estadounidense: «En la pizarra los dos estallan con ideas como chispas que saltan de una piedra de

afilar. Alternativamente se palmotean la frente ante las simplificaciones del otro, sutilizan acerca de los detalles de larguísimas ecuaciones, cargan sus baterías creativas lanzando pisapapeles a blancos distantes».

Pero este no era el comienzo de una bonita asociación; era casi el final. Como su colaboración había sido forzada, los dos genios, aunque nunca perdieron su respeto por las capacidades e ideas del otro, realizaron su trabajo futuro en vías paralelas. Seguramente se consultarían entre sí para darse consejos y periódicamente se intercambiarían ideas. Pero nunca más colaborarían para «retorcerle el rabo al cosmos». Gell-Mann iba pronto a hacer su mayor contribución a la física, y Feynman se iba a centrar en otras cosas durante casi una década, volviendo luego a la física de partículas e, irónicamente, ayudando a convencer al mundo de que la invención matemática de Gell-Mann, los quarks, podrían ser auténticamente reales.

## Capítulo 14

### Distracciones y deleites

*El Premio es el placer de descubrir cosas.*

*RICHARD FEYNMAN*

Al fin Feynman había acabado de escribir una idea brillante a su debido tiempo y estaba satisfecho —resultó que equivocadamente— con haber sido finalmente el primero en desvelar al mundo una nueva ley de la naturaleza. Podía ahora deleitarse con el placer de compartir las luces de candilejas con Gell-Mann y estar en el centro del universo de la física.

Con Gell-Mann y Feynman en Caltech, este centro se convirtió en un lugar al que los físicos iban a aprender, colaborar o simplemente exponer sus ideas a la brillantez combinada de las dos mayores mentes en física de su generación. Una serie de fecundos jóvenes físicos estudiarían allí para luego salir en busca de nuevos mundos felices. El mismo Feynman apenas tenía estudiantes de doctorado, pero la atracción combinada de Feynman y Gell-Mann era suficiente para atraer a la institución tanto a estudiantes como a investigadores posdoctorales, entre ellos numerosos futuros premios Nobel.

Algunos estaban sorprendidos por la atención que recibían. Barry C. Barish, entonces un joven experimentador en ciernes de Berkeley y más tarde colega de Feynman en Caltech, dio un seminario allí y se sintió abrumado al ver a Feynman y después al ser acribillado a

preguntas por este. Barish me dijo recientemente cuán auto-satisfecho e importante se sintió en esa ocasión. Esto hasta que otros le dijeron que Feynman asistía a todos los seminarios y estaba lleno de preguntas; no había nada de especial en su visita.

A la vez, el lugar podía resultar intimidante. Gell-Mann podía ser cortante, por lo general en privado. En las raras ocasiones en que valoraba poco el trabajo de alguien, Feynman podía ser abiertamente desdeñoso o incluso peor. No estaba claro lo que le sacaba de sus casillas. Desde luego tenía poca paciencia con los sinsentidos, pero también reaccionaba negativamente a enfoques que eran válidos, quizás incluso brillantes, pero que reflejaban un estilo que no le agradaba. Un ejemplo es la acogida que un joven teórico, Steven Weinberg, recibió cuando fue a Caltech a dar un seminario sobre sus ideas. Weinberg, que después llegaría a ser uno de los físicos más respetados y consumados (y más tarde compartiría el Premio Nobel por presentar una teoría de la interacción débil que la unificaba con el electromagnetismo), buscaba con frecuencia soluciones formales detalladas, trabajando de lo general a lo particular —lo opuesto a como solía trabajar Feynman—. Este físico de tan evidente enjundia fue inquirido de una forma tan despiadada por Feynman y Gell-Mann que casi no pudo acabar su charla.

La cólera de Feynman se restringía normalmente a quienes a él le parecía que estaban abusando de la física haciendo afirmaciones infundadas, por lo general sobre la base de pruebas insuficientes. Para Feynman la física era lo primero, y no importaba quién era el



culpable. Quizás el ejemplo más famoso que conozco personalmente involucra a alguien que más tarde fuera premio Nobel, Fred Reines, quien en 1995 obtuvo el premio por un experimento de 1956 en el que por primera vez se verificaba la existencia de neutrinos. Reines había continuado su trabajo con neutrinos provenientes de reactores nucleares, y mucho más tarde, en 1975, afirmó tener pruebas de que los neutrinos, que aparecen en varios tipos, oscilaban de un tipo a otro cuando viajaban fuera del reactor. De ser cierto, este resultado habría sido enormemente significativo (resulta que los neutrinos sí oscilan, aunque no de la manera que había asegurado Reines). Feynman examinó los datos y demostró que el pretendido efecto no estaba justificado y confrontó públicamente a Reines con sus resultados, mandando a reposar ese falso resultado positivo. Esta molesta situación pudo haber contribuido al retraso de casi cuarenta años en concederle el Premio Nobel a Reines por su descubrimiento original (de 1956).

En cualquier caso, volviendo a 1957, el trabajo de Feynman con Gell-Mann sobre la interacción débil le liberó de una carga que acarreaba durante los años en que su fama en la comunidad había continuado creciendo a pesar de que él permaneciera personalmente escéptico acerca de la relevancia de su trabajo sobre QED. Aunque nunca perdió el interés en la física de partículas, se sintió más libre de deambular por otros derroteros y probar su talento fuera de ese campo.

Al mismo tiempo, su mente vagaba también en otras esferas. Sus relaciones personales se estaban complicando de nuevo. En 1958,

para presentar una exposición general de la física de las interacciones débiles en uno de los primeros congresos Rochester realizados fuera de EE.UU., Feynman había planeado viajar a Ginebra con la esposa de un investigador asociado de Caltech, con la que parece ser que tenía un lío amoroso. Esto sucedía a la vez que otro asunto, también con una mujer casada, estaba llegando a un final dramático, al prepararse el marido a demandarlo por daños y perjuicios. Al final este alboroto se calmó, y la desdeñada amante devolvió a Feynman una medalla de oro que le habían dado como parte del Premio Einstein de 1954 y algunos dibujos de Arline.

En Ginebra, Feynman se encontraba solo, ya que su amante había decidido no pasar por Suiza y verlo en Inglaterra después. Conoció en la playa a una joven inglesa de veinticuatro años, Gweneth Howarth, que estaba viajando por el mundo como chica *au pair* y que por aquel entonces tenía al menos dos novios, así que en este sentido estaban en igualdad de condiciones. Como es lógico, la llevó a un club esa noche, pero la sorpresa fue que la invitó a ir a EE.UU. para trabajar como su sirvienta y se ofreció a ayudarla con los trámites de inmigración. (No se sabe si fue o no a Londres para encontrarse con su otra amante.) Se produjeron, por supuesto, retrasos inevitables, y mientras Feynman seguía lidiando con las consecuencias de su otra amante desdeñada, con quien había considerado el matrimonio, Gweneth se encontraba implicada en varias relaciones románticas y cambiaba periódicamente su intención de ir a EE.UU. Así que, aunque había saltado claramente

una chispa entre ellos, resulta difícil saber exactamente lo que Feynman, o Gweneth, pensaba de todo esto.

Se le hizo ver a Feynman que dadas las circunstancias podría ser inapropiado a lo mejor, o ilegal a lo peor, que un hombre de cuarenta años ayudara a llevar a esa mujer de veinticuatro para vivir bajo su techo, así que su colega, un encantador y liberal físico experimental llamado Matthew Sands, arregló el papeleo en su nombre. Finalmente, después de más de un año de retrasos, Gweneth llegó a Pasadena en el verano de 1959 y ayudó a convertir la casa de este manifiesto soltero solitario en un hogar.

Aunque ella se citaba con otros hombres —si era ostentación o no es difícil de decir—, este comportamiento también fue disminuyendo, y acabó acompañando a Feynman a actos sociales, saliendo a menudo separados para guardar las apariencias. Algo más de un año después de su llegada, Feynman le pidió que se casara con él.

Esta historia parecía el argumento de una película de serie B, no de la vida real, y había buenas razones para sugerir que el comportamiento precipitado de Feynman acabaría en desastre, como tantas otras de sus escapadas románticas. Pero no fue así. Dos años después tuvieron un hijo, Carl, y un perro. La madre de Feynman se fue a vivir cerca de ellos, y él compró una casa cercana a la de su colega y colaborador Gell-Mann y su nueva esposa británica. Gweneth y él adoptaron más tarde a una niña, su hija Michelle, y permanecieron felizmente casados hasta la muerte de Feynman.

La vida personal de Feynman se arregló finalmente —después de todo, habría sido imposible que fuera más agitada de lo que había sido—, pero su mente seguía sin descansar. Consideró el moverse a otro campo y jugó con la genética, inducido por su amigo, el físico convertido en biólogo y futuro premio Nobel Max Delbrück. Pero eso no duró mucho.

Continuaba trabajando con Gell-Mann en la interacción débil y fastidiándolo en los seminarios (aunque el *spatring* quizá se hizo algo más escurridizo con el tiempo), pero no parecía poner el corazón en su trabajo. Ambos habían tenido la idea de que podrían existir dos clases de neutrinos a fin de explicar un intrigante resultado experimental, pero Feynman perdió el interés en ella y rehusó escribirla. Posteriormente, León Lederman, Melvin Schwartz y Jack Steinberger obtuvieron el Premio Nobel por verificar experimentalmente que este era ciertamente el caso. En otro artículo, con Gell-Mann y otros varios colegas, Feynman accedió a colaborar, y después de que la publicación preliminar se distribuyera rogó, con éxito, que se quitara su nombre antes de publicarse.

En 1961 le llegó a Feynman una oportunidad inusual que abrió su energía creativa de una forma totalmente nueva y lo ayudó a catapultarse a un nuevo rango dentro de la comunidad de la física y más allá de ella. No implicaba descubrir una nueva ley de la naturaleza, sino más bien descubrir nuevas formas de enseñar la física.

En Caltech se exigía a los estudiantes de grado que siguieran dos cursos introductorios de física que, como la mayoría de los cursos de ese tipo, producían desilusión, especialmente a los estudiantes más brillantes que se habían emocionado con la física en el instituto y deseaban aprender acerca de la relatividad y las maravillas modernas y no empezar estudiando bolas rodando en planos inclinados. Por instigación de Matthew Sands, quien había discutido la idea con Feynman durante algún tiempo, el departamento de Física, y finalmente el director, Robert Bacher, el mismo que había logrado la unión forzosa de Feynman y Gell-Mann, decidió renovar el curso. De nuevo, tras la sugerencia de Sands, se acordó que Feynman se hiciera cargo de los alumnos de una clase a lo largo de toda la secuencia introductoria. Aunque Feynman no era ampliamente reconocido como docente, sus presentaciones didácticas en Cornell habían sido muy buenas, y era bien conocido en la comunidad como un expositor especialmente dotado cuando se ponía a ello. Su notable energía, sus maneras coloquiales, su intuición física, su acento de Long Island y su brillo inherente le daban un aura resplandeciente sobre cualquier podio.

Feynman asumió el desafío y mucho más. Había dedicado toda su vida a reconstruir en su mente todo el edificio de la ley física. La aventura de la comprensión personal lo había guiado desde su niñez. Ahora tenía una oportunidad de brindar esta imagen a los demás. (He descubierto después, releendo las memorias de Matthew Sands, que este empleó casi los mismos términos para convencer a Feynman de que impartiera ese curso.) Podía poner su

marca distintiva, no solo en la física de vanguardia, sino en las verdaderas ideas básicas que constituyen el centro de nuestro conocimiento físico. Durante los dos años siguientes dedicó más energía y creatividad en desarrollar sus clases que las que había puesto en cualquier otra cosa desde la guerra.

El momento era perfecto. Este gasto de energía era posible entonces porque había remitido su deseo de vagar por ahí. Con la estabilidad de su matrimonio y su vida familiar, era capaz de centrarse menos en sus propias necesidades y deseos, tenía menos motivaciones para buscar aventuras que enmascarasen su soledad y, más importante, podía establecerse en un sitio durante el tiempo necesario para bosquejar una introducción completamente nueva de los fundamentos de la física. Podía mostrar a los demás no solo cómo entendía personalmente el mundo, sino también qué le había apasionado lo suficiente para aprender acerca de él. Podía hacer nuevas conexiones, que es de lo que va la ciencia, al desentrañar los misterios del universo físico. Deseaba llevar rápidamente a los estudiantes a los apasionantes misterios de vanguardia, pero a la vez mostrarles que no eran todos esotéricos, que muchos de ellos estaban conectados a fenómenos reales tan inmediatos como cocer copos de avena o predecir el tiempo o el comportamiento del agua que fluye por una tubería.

Cada día llegaba a clase antes que los estudiantes, preparado para obsequiarlos con una nueva presentación completamente original de cualquier cosa, desde la mecánica clásica al electromagnetismo, pasando por la gravedad, los fluidos, los gases, la química y, al

final, incluso la mecánica cuántica. Andaba de un lado a otro detrás de una enorme mesa y enfrente de una gigantesca pizarra, gritando y haciendo muecas y persuadiendo con halagos y bromeando. Y al final de la clase se aseguraba no solo de que la pizarra estaba completamente llena, sino de que había completado el círculo de ideas que había puesto al principio para discutir en la clase. Y deseaba mostrar a los estudiantes que su falta de conocimiento no tenía por qué comprometer su comprensión; que con trabajo duro incluso estudiantes de primero podían abordar, en todo detalle, algunos fenómenos modernos.

Sobre todo, deseaba presentar una guía para entender o, como casi la llamó, «una guía de perplejos», inspirándose en el título del famoso tratado del filósofo del siglo XII, Moshe Maimónides. Como dijo Feynman:

*Pensé dirigirlas [las lecciones] a los más inteligentes de la clase y asegurarme, si era posible, de que incluso el estudiante más inteligente era incapaz de abarcar por completo todo lo que había en las lecciones, introduciendo sugerencias de aplicaciones de las ideas y conceptos en diversas direcciones fuera de la línea principal de ataque. Por esta razón, sin embargo, me esforzaba mucho en hacer que todas las exposiciones fueran lo más claras posible, en señalar en cada caso dónde las ecuaciones e ideas se ajustaban al cuerpo de la física, y cómo —cuando aprendieran más— las cosas se modificarían. También me parecía que para este tipo de estudiantes es importante indicar qué es lo que deberían —si*

*son suficientemente listos— ser capaces de entender de lo que se ha dicho antes por deducción, y qué es lo que se introduce como algo nuevo.*

En su *entusiasmo también deseaba conectar* la física con el resto de la ciencia, para mostrar que no era una isla aparte. Introdujo la fisiología de la visión en color y las aplicaciones muy de ingeniería mecánica que tanto le interesaban en su época de estudiante; y, desde luego, describió también sus propios descubrimientos.

El departamento se dio cuenta de que estaba sucediendo algo especial, y Feynman recibió gran ayuda y ánimo. Todas las semanas se reunía con los miembros de la facultad que le fueron asignados, bajo la supervisión de Matthew Sands y Robert Leighton, para proyectar sesiones de problemas y clases extra de teoría con el objetivo de ayudar a los alumnos. Puesto que Feynman no seguía ningún libro de texto, era necesario mantener esas reuniones, y los instructores y ayudantes tenían que trabajar todo el tiempo para seguir el curso y desarrollar materiales de enseñanza apropiados a fin de complementarlo.

Pronto, la noticia de lo que estaba pasando en la gran sala de conferencias de Caltech se extendió, y estudiantes de doctorado y profesores empezaron a ir allí poco a poco, mientras los aterrados y anonadados estudiantes de grado dejaron de asistir. Como quizá podría ocurrir únicamente en una escuela como Caltech, el departamento le urgió a continuar con las clases un segundo año, a



pesar de que muchos de los estudiantes no lograron pasar sus exámenes.

Las lecciones se grabaron de modo que Sands y otros colegas, principalmente Leighton, pudieron transcribirlas y editarlas. Al final, un conjunto de tres volúmenes de «libros rojos» apareció a la venta en todo el mundo. Nunca antes en los tiempos modernos alguien había recreado de manera tan comprensible o tan personal desde cero ni reorganizado el conocimiento y la presentación de los principios básicos de la física. Esto se reflejó en el título dado al conjunto de libros: *The Feynman Lectures on Physics*.

Esto es significativo. Atribuyó un estatus único a un solo científico, y no conozco a nadie más, al menos en física, que haya sido considerado para un título así. Feynman estaba en el proceso de convertirse en un icono de la física, y el título daba testimonio no solo de la naturaleza, sino también del lugar especial que Feynman estaba a punto de ocupar en el mundo de la física.

Al final, el curso fue un éxito a medias. Pocos estudiantes, incluso estudiantes de Caltech, pudieron seguir todo el material. Sin embargo, pasado un tiempo, quienes fueron lo suficientemente afortunados de seguir el curso tenían dulces recuerdos de él. Muchos de los antiguos alumnos lo recordaban como la experiencia de su vida, haciéndose eco de las palabras del premio Nobel Douglas Dean Osheroff, que dijo más tarde: «El curso de dos años fue una parte extremadamente importante de mi educación. Aunque no puedo decir que lo entendiera todo, creo que contribuyó mucho a mi intuición física».

Los estudiantes conejillos de indias en Caltech seguramente sufrieron (aunque Sands no estaba de acuerdo con esta idea y sostenía que la mayoría de los estudiantes tenían cierto nivel), pero las *Feynman Lectures* se convirtieron en materia prima para cualquiera que planeara llegar a ser físico. Recuerdo que compré mi propio ejemplar cuando era estudiante de grado y leí de una vez trozos escogidos, preguntándome si llegaría a entender alguna vez todo el material y esperando que uno de mis profesores usara el libro. Quizá para mi suerte ninguno lo hizo. La mayoría de los que lo intentaron encontraron el experimento decepcionante. El material era demasiado exigente para la media de la clase de física, y demasiado revolucionario.

No obstante, los libros siguen a la venta (un conjunto revisado apareció en 2005), y todos los años un nuevo grupo de estudiantes los compra, los abre y empieza a experimentar todo un nuevo mundo.

Sin embargo, desgraciadamente para Feynman, Leighton y Sands, todos los derechos de autor siguen yendo a Caltech (aunque la familia de Feynman demandó después a Caltech por los derechos de una de las lecciones de Feynman que esta institución empaquetó como libro y cinta de audio). Más tarde, Feynman se lamentaba al amigo, físico y autor Philip Morrison, después de que lo llamaran «gigante» de la física: «¿Somos los gigantes de la física, enanos de los negocios?».

La experiencia de dar este curso coincidió con una explosión de actividad popular de Feynman, cuyo estilo carismático empezaba a

propagarse más allá de los confines de la comunidad de la física. Ya en 1958 estuvo de acuerdo con ser asesor de un programa de televisión que producía Warner Brothers, y en una carta respecto a esa producción indicaba su experiencia con la divulgación popular, así como su filosofía: «La idea de que la gente del cine sabe cómo presentar este material, porque son expertos en entretenimiento y los científicos no, es falsa. Ellos no tienen experiencia en explicar ideas, como lo atestiguan todas las películas. Yo soy un exitoso conferenciante de física para públicos populares. El truco real de la comprensión es el estímulo, el drama y el misterio del tema tratado. A la gente le encanta aprender algo, se “entretienen” enormemente si se les permite entender un poco de algo que nunca entendieron antes».

Por esa época también participó en lo que creo fue la primera entrevista televisiva, que se emitió poco antes de que Gweneth llegara a EE.UU. Estaba claramente entusiasmado con salir en televisión, y le aconsejó: «Si vinieras dos semanas antes tendría un montón de trabajo para ti; voy a salir en televisión, en una entrevista con un redactor de noticias el 7 de junio, y puede que haya un montón de cartas que responder». La entrevista fue una pieza maestra, superando de lejos la calidad y profundidad intelectual de las entrevistas que se realizan en la actualidad, pero, como en ella había una franca discusión sobre religión, la emisora decidió emitirla a una hora diferente a la anunciada, de manera que la audiencia televisiva fue menor.

La producción televisiva de la que se había convertido en asesor, llamada *About time* (Acerca del tiempo), fue emitida finalmente por la NBC en 1962. Obtuvo una excelente acogida entre los telespectadores y comenzó a consolidar más las credenciales populares de Feynman. Su destreza como conferenciante para públicos profanos le proporcionó una invitación a dar las prestigiosas Conferencias Messenger en Cornell. Este conjunto de seis conferencias se hizo famoso y fue reproducido en un maravilloso libro titulado *El carácter de la ley física*. (Precisamente el que mi instructor de física de la escuela de verano me había recomendado leer a fin de verme más entusiasmado con la física.) Las conferencias también fueron filmadas, y recientemente Bill Gates compró los derechos a fin de que pudieran estar disponibles en Internet. (Gates dijo que si hubiera tenido acceso a ellas cuando era estudiante, antes de salir de Harvard, su vida habría cambiado.) Estas, más que cualquier otra imagen grabada o documento, reflejan el Feynman real, juguetón, brillante, entusiasmado, carismático, energético y disparatado.

Finalmente, el 21 de octubre de 1965, Feynman fue «canonizado», cimentando para siempre su estatus entre el público científico y el profano: compartió el Premio Nobel de Física de ese año, junto con Sin-Itiro Tomonaga y Julián Schwinger, por su «trabajo fundamental en electrodinámica cuántica con profundas e innovadoras consecuencias para la física de las partículas elementales». Como la de cualquier otro premio Nobel, la vida de Feynman cambió para siempre, y a él le preocupaba este efecto. Aunque hay pocas dudas

de que le gustaba la celebridad, no le agradaba la pompa y circunstancia, y, motivado por la actitud que había recibido de su padre cuando era un niño, desconfiaba verdaderamente de los títulos honoríficos. En él las acciones se correspondían con los pensamientos. De joven había decidido, al graduarse en el MIT, que los grados honorarios eran una tontería; los que estaban siendo honrados con los grados no habían realizado tanto trabajo como él para obtener el suyo. En la década de 1950 había sido elegido miembro de la prestigiosa Academia Nacional de Ciencias, para muchos científicos el mayor reconocimiento que pueden recibir de sus colegas. Al comienzo de 1960, Feynman empezó un largo y complicado proceso para dimitir de la Academia Nacional porque veía cómo el principal propósito de esta era determinar quién podía estar «dentro» y quién no era «merecedor» de ella. (En un famoso episodio años después, Carl Sagan fue rechazado como miembro, muchos creen que, al menos en parte, por sus esfuerzos divulgativos.) Dejó de incluir a la Academia en su lista de honores (por ejemplo, pidió a la gente de la cadena NBC que la quitaran de su resumen biográfico para el programa televisivo de 1962), pero tuvieron que pasar diez años antes de que los funcionarios de la Academia hicieran oficial su dimisión.

Es difícil saber si Feynman iba completamente en serio, pero más tarde escribió que por un momento consideró rechazar el Premio Nobel por las mismas razones: a quién le importaba si alguien de la Academia Sueca había decidido que su trabajo era suficientemente «noble». Como dijo en una famosa frase: «El Premio es el placer de

descubrir cosas». Pero enseguida se dio cuenta de que esto originaría más publicidad que la de recibir el premio y que podría dar la impresión de que pensaba que era «demasiado bueno» para este. Aseguraba que lo que tendría que hacer el Comité Nobel es comunicar sigilosamente su decisión por anticipado a los ganadores del premio y darles un tiempo para que pudieran rechazarlo también sigilosamente. Según Feynman, no era el único que había tenido esta idea. Su ídolo Dirac había sido de la misma opinión.

A pesar de sus recelos, Feynman tenía cierto aprecio por el premio, y, como dijo su antiguo estudiante Albert Hibbs, probablemente se habría sentido peor si no lo hubiera conseguido. También le agradaban la fama y otros reconocimientos que comportaba el premio, en gran parte porque le daban más libertad para hacer lo que quisiera.

Pero, sea como sea, a pesar de su intenso nerviosismo ante la posibilidad de hacerse un lío en la ceremonia oficial, en que debía inclinarse y vestir formalmente, y caminar hacia atrás en presencia del rey de Suecia, Feynman perseveró, asistió a la ceremonia y preparó una hermosa conferencia Nobel contando una historia verdaderamente personal de su viaje para descubrir cómo controlar los infinitos de la QED.

E incluso tan tarde como en 1965, Feynman todavía tenía la impresión de que el programa de renormalización que había liderado era meramente una manera de ocultar los problemas de los infinitos bajo la alfombra, no de curarlos.

Asociada a la concesión del premio estaba la cuestión que surge con frecuencia a causa del testamento del señor Nobel, que parece implicar que solo puede haber un ganador. En este caso estaba claro que Julián Schwinger, Freeman Dyson y Sin-Itiro Tomonaga merecían compartir los tres el premio con Feynman, pero ¿por qué Dyson no lo compartió? El había demostrado hábilmente la equivalencia de los aparentemente diferentes métodos de obtener una forma sensata de la QED, y lo había completado esencialmente proporcionando una guía que enseñaba al resto de los físicos cómo realizar los cálculos apropiados. Dyson, como se recordará, fue en lo esencial quien hizo propaganda de los resultados de Feynman antes de que este escribiera sus artículos, y al final fue quien ayudó a explicar a todo el mundo que los métodos de Feynman no eran *ad hoc*, sino tan bien fundados y mucho más intuitivos físicamente, así como simples computacionalmente, que los demás métodos. Fue entonces Dyson quien había ayudado al resto del mundo a entender la QED, a la vez que a establecer los métodos de Feynman como los únicos que a la larga se enraizarían y desarrollarían.

Si a Dyson le sentó mal no recibir el premio, nunca lo expresó. De hecho, todo lo contrario. Como dijo después: «Feynman realizó los grandes descubrimientos, y yo realmente fui solo el publicista. Fui bien recompensado por mi parte en el negocio: tengo un bonito trabajo aquí en el Instituto (de Princeton), ¡así que no me puedo quejar de nada! No, creo que fue totalmente justo y apropiado. Yo diría que el de Feynman fue uno de los Premios Nobel más merecidos».





## Capítulo 15

### Retorciéndole el rabo al cosmos

*Creo que tengo la idea correcta  
para hacer cosas alocadas...*

*RICHARD FEYNMAN*

Los años que transcurrieron entre 1957 y 1965 representaron un periodo de tránsito en la vida de Richard Feynman. Personalmente, pasó de ser un mujeriego a convertirse en un hombre de familia, de errabundo solitario a marido y padre domesticado (pero nunca dejó de buscar aventuras, aunque ahora con su familia). Profesionalmente, pasó de ser alguien que trabajaba con prisa, esencialmente por su propio placer inmediato, en la frontera de la física, a ser alguien que empezó a devolver al mundo la sabiduría que había alcanzado en sus años dedicados a pensar acerca de la naturaleza (aunque probablemente nunca habría pretendido que lo que él poseía era «sabiduría»).

Entre tanto, Feynman se había convertido en uno de los más conocidos y coloridos profesores de física, y, en parte, en su conciencia. Seguía sumamente alerta, y procuraba, en la medida de sus posibilidades, que sus colegas y el público en general no perdieran la pista de lo que era la ciencia y lo que no lo era, qué entusiasmo podría obtenerse al estudiarla y qué sinsentido podría resultar de interpretar por encima sus señales, sobre afirmaciones infundadas, o simplemente por perder el contacto con ella completamente. Tenía la fuerte impresión de que la ciencia requería

cierta honradez intelectual, y que el mundo sería un lugar mejor si esta se entendiera y practicara.

Esto no pretende sugerir que Feynman hubiera cambiado como persona en algún aspecto fundamental. Seguía intensamente interesado en todos los aspectos de la física y, como acabo de mencionar, continuaba buscando aventuras, solo que de otra clase. Aparte de viajes exóticos con su esposa, se dedicó a dos actividades que podrían calificarse de «sublimación». Una era realizar sus cálculos casi todos los días en un club de *striptease* de Pasadena, donde podía observar a las chicas cuando los cálculos no le salían bien; y la otra implicaba combinar un interés que tenía desde hacía tiempo por el dibujo con otro igual de antiguo por las mujeres que podía dibujar. Realmente llegó a ser bastante hábil en esto, lo que es paradójico, ya que de joven se había mofado de la música y del arte, aunque desde la mediana edad se había dedicado a ambos. Igualmente paradójica era una nueva fascinación, en la década de 1960, de visitar diversos establecimientos *New Age*, como Esalen, donde le divertía tanto el escenario como la oportunidad de aliviar a los participantes de sus creencias en «abracadabrantés» cuentos de hadas, como él decía. Quizá la atracción de los baños desnudos y la fascinación de interaccionar con un tipo de individuo diferente del que era él, pesaba más que su propia falta de tolerancia para los que abusaban de los conceptos de física, como la mecánica cuántica, para justificar su mentalidad de «cualquier cosa vale».

En su vida profesional, mientras crecía su fama, se esforzaba en proteger su tiempo. Deseaba asegurarse de que no se había

convertido en un «gran hombre» en el sentido tradicional, encumbrado por un montón de responsabilidades administrativas, que eludía en todo momento. Incluso apostó con Víctor Weisskopf, cuando visitó el CERN en Ginebra después de recibir el Premio Nobel, que en los siguientes diez años no ocuparía ningún «puesto responsable», esto es, un puesto que «por su naturaleza, obliga al ocupante a dar instrucciones a otras personas, para llevar a cabo ciertos actos, independientemente del hecho de que el ocupante no comprenda en absoluto lo que les está indicando a las mencionadas personas que realicen». No hace falta decir que ganó la apuesta.

Su fama creciente estimuló otra tendencia que le había sido rentable en el pasado, aunque a largo plazo le costara lo que podría haber sido un mayor éxito para continuar liderando el descubrimiento de la nueva física. Llegó a convencerse cada vez más de que, a fin de abrir nuevos caminos, era necesario no tener en cuenta mucho de lo que hacían los demás y, en particular, no centrarse en los «problemas del día a día».

La física es, después de todo, una actividad social humana, y, en cualquier caso, a menudo hay consenso acerca de cuáles son los problemas «calientes» y qué caminos llevan más probablemente a nuevas intuiciones. Algunos consideran este afán de novedad como un problema, como, por ejemplo, la fascinación de una parte importante de la comunidad con los veinte años dedicados a la teoría de cuerdas, un matemáticamente fascinador conjunto de ideas cuya falta de contacto directo con el mundo físico solo ha sido superada por la creciente confusión sobre lo que podría predecir

acerca de la naturaleza. (No obstante, a pesar de esto, la matemática de la teoría de cuerdas ha conducido a unas cuantas pistas interesantes acerca de cómo realizar cálculos e interpretar los resultados de física más convencional.)

Es inevitable que grupos de personas con intereses similares se entusiasmen con cosas similares. Y, a la larga, los caprichos en ciencia no importan, porque, en primer lugar, toda la actividad revela inevitablemente las verrugas así como los lunares más rápidamente de lo que habría sido posible de otro modo; y, en segundo lugar, tan pronto como la naturaleza indique la dirección correcta, los científicos saltarán de un barco hundiéndose más rápido que las ratas en una tempestad.

Para que la ciencia se mantenga sana, es importante que no todos los científicos se suban al mismo vagón, y este es el punto en el que se centró Feynman, casi de manera obsesiva. Tenía tanto talento y era tan versátil que podía, si era necesario, reinventar casi cualquier rueda y por lo general mejorarla en el proceso. Pero, por la misma razón, reinventar la rueda lleva su tiempo y rara vez merece la pena. No era solo que podía tomar este camino; era que con frecuencia sentía que tenía que tomarlo. Esto era a la vez fuerza y debilidad. Realmente no confiaba en ninguna idea hasta que la había desarrollado a partir de primeros principios usando sus propios métodos. Esto significaba que entendía una multitud de conceptos de una manera más profunda y completa que la mayoría de los demás, y que tenía una extraordinaria bolsa de trucos de la que sacaba soluciones mágicas para un montón de problemas diversos.

Sin embargo, esto también significaba que no estaba enterado de brillantes desarrollos de otros, que podrían haber iluminado su propio trabajo de nuevas maneras, llevándole más allá de lo que podía haber llegado por sí mismo.

Como dijo Sidney Coleman, un brillante y extraordinariamente respetado físico de Harvard que había sido estudiante de Gell-Mann en Caltech en la década de 1950 y había interactuado con Feynman a lo largo de su carrera: «Estoy seguro de que Dick lo consideraba una virtud, algo noble. Yo no creo que lo sea. Creo que es un autoengaño. Esos tipos no son todos una colección de yoyós... Conozco personas que son muy originales y nada raras pero que no han hecho tan buena física como podrían haber hecho porque en cierto momento les preocupó más ser originales que estar en lo cierto. Dick pudo conseguir un montón porque era condenadamente listo».

Feynman realmente consiguió muchas cosas. Pero ¿podría haber hecho mucho más si hubiera aceptado de vez en cuando sembrar en terrenos bien arados antes que buscar otros nuevos? Nunca lo sabremos. Sin embargo, una apreciación equilibrada de sus contribuciones a la ciencia desde 1960 en adelante muestra varias tendencias que continuaron repitiéndose. Exploraría una nueva área, desarrollando una serie de técnicas matemáticas e intuiciones físicas muy originales. Estas a la larga contribuirían a desarrollos básicos hechos por otros, que llevarían a una multitud de nuevos descubrimientos y esencialmente guiarían casi todas las áreas de la física teórica y experimental moderna. Esto se extendió desde su

trabajo en física de la materia condensada hasta nuestra comprensión de las interacciones débiles y fuertes, y hasta la base del trabajo actual en gravedad cuántica y computación cuántica. Pero él mismo no hacía los descubrimientos o ganaba premios. En este sentido, continuó haciendo avanzar la física como lo han hecho pocos científicos modernos, abriendo nuevas áreas de estudio, sacando a la luz intuiciones clave y creando interés donde antes no lo había; pero tendía a conducir desde atrás o, como mucho, desde un flanco.

No está claro si esto le habría molestado o no. A pesar de su tendencia natural al espectáculo, como ya he comentado, a la postre le interesaba más estar en lo cierto que ser original, y si su trabajo conducía a otros a descubrir nuevas verdades, él podía permanecer escéptico acerca de sus resultados bastante tiempo, pero en su momento la satisfacción de haber iluminado la oscuridad le producía un placer inmenso. Y concentrándose en problemas difíciles no abordados por la corriente principal de investigación, aumentaba sus oportunidades de proporcionar esa iluminación.

La última incursión de Feynman implicaba su deseo, que comenzó alrededor de 1960, de entender cómo se podría formular una teoría cuántica de la gravedad. Existían buenas razones para su interés. Primero, aunque el desarrollo de dicha teoría estaba muy lejos de todo en lo que había pensado hasta entonces, había tenido éxito en desarrollar una teoría cuántica del electromagnetismo cuando otros no habían superado los obstáculos y pensaba que su experiencia con la QED podría llevar a algo útil. Segundo, la relatividad general

de Einstein había sido considerada durante mucho tiempo el mayor descubrimiento científico desde Newton. Era, después de todo, una teoría científica de la gravedad. Pero cuando se consideraba su comportamiento a pequeñas distancias parecía ser defectuosa. La primera persona que construyera la correspondiente teoría cuántica sería considerada la heredera de Einstein por derecho. Pero quizá lo más atractivo para Feynman residía en que nadie, al menos nadie que fuera importante, estaba pensando acerca de este problema. Como escribió en una carta a su esposa desde un congreso sobre gravedad al que asistió en Varsovia en 1962: «Este no es un campo activo (porque no hay experimentos), así que pocos de los mejores hombres están trabajando en él».

Esto era probablemente algo exagerado, pero, realmente, el estudio de la relatividad general se había convertido en un campo por sí mismo desde el gran descubrimiento de Einstein de sus ecuaciones clásicas de campo en 1915. Como la relatividad general implica que la materia y la energía afectan a la misma naturaleza del espacio, permitiéndole curvarse, expandirse y contraerse, y que esta configuración del espacio afecta después a la evolución posterior de la materia y la energía, que después a su vez tiene su impacto en el espacio, y así sucesivamente, la teoría es matemática y físicamente mucho más complicada de lo que había sido la teoría de la gravedad de Newton.

Se llevó a cabo muchísimo trabajo para encontrar soluciones matemáticas de estas ecuaciones a fin de explicar fenómenos que se extienden desde la dinámica del universo hasta el comportamiento

de los últimos momentos de estrellas cuando acaban de quemar su combustible nuclear. Las ecuaciones eran tan complicadas, y su interpretación física tan confusa, que se requería un tremendo ingenio y una notable pericia matemática, y se puso en marcha una pequeña industria de expertos a fin de investigar nuevas técnicas para tratar estos temas.

Da una idea de lo complicada que era realmente la situación el hecho de que pasaran veinte años y se dieran montones de rodeos por callejones sin salida y errores, incluyendo algunos famosos del mismo Einstein, antes de que los científicos advirtieran que la relatividad general era incompatible con un universo estático y eterno, la imagen del cosmos preferida entonces. A fin de permitir un universo así en el que nuestra galaxia estaba rodeada de espacio estático vacío, Einstein añadió su famosa constante cosmológica (a la cual más tarde calificó como su mayor metedura de pata).

El físico ruso Alexander Friedmann escribió por primera vez las ecuaciones para un universo en expansión en 1924, pero por alguna razón la comunidad de la física las pasó bastante por alto. El sacerdote y físico belga Georges Lemaître redescubrió las ecuaciones por su cuenta y las publicó en una revista poco conocida en 1927. Aunque el trabajo de Lemaître no fue ampliamente difundido, Einstein sin duda tuvo noticia de él y escribió a Lemaître: «Sus cálculos son correctos, pero su física es abominable».

No fue hasta la década de 1930, tras las observaciones de Edwin Hubble de la expansión del universo a través del movimiento de galaxias lejanas, cuando el trabajo de Lemaître se tradujo al inglés y



empezó a tener aceptación general, incluida la de Einstein. En 1931, Lemaître publicó su famoso artículo en *Nature* perfilando su modelo de «átomo primigenio», que llegaría a ser conocido como el «Big Bang». Finalmente, en 1935, Howard Robertson y Arthur Walker probaron rigurosamente que el único espacio uniforme e isotrópico (por entonces se había reconocido que nuestra galaxia no estaba sola en el universo y que el espacio era muy uniforme en todas direcciones con galaxias por todas partes, unos cuatrocientos millones en nuestro universo observable) era el Big Bang en expansión descrito por Friedmann y Lemaître. Después de eso, el Big Bang se convirtió en el modelo cosmológico teórico preferido, aunque realmente pasaron otros treinta años —después de que Feynman comenzara su trabajo— antes de que las firmas físicas reales resultantes de un Big Bang (una gran explosión) se exploraran seriamente, y el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas le dio un estatus inequívocamente observacional.

Mientras que costó dos décadas aclarar las implicaciones cosmológicas de la relatividad general, la situación más familiar de todas las situaciones asociadas con la gravedad, esto es, el colapso gravitacional de una capa esférica de materia, permaneció confusa por mucho más tiempo y todavía hoy no se entiende del todo.

Unos meses después del desarrollo de la relatividad general de Einstein, el físico alemán Karl Schwarzschild escribió la solución exacta que describe la naturaleza del espacio y el campo gravitacional resultante fuera de una distribución esférica de masa. Sin embargo, las ecuaciones daban lugar a resultados infinitos en

un radio finito desde el centro de la distribución. Este radio se llama ahora «radio de Schwarzschild». Por entonces no se entendía lo que significaba este infinito, si era simplemente un artificio matemático o si reflejaba algunos fenómenos físicos nuevos que tienen lugar en esa escala.

El famoso (y luego premio Nobel) físico indio Subrahmanyan Chandrasekhar consideró el colapso de objetos reales, como las estrellas, y arguyó que para estrellas con masa mayor que 1,44 veces la masa solar ninguna fuerza conocida podría parar el colapso hasta ese radio o uno menor. Sin embargo, el famoso astrofísico Arthur Eddington, cuyas observaciones de un eclipse total en 1919 proporcionaron la primera confirmación experimental de la relatividad general (y catapultaron a Einstein a la fama mundial), estaba en violento desacuerdo con ese resultado y lo ridiculizó.

Al final, Robert Oppenheimer demostró que el resultado de Chandrasekhar era correcto tras un ligero refinamiento (aproximadamente tres masas solares o mayor). Pero la cuestión sigue abierta: ¿qué pasa cuando las estrellas colapsan hasta su radio de Schwarzschild? Una de las implicaciones más extrañas de la teoría era que, desde el punto de vista de un observador externo, cuando colapsaran objetos masivos el tiempo parecería hacerse más lento al acercarse al radio de Schwarzschild, de modo que los objetos parecerían «congelarse» en este punto antes de que pudieran colapsar más, lo que da lugar al nombre de «estrellas congeladas» para dichos objetos.

Por estas y otras razones, la mayoría de los físicos creían que el colapso en el interior del radio de Schwarzschild era físicamente imposible, que de alguna manera las leyes de la física lo detendrían antes de que se alcanzara el radio de Karl Schwarzschild. Sin embargo, hacia 1958 los científicos entendieron que los infinitos aparentes asociados con el radio de Schwarzschild eran artificios matemáticos del sistema de coordenadas usado para describir esta solución, y que no sucedería nada no físico cuando un objeto atravesara este radio, llamado ahora «horizonte de sucesos» porque, una vez dentro, un objeto no podría comunicarse con el mundo externo.

Aunque nada incómodo podría suceder en el horizonte de sucesos, en 1963 Roger Penrose demostró que todo lo que cayera a través de dicho horizonte estaría condenado a colapsar hasta una «singularidad» infinitamente densa en el centro del sistema. Los temibles infinitos afloraban de nuevo, ahora no solo en los cálculos de interacciones entre partículas, sino en la misma naturaleza del espacio. Se especuló, aunque no se ha probado, y de hecho se han sugerido algunos contra-ejemplos numéricos tentativos recientemente, que esas singularidades están protegidas de los observadores externos por un horizonte de sucesos y por consiguiente no pueden verse directamente. Si fuera cierto, esto tendría el efecto de barrer bajo la alfombra lo que sucede realmente dentro de un objeto así, pero no resolvería realmente la cuestión física de si dichas singularidades existen.

En 1967, John Wheeler, antiguo supervisor de Feynman, que antes había sostenido muy enérgicamente que el colapso hasta dentro del radio de Schwarzschild sería imposible en un universo razonable, se abrió a esta posibilidad y consagró para siempre dichos objetos colapsados con el seductor nombre de «agujeros negros». Sea o no su nombre lo que ha provocado tanto interés, los agujeros negros permanecen en el centro de todas las controversias modernas relacionadas con la comprensión de la gravedad en pequeñas escalas y campos fuertes.

Estos temas en torno a la interpretación de las soluciones clásicas de las ecuaciones de Einstein y la naturaleza del colapso gravitacional eran el foco de actividad en la comunidad de teóricos que estudiaban la gravedad cuando Feynman empezó a dirigir su atención a este campo. Lo más sorprendente era, quizá, cómo el estudio de la gravedad había evolucionado hasta convertirse en casi un campo de la física separado y aislado. Después de todo, Einstein parecía haber demostrado que la gravedad era completamente diferente a todas las demás fuerzas de la naturaleza; resultaba de la curvatura del mismo espacio, mientras que las otras fuerzas parecían operar de una manera completamente distinta, por ejemplo, basada en el intercambio de partículas moviéndose a través del espacio. Incluso los libros de texto tendían a tratar la relatividad general como un campo completamente independiente que podía ser comprendido aparte de casi todo el resto de la física. Feynman, sin embargo, creía correctamente que tal separación era artificial. En pequeñas escalas reinaba la mecánica cuántica, y, al

final, si se intentara entender la gravedad en esas escalas, habría que usar las herramientas que habían desarrollado Feynman y otros para entender cómo las teorías clásicas como el electromagnetismo —que superficialmente parece similar, al ser una fuerza de largo alcance que disminuye con el cuadrado de la distancia hasta el infinito— podían tener coherencia con la mecánica cuántica. Quizás ni tratar la gravedad como él y otros habían tratado la QED, sería posible conseguir nuevas pistas.

Feynman empezó a pensar seriamente acerca de estos temas a mediados de la década de 1950, poco después de acabar su trabajo sobre QED, y los había discutido con Gell-Mann en la Navidad de 1954, época en que ya había realizado un gran progreso. Sin embargo, no fue hasta 1962-1963 cuando completó y formalizó sus ideas, durante un curso de doctorado de un año que dio en Caltech. Sus lecciones sobre el tema se plasmaron mucho más tarde en un libro, puesto a disposición del público en 1995 y titulado, como era de esperar, *The Feynman Lectures on Gravitation*. Este título era perfectamente adecuado porque impartía su curso de doctorado al mismo tiempo que daba el segundo año de su famoso curso introductorio en el que se basaban las más conocidas *Feynman Lectures*. No es extraño que estuviera agotado al final de ese periodo.

Explicó la motivación de su enfoque en un artículo científico de 1963 que resumía sus resultados y se disculpó por considerar los aspectos cuánticos de la gravedad, que estaban entonces, igual que ahora, lejos de cualquier verificación experimental: «Mi interés en

ello (la teoría cuántica de la gravitación] reside principalmente en la relación de una parte de la naturaleza con otra. Me limito a no discutir las cuestiones de geometría cuántica. No trato de discutir ningún problema que no tengamos ya en la aplicación de la teoría cuántica de campos a otros campos [distintos del gravitacional] ».

Es difícil, en el panorama actual, en el que se ha desarrollado un interés tan grande por unificar las diferentes fuerzas de la naturaleza, darse cuenta de lo revolucionario que era el enfoque de Feynman. La idea de que la gravedad podría no ser tan especial o independiente era casi herética, especialmente para la comunidad cerrada de científicos que la trataban como una joya especial, digna de ser trabajada con herramientas especiales no disponibles para los físicos comunes. Como era de esperar, Feynman tenía poca paciencia con relación a un punto de vista tan decadente que estaba abiertamente en contra de todas sus creencias acerca de la ciencia. Mientras se encontraba en el segundo congreso al que asistió sobre gravedad, en Varsovia (el primero, en Chapel Hill, Carolina del Norte, en 1957, fue presumiblemente más agradable), escribió a Gweneth:

*No estoy sacando nada de este encuentro; hay muchísimos (126) estúpidos aquí (y eso no es bueno para mi tensión arterial). Se dicen y se discuten seriamente cosas necias. Entro en discusiones fuera de las sesiones formales cuando alguien me formula una pregunta o empieza a hablarme de su «trabajo». Este suele ser o bien*

*1. completamente incomprensible; o*

2. *vago e indefinido; o*
3. *algo que es correcto pero obvio y autoevidente, desarrollado a través de un largo y difícil análisis y presentado como un descubrimiento importante; o*
4. *una aseveración, basada en la estupidez del autor, de que alguna cosa correcta y evidente aceptada y comprobada desde hace años es, de hecho, falsa (estos son los peores; no existen argumentos para convencer a un idiota); o*
5. *un intento de hacer algo probablemente imposible, pero ciertamente sin utilidad, que, como se revela finalmente, acaba fallando, o*
6. *simple y llanamente erróneo. Hay un montón de «actividad en el campo» estos días, pero esta «actividad» se limita principalmente a mostrar que la «actividad» previa de algún otro acaba siendo errónea o no era algo útil o prometedor. Recuérdame que no vuelva a ir nunca más a congresos sobre gravedad.*

Feynman empezó argumentando que la gravedad era incluso más débil que el electromagnetismo, y, por tanto, así como se podría tratar de entender la teoría cuántica de este considerando primero la teoría clásica y después añadiendo correcciones cuánticas orden a orden, el mismo procedimiento tendría que funcionar para la gravedad. Por consiguiente, merecía la pena investigar si los infinitos resultantes cuando en electromagnetismo se iba más allá de la aproximación de orden inferior también aparecían en

gravedad, y si se podían eliminar de la misma manera que se había hecho en QED o si aparecerían nuevas complicaciones que podrían proporcionar ideas sobre la misma naturaleza de la gravedad.

En electromagnetismo, las fuerzas resultan de la interacción de las partículas cargadas con campos electromagnéticos, cuyos cuantos se llaman «fotones». Es digno de resaltar que, hasta donde yo sé, Feynman fue el primero en sugerir que la gravedad cuántica podría tratarse igual que cualquier otra teoría cuántica, en particular igual que la teoría cuántica del electromagnetismo, que en la superficie tiene mucha semejanza con la gravedad. Para hacer esto, explotó una notable idea: supongamos que Einstein no hubiera llegado a la relatividad general. ¿Podría alguien, en cambio, haber llegado a las ecuaciones de Einstein pensando solo acerca del límite clásico de partículas cuánticas interaccionando con campos cuánticos? Aunque Feynman no era el primero en explorar esa posibilidad o en llegar a una conclusión positiva a este respecto —de hecho, Steven Weinberg llevó a cabo la investigación más general y poderosa de esta cuestión en 1964, y la elaboró en su excelente texto sobre gravedad y cosmología, en 1972, y de nuevo en un artículo posterior en 1979—, el análisis original de Feynman creó el cuerpo de doctrina para las recientes revalorizaciones de la teoría.

La idea es digna de atención. Olvídense todo acerca de la geometría y las fascinantes ideas sobre el espacio y el tiempo que parecen estar en la base de la relatividad general. Si se considera el intercambio de una partícula sin masa (igual que un fotón es una partícula sin masa que transporta la fuerza electromagnética), entonces, si dicha



partícula sin masa tiene un espín cuantizado 2 en vez de 1 como el fotón, la única teoría auto-consistente que resulta será, en el límite clásico, la relatividad general de Einstein.

Esto es verdaderamente sorprendente porque sugiere que la relatividad general no es tan diferente de las teorías que describen las otras fuerzas en la naturaleza. Puede describirse mediante el intercambio de partículas fundamentales justo como las demás. Todo el equipaje geométrico resulta sin más de este hecho. En realidad, hay sutilezas en la formulación correcta de esta afirmación, procedentes de lo que se entiende por «auto-consistente», pero son solo sutilezas. Y Weinberg, como he indicado, fue capaz de probar una versión más general de este aserto, basándose solamente en las propiedades de las interacciones de partículas de espín 2 sin masa y las simetrías del espacio presentes en la relatividad especial.

Pero, sutilezas aparte, esta nueva imagen de la gravedad y de la relatividad general creaba un nexo entre la relatividad general y el resto de la física que no existía antes. Sugería, como Feynman había esperado, que podían usarse las herramientas de la teoría cuántica de campos no solo para entender la relatividad general, sino también para unificarla con las otras fuerzas existentes en la naturaleza.

En primer lugar, ¿qué son estas partículas de espín 2 sin masa y a qué corresponden en la naturaleza? Bueno, recuérdese que los fotones, los cuantos del campo electromagnético, son precisamente versiones cuantizadas de las ondas electromagnéticas clásicas, las

ondas de los campos eléctrico y magnético que James Clerk Maxwell mostró que surgían al agitarse una carga eléctrica, que es la fuente del campo electromagnético. Con nuestros ojos experimentamos estos campos como luz; con nuestra piel, como calor del Sol; como ondas de radio, con nuestros aparatos de radio, o como microondas, con nuestros teléfonos móviles.

Einstein había mostrado, poco después de desarrollar la relatividad general, que la masa, que es la fuente de la gravedad, podía producir un efecto similar. Si una masa se mueve de forma apropiada, se emitirá un nuevo tipo de onda: una onda gravitacional (o gravitatoria), que es literalmente una onda en la que el espacio se comprime y se expande a lo largo de ella, y que viaja a la velocidad de la luz, igual que lo hacen los fotones. En 1957, cuando Feynman expuso por primera vez sus ideas en un encuentro de física, muchos de los asistentes tenían dudas acerca de la existencia de las ondas gravitatorias. (De hecho, el mismo Einstein había sido disuadido antes por H. P. Robertson de publicar un artículo negando su existencia.) Sin embargo, en 1993 Joseph Taylor y su antiguo estudiante Russell Hulse recibieron el Premio Nobel por demostrar que un par de estrellas de neutrones orbitando una en torno a la otra perdían energía al ritmo predicho por la relatividad general para la emisión de ondas gravitatorias por este sistema. Aunque los científicos deben detectar aún directamente las ondas gravitatorias, como la gravedad es tan débil, se han diseñado grandes experimentos terrestres al efecto y hay proyectos en marcha de construir un detector muy sensible en el espacio.

Las ondas gravitatorias las emiten solo los objetos en los que la distribución de masa no es esféricamente simétrica. Los físicos llaman «radiación *cuadrupolo*» (o *cuadrupolar*) a la clase de radiación emitida por una distribución así. Si se deseara codificar esta clase de anisotropía direccional asociando partículas a las ondas emitidas, estos «cuantos» primarios habrían de tener espín 2, lo cual es precisamente la razón de que Feynman explorara esta opción en primer lugar. El cuanto de las ondas gravitatorias se llama «gravitón», en analogía con «fotón».

Tras demostrar que la gravedad puede resultar simplemente del intercambio de gravitones entre masas, igual que las fuerzas eléctricas y magnéticas resultan del intercambio de fotones entre cargas, Feynman procedió a usar precisamente la clase de análisis que tan bien le había servido con la QED para calcular correcciones cuánticas a los procesos gravitacionales. Sin embargo, el proceso no era simple. La relatividad general es una teoría mucho más compleja que la QED porque así como en esta teoría los fotones interaccionan con cargas, no interactúan directamente entre sí. Sin embargo, como los gravitones interaccionan con *cualquier* distribución de masa o energía, y puesto que transportan energía, estos interaccionan también con otros gravitones. Esta complejidad adicional cambia casi todo, o al menos hace casi todo más difícil de calcular.

Huelga decir que Feynman no llegó a que una teoría cuántica consistente de la gravedad en interacción, con la materia, sin fastidiosos infinitos, pudiera obtenerse simplemente tratando la

gravedad como había tratado la electrodinámica. Aún no existe esa teoría definitiva, aunque se han propuesto candidatas, incluyendo la teoría de cuerdas. No obstante, todo desarrollo importante que ha tenido lugar en los cincuenta y pico años desde que Feynman empezó a trabajar en esta área, lo que implica una línea de científicos que va de Feynman a Stephen Hawking y más allá, pasando por Weinberg, se ha basado en su enfoque y en las herramientas científicas que desarrolló sobre la marcha.

He aquí unos cuantos ejemplos:

**1. Agujeros negros y radiación de Hawking:** Los agujeros negros siguen siendo quizás el mayor desafío teórico para los físicos que tratan de entender la naturaleza de la gravedad, y también han producido las mayores sorpresas. Mientras que en los pasados cuarenta años parece haber habido evidencias de la existencia de objetos masivos tipo agujero negro en el cosmos, desde motores de energéticos cuásares hasta objetos de millones y miles de millones de masas solares en los centros de galaxias, incluyendo la nuestra, la naturaleza detallada del proceso cuántico que opera en las etapas finales del colapso de un agujero negro ha dado lugar a sorpresas y polémicas. La mayor sorpresa surgió en 1972, cuando Stephen Hawking exploró detalladamente los procesos cuánticos que podían ocurrir cerca del horizonte de sucesos del agujero negro, y descubrió que estos procesos causarían que los agujeros negros radiaran energía en forma de partículas elementales de todo tipo, incluyendo gravitones, como si estuvieran calientes, a una temperatura

inversamente proporcional a su masa. La forma de esta radiación térmica sería esencialmente independiente de la identidad de lo que colapsara para formar el agujero negro y causaría que este perdiera masa y quizás acabara evaporándose por completo. Este resultado, que se basa en el tipo de aproximación que usó por primera vez Feynman para explorar la mecánica cuántica de la gravedad —esto es, tomar el espacio de fondo como fijo y aproximadamente plano y considerar los campos cuánticos, incluyendo los gravitones, propagándose en este espacio—, no solo desafió el sentido común del pensamiento clásico, sino que también supuso importantes retos a nuestra comprensión de la mecánica cuántica en presencia de la gravedad. ¿Cuál es la fuente de esta temperatura finita? ¿Qué le sucede a la información que cae en el agujero negro si este acaba desapareciendo al emitir radiación? ¿Qué puede decirse de la singularidad en el centro del agujero negro, donde la teoría cuántica convencional es inaplicable? Estos importantes problemas conceptuales y matemáticos han guiado el trabajo de las mejores mentes en física teórica durante los últimos cuarenta años.

**2. Teoría de cuerdas y más allá:** En un esfuerzo por controlar los infinitos de la gravedad cuántica, los científicos descubrieron en la década de 1960 que, si se considera la mecánica cuántica de un lazo de cuerda vibrante, existe un tipo de vibración que podría describirse apropiadamente como una excitación de masa nula y espín 2. Esto llevó a constatar, usando precisamente los resultados de Feynman descritos anteriormente, que la relatividad *general* de

Einstein podía surgir naturalmente en una teoría cuántica fundamental que incorporase esas excitaciones tipo cuerda. Esta constatación, a su vez, sugirió la posibilidad de que dicha teoría podría ser una verdadera teoría cuántica de la gravedad, en la que todos los infinitos expuestos por Feynman en su investigación de la gravedad como una teoría cuántica de campos podrían ser controlados. En 1984, se propusieron varias teorías de cuerdas candidatas en las que podrían desaparecer tales infinitos, produciéndose la mayor explosión de entusiasmo teórico que había presenciado la física desde quizás el desarrollo de la misma mecánica cuántica.

A pesar de que esta posibilidad era muy excitante, también presentaba una pequeña complicación. A fin de permitir la posibilidad matemática de una teoría auto-consistente de la gravedad cuántica sin infinitos, las excitaciones tipo cuerda subyacentes no pueden existir en solamente cuatro dimensiones. Deben «vibrar» en al menos diez u once dimensiones y cómo podía una teoría así ser consistente con el mundo tetradimensional que experimentamos? ¿Qué sucedería con las seis o siete dimensiones extra? ¿Cómo se podían desarrollar técnicas matemáticas para tratarlas consistentemente y además explorar fenómenos en el mundo que experimentamos? ¿Cómo podían desarrollarse mecanismos físicos para ocultar las dimensiones extra? Por último, y quizá lo más importante, si la gravedad surge naturalmente en estas teorías, en el espíritu de Feynman, ¿podían las otras

partículas y fuerzas que experimentamos aparecer asimismo naturalmente en este marco?

Estos se convirtieron en los temas teóricos básicos que han sido investigados en los últimos veinticinco años, con resultados regulares como mucho. Se han desarrollado fascinantes nuevos teoremas que han proporcionado apasionantes pistas de cómo entender teorías cuánticas aparentemente diferentes como manifestaciones de la misma física subyacente —algo que cae precisamente dentro de lo que Feynman describía como el objetivo central de la ciencia— y se han obtenido interesantes resultados matemáticos que pueden dar ideas sobre cómo los agujeros negros pueden radiar térmicamente, pareciendo perder información, y aun así no violar los credos básicos de la teoría cuántica. Y, finalmente, la teoría de cuerdas, que se basa en un nuevo tipo de diagrama de Feynman para calcular procesos que implican el comportamiento de las cuerdas, ha permitido a los teóricos descubrir nuevas maneras de clasificar los diagramas de Feynman para campos cuánticos normales, así como obtener resultados en forma cerrada para procesos que de otra manera habría implicado sumar un número imposible de diagramas de Feynman si los cálculos se realizaran directamente.

Pero con lo bueno viene lo malo. Mientras se desarrollaba nuestro conocimiento de la teoría de cuerdas, se hizo evidente que esta era mucho más complicada que lo imaginado previamente, y que las mismas cuerdas probablemente no son los objetos clave en la teoría, sino que más bien lo son objetos de más dimensiones llamados

«branas», lo que hace que sea mucho más complicado de obtener la posible extensión de las predicciones de la teoría. Además, mientras que las primeras esperanzas se habían alineado con la posibilidad de que una sola teoría de cuerdas subyacente hiciera predicciones únicas e inequívocas que proporcionarían todos los resultados de física fundamental obtenidos actualmente en los laboratorios, ha ocurrido *precisamente* todo lo contrario. Casi cualquier universo de cuatro dimensiones, con cualquier conjunto de leyes de la física, podía surgir en estas teorías. Si esto sigue siendo verdadero, antes que producir «teorías de todo» (*theories of everything*), podían dar lugar a «teorías de cualquier cosa» (*theories of anything*), las cuales, en el espíritu de Feynman, no serían teorías en absoluto.

De hecho, Feynman vivió lo suficiente para presenciar la mayor revolución de las cuerdas de la década de 1980 y la extravagante propaganda que la acompañaba. Su natural escepticismo acerca de las grandes afirmaciones no fue alterado. Como decía entonces: «Mí impresión ha sido, y podría estar equivocado, que hay más de una manera de desollar a un gato. No creo que haya una sola manera de librarse de los infinitos. El que una teoría elimine los infinitos no es para mí una razón suficiente para creer en su unicidad». También comprendía, como lo explicó claramente al comienzo de su artículo de 1963 sobre este tema, que todo esfuerzo para entender la gravedad cuántica tenía la desventaja de que cualesquiera predicciones, incluso en una teoría que hiciera predicciones claras, podrían estar bien fuera del alcance de la experimentación. La falta de predictividad, combinada con el notable orgullo de los teóricos de



cuerdas, o incluso con una falta manifiesta de evidencia empírica, motivó que dijera, exasperado: «Los teóricos de cuerdas no formulan predicciones, formulan excusas». O, expresando su frustración en términos del otro factor clave que definía según él una teoría científica fructífera:

*No me gusta que no calculen nada. No me gusta que no verifiquen sus ideas. No me gusta que fabriquen una explicación para cada cosa que no está de acuerdo con un experimento, un arreglo para decir: «Bueno, podría ser cierto». Por ejemplo, la teoría requiere diez dimensiones. Bueno, tal vez haya una manera de enrollar seis de las dimensiones. Sí, eso es posible matemáticamente, pero ¿por qué no siete? Cuando escriben su ecuación, esta debería decidir cuántas de estas cosas deberían quedar enrolladas, no el deseo de estar de acuerdo con el experimento. En otras palabras, no hay absolutamente ninguna razón en la teoría de supercuerdas de que no sean ocho de las diez dimensiones las que queden enrolladas y que el resultado sea un espacio-tiempo de dos dimensiones, lo que estaría en completo desacuerdo con el experimento. Así que el hecho de que ella [la teoría de cuerdas] podría estar en desacuerdo con la experiencia es muy tenue, no produce nada; ha de ser excusada la mayor parte del tiempo. No parece cierta.*

Los mismos temas que motivaron las preocupaciones de Feynman, expresados hace más de veinte años, han sido, en cualquier caso, magnificados desde entonces. Desde luego, Feynman se mostraba

escéptico con todas las propuestas nuevas, incluyendo algunas que resultaron ser ciertas. Solo el tiempo, y mucho más trabajo teórico, o algunos resultados experimentales nuevos, determinarán si en este caso su intuición era correcta.

**3. Integrales de camino en gravedad cuántica y «cosmología cuántica»:** La imagen convencional de la mecánica cuántica tiene, como ya he comentado, el problema de que trata el espacio y el tiempo de manera diferente. En ella se define la función de onda en un instante específico y se dan reglas para hacerla evolucionar con el tiempo.

Sin embargo, un precepto básico de la relatividad general es que esa distinción entre espacio y tiempo es, en cierto sentido, arbitraria. Pueden escogerse sistemas de coordenadas diferentes, en los que el espacio de una persona es el tiempo de otra, y los resultados físicos que se obtienen deberían ser independientes de esta separación arbitraria. Este asunto se hace particularmente importante en los casos en que el espacio está fuertemente curvado, esto es, donde el campo gravitacional es fuerte. Con tal de que la gravedad sea tan débil que pueda considerarse aproximadamente el espacio como plano, puede seguirse la prescripción que desarrolló Feynman para tratar la gravedad como una perturbación pequeña, y los efectos gravitacionales como debidos principalmente al intercambio de simples gravitones moviéndose en un espacio fijo de fondo. Pero en el caso en que la gravedad sea fuerte, el espacio y el tiempo se convierten en variables cuánticas difusas, y una separación rígida

en un espacio-tiempo de fondo en el que los fenómenos puedan evolucionar se hace, cuando menos, problemática.

La formulación de integral de camino de la mecánica cuántica no requiere esa separación. Se suma sobre todas las posibilidades para las cantidades físicas relevantes, y sobre todos los caminos sin requerir una separación de espacio y tiempo. Además, en el caso de la gravedad, en que la cantidad relevante implica la geometría del espacio, debe sumarse sobre todas las geometrías posibles. El método de Feynman da una prescripción para hacer esto, pero no está del todo claro que la imagen remanente pueda tratarse con la formulación convencional de la mecánica cuántica.

El método de integral de camino ya ha sido aplicado muy intensamente por Stephen Hawking (y después por Sidney Coleman y otros), para desarrollar una mecánica cuántica del universo, en la que en la integral de camino se suma sobre diversos universos intermedios posibles en los que pueden darse extrañas topologías, que implican universos bebé (*baby universes*) y agujeros de gusano. Este método para tratar cuánticamente el universo en su totalidad se llama «cosmología cuántica», y comporta una multitud de temas nuevos y difíciles, que incluyen cómo interpretar un sistema cuántico sin observadores externos, y sí la dinámica del sistema puede determinar sus propias condiciones iniciales, antes que tenerlas impuestas por un observador externo.

El campo está claramente en pañales, especialmente sin una comprensión precisa de la gravedad cuántica. Pero, como Murray Gell-Mann esperaba fervientemente en un ensayo escrito después de

la muerte de Feynman —sabiendo el gran deseo de este de descubrir leyes nuevas y no meramente reformular las existentes, como se temía que había hecho su enfoque de la QED—, podría ser que el formalismo de integral de camino de Feynman no sea solo una forma diferente de formular la mecánica cuántica, sino más bien la única forma realmente fundamental. En palabras de Gell-Mann: «Así pues, a Richard le hubiera agradado saber que hay algunas indicaciones de que su tesis doctoral puede haber comportado un avance realmente básico en física teórica y no simplemente un desarrollo formal. La formulación de integral de camino de la mecánica cuántica puede ser más fundamental que la convencional, en el sentido de que existe un ámbito crucial en el que puede aplicarse y la formulación convencional puede fracasar. Ese ámbito es la cosmología cuántica. En atención a Richard (y también a Dirac), me agradecería que resultara que el método de la integral de camino es el fundamento real de la mecánica cuántica, y por consiguiente de la teoría física».

**4. Cosmología, planitud y ondas gravitatorias:** He guardado para el final la más concreta, y quizá menos profunda filosóficamente, implicación del trabajo de Feynman, porque permite la posibilidad de cálculos que podrían compararse directamente con los datos experimentales, sin lo cual él consideraba los esfuerzos teóricos impotentes.

Aunque parezca mentira, Feynman realizó su trabajo en una época en que casi todo lo que los científicos saben ahora acerca del

universo en sus mayores escalas aún no se conocía. No obstante, su intuición en bastantes áreas clave era correcta, salvo una excepción, y los experimentos en la vanguardia de la cosmología observacional tal vez pronto proporcionen la primera prueba directa de que su imagen de los gravitones como los cuantos fundamentales del campo gravitacional es correcta.

Feynman se dio cuenta enseguida de la posibilidad de que la energía total de un sistema de partículas fuera exactamente cero. Por extraño que esto parezca, es posible, porque aunque se emplea energía positiva en crear partículas de la nada, su atracción gravitacional neta después puede implicar que tengan una «energía potencial gravitacional» negativa; es decir, que como se necesita hacer trabajo para separarlas a fin de superar su atracción gravitacional, la pérdida neta de energía tras ser creadas y atraerse entre sí podría compensar exactamente la energía que costó crearlas. Como dijo Feynman en sus lecciones sobre gravitación: «Es apasionante pensar que no cuesta *nada* crear una nueva particular. Solo hay que dar un pequeño paso, quizá, para sugerir que la energía total del universo podría ser exactamente cero. Ese universo con energía total nula resulta atractivo porque permite la existencia de un universo que empezó de la nada. Podría considerarse que toda la materia y energía habrían surgido a partir de una fluctuación cuántica (incluyendo una fluctuación gravitacional cuántica del mismo espacio). De igual modo que Feynman especulaba sobre esta posibilidad, el mejor modelo actual de evolución del universo, llamado «inflación», se basa en esta idea.

Alan Guth, creador de la idea de la inflación, ha dicho que en este caso el universo es el ejemplo definitivo de un «almuerzo gratis».

Es interesante que un universo con energía gravitacional total nula sea espacialmente plano, esto es, que en escalas grandes se comporte como un espacio euclídeo normal donde la luz viaja en línea recta. Existe ahora muy buena evidencia de que el universo es plano a partir de medidas directas de su geometría en escalas grandes, uno de los descubrimientos más apasionantes en cosmología en los tiempos recientes. Ya en 1963, sin embargo, Feynman sugirió que este era probablemente el caso, porque el hecho de que existieran galaxias y cúmulos de galaxias ligados gravitacionalmente —los mayores objetos ligados en el universo, con decenas de millones de años luz de extensión— implicaba que la energía positiva de la expansión del universo se compensaba aproximadamente con la energía potencial gravitacional negativa en estos sistemas. Estaba en lo cierto.

Flabía una aplicación, sin embargo, de sus argumentos de teoría cuántica de campos a la gravedad donde parece que se apartó de su sensata intuición física. En su trabajo sobre QED él, y otros, habían mostrado que las partículas virtuales no solo existen, sino que son necesarias para entender las propiedades de los átomos. Por consiguiente, el espacio vacío no está realmente vacío, sino que es una mezcla efervescente de partículas virtuales. Las leyes de la mecánica cuántica nos dicen que cuanto más pequeña sea la escala que se desea considerar, mayor es la energía que pueden tener las partículas virtuales que pueden existir brevemente. Feynman una

vez se refirió a esto diciendo que en el espacio de la palma de una mano existen partículas virtuales con suficiente energía para las necesidades de toda la sociedad civilizada. Desgraciadamente, abogados y cabezas de chorlito han usado esta afirmación para expresar su deseo de desarrollar instrumentos que exploten la energía del vacío para hacer precisamente esto y resolver así nuestros problemas de energía.

Lo que de alguna manera olvidó Feynman, y el físico ruso Yakov Zeldovich aclaró en 1967, es que toda energía gravita, incluso la energía del espacio vacío. Si el espacio vacío tuviera tanta energía como afirmaba Feynman, las fuerzas gravitacionales serían tan grandes que harían estallar la Tierra, ya que, según la relatividad general, cuando la energía se sitúa en el espacio vacío, la fuerza gravitacional resultante es *repulsiva*, no atractiva. Por lo tanto, la energía del espacio vacío no puede ser, en promedio, órdenes de magnitud mayor que la energía de toda la materia, o la fuerza repulsiva resultante sería tan grande que las galaxias nunca se habrían formado.

No obstante, Feynman no estaba completamente equivocado. El descubrimiento más sorprendente de los últimos cincuenta años, o más, ha sido el hallazgo de que el espacio vacío *sí* contiene energía, mucho menos de lo que imaginaba Feynman, pero lo suficiente para que dicha energía domine actualmente la expansión del universo, causando la aceleración de esta. En la actualidad no tenemos ni idea de por qué esto es así, y por qué el espacio vacío tiene energía y en una cantidad tal que es comparable [de hecho, mayor] a la energía

total contenida en todas las galaxias y la materia que hay en el universo. Este es probablemente el mayor misterio de la física, si no de toda la ciencia.

Dejando el error de Feynman aparte, si la idea de inflación —un periodo temprano de expansión exponencial que daría como resultado un universo plano ahora y podría haber originado todas las estructuras observadas en la actualidad— es correcta, entonces hay una apasionante implicación que se hace eco de los cálculos originales de Feynman. Si los gravitones son partículas elementales como los fotones, tras cierto cálculo se puede llegar a que el mismo proceso cuántico que operaba durante la inflación (para finalmente producir fluctuaciones de la densidad de materia que habrían colapsado para formar las galaxias y agregados que vemos en la actualidad) habría originado también un fondo de gravitones en el universo primitivo, que hoy sería observable como un fondo de ondas gravitatorias. Esta es una de las predicciones básicas de la inflación, y un área de la física que he venido investigando personalmente. Lo más apasionante es que pronto seremos capaces de detectar ese fondo con satélites que han sido lanzados para sondear la estructura del universo a gran escala (a distancias muy grandes). Si se observa un fondo así, ello implicará que los cálculos realizados por Feynman, cuando decidió abordar la gravedad como cualquier otra teoría cuántica de campos, dan lugar a una predicción que puede compararse con las observaciones, lo cual significa cuando menos que las disculpas que pidió por considerar



efectos esotéricos e indetectables en gravedad cuántica no eran necesarias.

Es apropiado concluir este capítulo sobre la fascinación de Feynman por la gravedad volviendo una vez más a las disculpas con que empezaba su primer artículo sobre el tema. Feynman se sentía atraído por la gravedad porque estaba fuera del camino transitado. Por la misma razón se dio cuenta de que eso se debía a que los únicos cálculos que podrían realizarse darían como resultado predicciones de efectos no medibles, debido a que la gravedad es muy débil. Y así, cuando empezaba su discusión formal sobre los efectos cuánticos gravitacionales, dio un paso atrás y dijo: «Es, por tanto, evidente que el problema en el que estamos trabajando no es el correcto; el problema correcto es: ¿qué determina el tamaño de la gravitación?».

No podía haberse hecho una afirmación más premonitoria. El auténtico misterio que ha guiado a los físicos teóricos de partículas es la cuestión de por qué la gravedad es cuarenta órdenes de magnitud más débil que el electromagnetismo. Casi todos los esfuerzos actuales hacia la unificación de las fuerzas fundamentales, incluyendo la teoría de cuerdas, se dirigen a abordar esta intrigante y fundamental pregunta acerca del universo. Es probable que los científicos no lleguen a tener una comprensión total y completa de la gravedad y de las otras fuerzas hasta que sean capaces de responder a esta pregunta.

Esto es característico de quizás el aspecto más notable del permanente legado de Feynman. Incluso aunque pudo haber

fracasado en encontrar las respuestas a muchos de los misterios fundamentales de la naturaleza, arrojó inequívocamente luz sobre las auténticas cuestiones que han continuado ocupando la vanguardia de la ciencia hasta el día de hoy.

## Capítulo 16

### De la cima al fondo

*El juego al que juego es muy interesante. Es imaginación, en una camisa de fuerza.*

*RICHARD FEYNMAN*

En diciembre de 1959, Feynman dio una conferencia en la reunión anual de la Sociedad Americana de Física, que ese año se celebraba en Caltech. Una vez más, tenía claramente en mente el deseo de seguir direcciones nuevas y poco frecuentadas, como se ve en la cita con que empezó la conferencia, que ya he usado antes: «Me imagino que los físicos experimentales deben mirar a menudo con envidia a hombres como Kamerlingh Onnes, que descubrió un campo como las bajas temperaturas, que parece no tener fondo y en el que se puede profundizar cada vez más. Un hombre así es entonces un líder y posee cierto monopolio temporal en una aventura científica». La conferencia, publicada al año siguiente en la revista de Caltech *Engineering and Science*, se titulaba: «Al fondo hay mucho sitio». Es una bella y amena discusión sobre un mundo completamente nuevo de posibilidades que no tenía nada que ver con la física de partículas o la gravedad, pero que estaba firmemente basado en fenómenos con aplicaciones directas.

A pesar del esotérico campo de la física de partículas en el que había escogido centrarse, Feynman nunca perdió su interés o su fascinación por la física del mundo que podemos ver y tocar. Así que

la oportunidad de impartir esa conferencia representaba para Feynman una ocasión para dejar vagar su imaginación en un campo que siempre le había fascinado, buscando nuevo forraje para su siguiente aventura científica, en la que podría tener un monopolio. También representaba su fascinación con las notables posibilidades de la física en dos áreas que le habían entusiasmado desde que era niño, pasando por su etapa en Los Alamos: los instrumentos mecánicos y la computación.

La conferencia hizo época y ha sido reimpressa a menudo, porque perfilaba básicamente un campo nuevo de la tecnología y de la ciencia, o más bien un conjunto de campos, relacionado con lo que actualmente se conoce como «nanotecnología» pero no restringido a ese ámbito. El punto central de Feynman era que en 1959, cuando la mayor parte de la gente reflexionaba sobre la miniaturización, lo hacía de una manera demasiado tímida; que existía un vasto espacio entre el tamaño de las máquinas a escala humana y el de los átomos. El imaginaba que la explotación de este espacio podía no solo cambiar la tecnología sino también abrir ámbitos completamente nuevos de investigación que entonces se hallaban fuera del alcance de los científicos. Y estos ámbitos no eran como la gravedad cuántica, sino que podrían ser explotados en esa misma época si la gente pensara seriamente acerca del extraordinario universo que tenía bajo su nariz. En sus propias palabras: «Es un mundo asombrosamente pequeño que está debajo. En el año 2000, cuando vuelvan su mirada a esta época, se preguntarán por qué no

fue hasta 1960 cuando alguien empezó a moverse seriamente en esta dirección».

Feynman empezó su conferencia diciendo que algunos estaban impresionados con una máquina que podía escribir el padrenuestro en la cabeza de un alfiler. Eso no era nada. El tenía pensado escribir primero la *Encyclopaedia Britannica* entera en la cabeza de un alfiler. Pero sostenía que eso no era nada, porque podría hacerse fácilmente con impresión regular simplemente empequeñeciendo el área de cada punto usado en impresión a media tinta en un factor de 25.000. Como decía, incluso entonces cada punto contendría unos 1.000 átomos. Según él, eso no era ningún problema.

Pero incluso eso era poca cosa, sostenía. ¿Y qué tal escribir toda la información contenida en todos los libros del mundo? Llevó a cabo una estimación para hacer eso que es curiosamente similar a la que realicé, en mi libro *The Physics of Star Trek*, cuando traté de considerar cuánta información se requeriría para almacenar una copia digital de alguien para transportarlo. Feynman sostenía que sería fácil almacenar un bit de información (esto es, un 1 o un 0) usando, digamos, un cubo con 5 átomos de lado conteniendo 125 átomos. Estimó también que habría unos  $10^{15}$  bits de información en todos los libros del mundo, que en esos días él estimaba en torno a 24 millones de volúmenes. En ese caso, para almacenar toda la información contenida en todos los libros del mundo se necesitaría simplemente un cubo de materia de menos de dos décimas de centímetro de lado, tan pequeño como la mota de polvo más pequeña visible a simple vista. Ya se ve por dónde va la cosa.

Feynman deseaba investigar las posibilidades de la explotación de la materia a nivel atómico, pues su alcance, como él decía, era casi inconmensurable. Además, leal a «su primer amor» (como la describía en su conferencia del Premio Nobel), lo más apasionante de todo era que, una vez que los científicos empezaran a hacer ingeniería a ese nivel, tendrían que confrontar directamente las realidades de la mecánica cuántica. En vez de construir máquinas clásicas, tendrían que empezar a pensar en máquinas cuánticas. Aquí se abría una vía para fusionar el universo cuántico con el universo de la experiencia humana. ¿Qué podía haber más apasionante?

Me sentí impresionado, al releer su conferencia, por su notable premonición. Muchas de las posibilidades que describía han sucedido desde entonces, aunque no exactamente como imaginaba, en general porque en ese momento no tenía los datos necesarios dentro de su «camisa de fuerza» para usar apropiadamente la imaginación. Una vez más, aunque podría no haber resuelto personal y directamente todos los problemas, formulaba las preguntas adecuadas y discernía los desarrollos que se han convertido en la verdadera vanguardia de la tecnología medio siglo después. Y también imaginaba los principios que podrían formar la base de la tecnología en los cincuenta años siguientes. He aquí unos cuantos ejemplos:

**1. Escribiendo todos los libros de la Tierra en una mota de polvo.** ¿Hasta dónde hemos llegado en lograr poner todos los libros

en una mota de polvo? Cuando yo enseñaba en Yale en 1988, compré el que era entonces el mayor disco duro del departamento de Física. Era de un gigabyte y costó 15.000 dólares. Hoy tengo un «lapicero» de memoria del tamaño de un clip que llevo en un llavero. Tiene 16 gigabytes y me costó 49 dólares. Tengo un disco duro externo portátil de 2 terabytes (o 2.000 gigabytes) para mi ordenador portátil que me costó 150 dólares, así que puedo comprar dos mil veces más memoria con la centésima parte de dinero. La estimación de Feynman de  $10^{15}$  bits para todos los libros del mundo es igual a unos 100 terabytes, o unos cincuenta discos duros portátiles. Por supuesto, la mayor parte del espacio en estos discos no es para almacenaje, sino para el mecanismo de lectura, las interfaces con el ordenador y los suministros de energía. Además, nadie ha hecho ningún esfuerzo para miniaturizar el tamaño de almacenamiento más allá de lo que se ajusta cómodamente a un ordenador portátil. No podemos aún almacenar grandes cantidades de información en escalas de tamaño atómico, pero estamos fuera de ello solo por un factor de alrededor de mil.

En 1965, Gordon Moore, el cofundador de Intel, propuso una «ley» según la cual la capacidad de almacenamiento y la velocidad de computación se duplicarían cada año aproximadamente. Durante los pasados cuarenta años este objetivo se ha cumplido o superado mientras la tecnología ha seguido el ritmo de la demanda. Entonces, dado que  $1.000 = 2^{10}$ , podríamos estar a una década de la meta de Feynman, no solo de escribir sino también de leer todos los libros del mundo en la cabeza de un alfiler.

**2. Biología en la escala atómica.** Como lo expuso Feynman en 1959,

¿Cuáles son los problemas más básicos y fundamentales de la biología hoy en día? Hay preguntas como: ¿cuál es la secuencia de bases en el ADN? ¿Qué sucede cuando se produce una mutación? ¿Cómo está conectado el orden de las bases en el ADN con el orden de los aminoácidos en la proteína? ¿Cuál es la estructura del ARN? ¿Es una cadena simple o doble, y cómo está relacionado su orden en las bases con el ADN? ¿Cuál es la organización de los microsomas? ¿Cómo se sintetizan las proteínas? ¿A dónde va el ARN? ¿Cómo se fija? ¿Dónde se fijan las proteínas? ¿En dónde entran los aminoácidos? En la fotosíntesis, ¿dónde está la clorofila? ¿Cómo se distribuye? ¿Dónde están los carotenos involucrados en esto? ¿Cuál es el sistema de conversión de luz en energía química? Es muy fácil responder a muchas de estas preguntas biológicas fundamentales, ¡basta con mirar!

¿Podía él haber enumerado de una manera más clara y precisa las fronteras de la biología moderna? Al menos se han concedido tres Premios Nobel por investigaciones que hacen posible leer la secuencia de pares de bases moleculares en el ADN esencialmente a nivel atómico. Secuenciar el genoma humano ha sido el santo grial de la biología, y la capacidad de determinar la secuencia genética ha mejorado a un ritmo que supera con mucho la ley de Moore para los ordenadores. Algo que costó más de mil millones de dólares realizar por primera vez, hace menos de diez años, ahora puede hacerse por



unos cuantos miles de dólares, y se espera que en los próximos diez años una persona pueda secuenciar su propio genoma por menos de lo que cuesta una comida en un buen restaurante.

Descifrar moléculas es importante, pero la clave auténtica de los avances en biología es determinar las estructuras moleculares tridimensionales en la escala atómica. La estructura de las proteínas determina la función, y encontrar cómo los componentes atómicos de las proteínas se pliegan para formar un mecanismo funcional es actualmente uno de los temas más candentes de la biología molecular.

Sin embargo, como también anticipó Feynman, la capacidad de sondear sistemas atómicos no es meramente una empresa pasiva. A cierto nivel, si los científicos pueden leer datos, también pueden escribirlos; pueden construir moléculas biológicas desde el principio. Y, si pueden construir moléculas biológicas, pueden a la larga construir sistemas biológicos —esto es, vida— desde el principio. Y si podemos construir esos sistemas y determinar lo que les hace funcionar como funcionan, seremos capaces de diseñar formas de vida que no existen actualmente en la Tierra, tal vez formas de vida que extraigan dióxido de carbono de la atmósfera y fabriquen plástico, o algas que produzcan gasolina. Y si esto parece algo muy lejano, en realidad no lo es. Biólogos como George Church, en Harvard, y Craig Venter, cuya compañía privada colaboró en el primer descifrado del genoma humano, abordan estos desafíos actualmente, y la empresa de Venter recibió recientemente 600

millones de dólares de Exxon para un proyecto de algas para obtener gasolina.

**3. Observando y manipulando átomos individuales:** En 1959, Feynman se lamentaba del triste estado de la microscopía electrónica, que era entonces un campo relativamente nuevo. Como los electrones son pesados (comparados con la luz, que no tiene masa), la onda mecánico-cuántica de los electrones es pequeña. Esto significa que mientras que los microscopios usuales están limitados por la longitud de onda de la luz visible, entre 100 y 1.000 veces el tamaño de los átomos, los electrones pueden manipularse mediante campos magnéticos para producir y magnificar imágenes de objetos mucho más pequeños por los que son dispersados. No obstante, en 1959 la posibilidad de crear imágenes de átomos individuales parecía remota, ya que las energías involucradas sugerían que, a fin de observarlos, estos sistemas habrían de romperse.

¡Cómo han cambiado las cosas! Usando las propiedades de los sistemas mecánico-cuánticos, como Feynman una vez más había anticipado, los nuevos microscopios llamados «microscopios escaneadores de efecto túnel» (*scanning-tunnelling microscopes*) y los microscopios de fuerza atómica permiten obtener imágenes de átomos individuales en moléculas. Además, Feynman predijo: «Los principios de la física, hasta donde alcanzo a ver, no dicen nada en contra de la posibilidad de manipular objetos átomo a átomo. Esto no es un intento de violar ninguna ley. Es algo que, en principio,

puede hacerse. Pero, en la práctica, no se ha hecho porque somos demasiado grandes». Seguramente, las «tenazas atómicas» se han desarrollado en la actualidad usando técnicas similares a las usadas en los nuevos microscopios, y se han creado láseres intensos que permiten manipular y mover regularmente átomos individuales. Una vez más, se han concedido tres Premios Nobel diferentes por este trabajo.

Los científicos pueden ahora no solo resolver átomos individuales en el espacio sino que también pueden hacerlo en el tiempo. La tecnología láser ha permitido la producción de pulsos de láser que duran femtosegundos ( $10^{-15}$  s). Esto es comparable a la escala temporal en la que ocurren las reacciones químicas entre moléculas individuales. Iluminando las moléculas con esos pulsos cortos, los investigadores esperan observar la secuencia de eventos, a nivel atómico, mediante los cuales tienen lugar estas reacciones.

**4. Ingeniería cuántica:** Lo que más le apasionaba a Feynman sobre las máquinas y la tecnología a escala atómica era el darse cuenta de que cuando se trabaja a esas escalas, las extrañas propiedades de la mecánica cuántica se hacen manifiestas. Entendiendo esto, podría esperarse diseñar materiales con propiedades mecánico-cuánticas específicas y a veces exóticas. Una vez más, cito de su artículo:

¿Cuáles serían las propiedades de los materiales si pudiéramos colocar los átomos como deseáramos? Serían muy interesantes de investigar teóricamente. No puedo ver qué sucedería exactamente,

pero apenas puedo dudar de que cuando tengamos algún control de la disposición de cosas en pequeña escala tendremos un abanico mayor de propiedades que pueden tener las sustancias y de cosas diferentes que podemos hacer. Cuando llegamos al mundo muy, muy pequeño —digamos circuitos de siete átomos— tenemos un montón de cosas nuevas que sucederían que representan oportunidades completamente nuevas de diseño [de materiales]. Los átomos en una escala pequeña no tienen parangón en una escala grande, pues siguen las leyes de la mecánica cuántica. Así que, cuando descendemos de escala y jugamos con los átomos, estamos trabajando con leyes distintas, y es de esperar que podamos hacer cosas diferentes. Podemos manufacturar de diferentes maneras. Podemos usar no solo circuitos, sino algún sistema que implique los niveles cuantizados de energía, la interacción de espines cuantizados, etc.

La Sociedad Americana de Física tiene en la actualidad más de cuarenta y cinco mil miembros. De estos físicos profesionales y estudiantes, más de la mitad trabajan en un área llamada «física de la materia condensada», en la que una parte significativa de su esfuerzo se dedica no solo a entender las propiedades electrónicas y mecánicas de los materiales basadas en las leyes de la mecánica cuántica, sino también a fabricar materiales exóticos que harían precisamente lo que Feynman había predicho. Se ha hecho posible una multitud de descubrimientos, que van de los superconductores de alta temperatura a los nanotubos de carbono y a los fenómenos más exóticos, como la resistencia cuantizada y los polímeros

conductores, y no menos de diez Premios Nobel de física se han concedido por investigaciones experimentales y teóricas de las exóticas propiedades cuánticas de estos materiales manufacturados. Igual que el transistor —un instrumento que depende de las leyes de la mecánica cuántica para su funcionamiento y es la base de esencialmente todos los aparatos electrónicos que se usan hoy— transformó completamente el mundo, las tecnologías del mundo del siglo XXI en adelante dependerán indudablemente de la ingeniería cuántica que se desarrolla ahora en laboratorios de investigación de todo el mundo.

Puesto que la excitación intelectual de las posibilidades que Feynman esbozó podría no ser una motivación suficientemente importante, en 1960 decidió financiar personalmente dos premios de 1.000 dólares. El primero iría al «primer individuo que pueda tomar la información de la página de un libro y ponerla en un área  $1/25.000$  en escala lineal de tal manera que pueda ser leída por un microscopio electrónico». El segundo iría al «primer individuo que construya un motor eléctrico operativo, un motor eléctrico rotatorio que pueda ser controlado desde fuera y, sin contar los cables de enchufe, sea de solo  $1/64$  pulgadas cúbicas [aproximadamente  $1/4 \text{ cm}^3$ ]. (Feynman era un hombre de su tiempo, y a pesar de que su hermana era física, para él quienes se dedicaban a la física o la ingeniería eran «individuos».)

A pesar de su previsión, Feynman estaba algo atrasado. Ante su sorpresa (y también disgusto porque no comportaba nueva tecnología), no había pasado todavía un año de la publicación de su

charla cuando un caballero llamado William McLellan se presentó ante su puerta con una caja de madera y un microscopio para ver su pequeño motor y reclamó el segundo premio. Feynman, que no había establecido formalmente la estructura del premio, satisfizo no obstante los 1.000 dólares. Sin embargo, en una carta a McLellan, añadió: «No tengo intención de satisfacer el otro. ¡Desde que escribí el artículo me he casado y he comprado una casa!». No era necesario preocuparse. Transcurrieron veinticinco años antes de que alguien —en este caso, un estudiante de posgrado de la Universidad de Stanford— siguiera con éxito la prescripción de Feynman y reclamara su premio. Por entonces 1.000 dólares no eran una cantidad importante de dinero.

A pesar de estos premios, y su fascinación por las máquinas prácticas (Feynman continuó siendo periódicamente consultor de compañías como Hughes Aircraft a lo largo de toda su vida profesional, incluso en épocas en que dedicaba la mayor parte de sus esfuerzos de investigación a cosas como partículas extrañas y la gravedad), la idea que más le intrigaba en su conferencia de 1959 —la cual era para él esencialmente la razón de abordar estos problemas y la única que continuó realmente considerando profesionalmente después— era la posibilidad de construir un ordenador de una clase totalmente diferente, más rápido y más pequeño.

Feynman había estado largo tiempo fascinado por las computadoras y la computación en general (el científico informático del MIT Marvin Minsky ha dicho, increíblemente, que Feynman le dijo una vez que

siempre estuvo más interesado en la computación que en la física), un interés que tal vez alcanzó su primera cúspide durante sus años en Los Álamos, donde estas actividades eran vitales para el éxito del programa de la bomba atómica. Desarrolló algoritmos totalmente nuevos para realizar rápidamente estimaciones mentales de complicadas cantidades impenetrables de otra manera y para resolver complejas ecuaciones diferenciales. Reconociendo sus capacidades, incluso aunque acabara de salir del curso de posgrado, Hans Bethe le nombró líder del grupo de cálculo, que realizaba cálculos con papel y lápiz primero, después con las lentas máquinas manuales llamadas «calculadoras Marchant», y finalmente con las nuevas máquinas electrónicas (las cuales, se recordará, Feynman y su equipo habían sacado de cajas y ensamblado antes de que lo hicieran los expertos de IBM). El grupo calculaba desde la difusión de neutrones en una bomba, imprescindible para determinar cuánto material se necesitaba para una masa crítica, hasta la simulación del proceso de implosión vital para el éxito de una bomba de plutonio. Feynman había sido bastante sorprendente en todos los aspectos, llegando Bethe, con quien mantenía desafíos aritméticos mentales, a decir que perdería a dos físicos cualesquiera antes que a Feynman.

Bastante antes de la llegada del ordenador electrónico, Feynman colaboró en la creación del que podría llamarse «primer ordenador humano procesando en paralelo», presagiando los futuros procesadores en paralelo a gran escala. Ya había transformado su grupo de difusión en un equipo estrechamente coordinado, así que

cuando un día llegó Bethe y pidió al grupo integrar numéricamente alguna expresión, Feynman anunció: «¡Muy bien, lapiceros, a calcular!», y todos, al unísono, echaron sus lapiceros al aire (un truco que él les había enseñado). Esto era algo más que un mero juego. En la época anterior al ordenador electrónico, había que fragmentar los cálculos complicados a fin de llevarlos a cabo rápidamente. Cada computación individual era demasiado complicada para cualquier persona o para una calculadora Marchant. Pero él organizó un grupo grande, que comprendía sobre todo esposas de científicos de allí; cada persona se ocupaba de una parte simple de un cálculo complejo y luego la pasaba a la siguiente en la fila.

A través de sus experiencias, Feynman llegó a familiarizarse íntimamente con el funcionamiento detallado de un ordenador: cómo fragmentar los problemas de manera que los pudiera resolver un ordenador (convirtiendo a este en una «fila de empleados» eficiente, como él lo llamaba), e incluso, de más interés, determinando qué problemas podían resolverse en una cantidad razonable de tiempo y cuáles no. Rememoraba todo esto al empezar a pensar acerca de su proceso de miniaturización. ¿Cómo de pequeños podrían ser los ordenadores? ¿Qué desafíos hay por delante, y qué ganancias, en gasto de energía y capacidad de computación, si pudieran construirse ordenadores más pequeños, más complejos y con más elementos? Como lo expresó en 1959, comparando su cerebro a los ordenadores entonces existentes:



*El número de elementos en esta caja de huesos mía es enormemente mayor que el número de elementos en nuestros «maravillosos» ordenadores. Pero nuestros ordenadores mecánicos son demasiado grandes; los elementos en esta caja son microscópicos. Deseo hacer algunos que sean submicroscópicos. Si deseáramos construir un ordenador que tuviera todas esas maravillosas cualidades extra, tendríamos que hacerlo, quizá, del tamaño del Pentágono. Esto tiene varias desventajas. Primero, requiere mucho material; puede que no haya suficiente germanio en el mundo para todos los transistores que habría que poner en esa enorme cosa. Existe también el problema de producción de calor y consumo de energía. Pero una dificultad de orden incluso más práctico es que el ordenador estaría limitado a cierta velocidad. A causa de su gran tamaño, se requiere un tiempo finito para llevar la información de un sitio a otro. La información no puede ir más rápidamente que la velocidad de la luz. Así que, al final, cuando nuestros ordenadores sean cada vez más rápidos y más elaborados, tendremos que construirlos cada vez más pequeños.*

Aunque Feynman esbozó en su conferencia de 1959 los desafíos intelectuales y las oportunidades que condujeron a tantos desarrollos futuros, esta última cuestión fue la única a la que volvió seriamente en algún detalle y en direcciones sorprendentes que combinaban algunas de las diferentes posibilidades mencionadas en su charla. Sin embargo, le costó más de veinte años hacer eso. El

motivo de su retorno surgió en parte del interés por su hijo, Carl. A finales de la década de 1970, Carl había ido al colegio universitario, al *alma mater* de Feynman, el MIT, y, felizmente para Feynman, había cambiado su área de estudio de la filosofía a la ciencia informática. Feynman se interesó más en pensar acerca del campo en que trabajaba su hijo. Presentó este al profesor del MIT Marvin Minsky, a quien había conocido en California, y Minsky le presentó a Carl un estudiante de posgrado que vivía en el sótano de su casa llamado Danny Hillis. Hillis tenía la disparatada idea de establecer una compañía para construir un ordenador gigante con un millón de procesadores separados que computarían en paralelo y se comunicarían entre sí a través de un sofisticado sistema de ruta. Carl presentó su padre a Hillis; realmente le sugirió a Hillis que visitara a su padre cuando él, Hillis, estuviera en California. Ante su gran sorpresa, Feynman condujo dos horas para encontrarlo en el aeropuerto a fin de saber más acerca del proyecto, que inmediatamente etiquetó de «estrambótico», queriendo dedicar tiempo a pensar acerca de sus posibilidades y aspectos prácticos. Esta máquina, después de todo, sería la versión electrónica moderna de la computadora humana paralela que había creado en Los Álamos. Esto, unido al hecho de que su hijo estaba implicado, hacía que la oportunidad fuera irresistible.

De hecho, cuando Hillis estableció realmente la compañía Thinking Machines (Máquinas pensantes), Feynman ofreció voluntariamente pasar el verano de 1983 trabajando en Boston (junto a Carl), pero rehusó dar vagos «consejos» generales basados en su experiencia

científica, lo que llamaba «un montón de bobadas pretenciosas», y pidió «algo real que hacer». A la larga obtuvo una solución para cuántos chips necesitaba cada *router* para comunicarse a fin de realizar un cálculo en paralelo con éxito. Lo sorprendente de esta solución era que no la había formulado usando las técnicas tradicionales de la informática, sino más bien ideas de la física, incluyendo la termodinámica y la mecánica estadística. Y, más importante, a pesar de que se mostraba en desacuerdo con las estimaciones de otros ingenieros informáticos de la compañía, resultó que él estaba en lo cierto. (A la vez mostró cómo el ordenador podía ponerse en buen uso para resolver problemas que desafiaban numéricamente a otras máquinas, incluyendo problemas que aparecen al simular configuraciones de sistemas en física de partículas elementales.)

Por entonces, en 1981, empezó también a pensar sobre los fundamentos teóricos de la misma computación, e impartió un curso, conjuntamente con sus colegas de Caltech John Hopfield y Carver Mead, que cubría temas que iban desde el reconocimiento de partones hasta el asunto de la misma computabilidad. El primero era algo que siempre le había fascinado y acerca del cual había formulado algunas estafalarias propuestas impracticables para los ordenadores de ese tiempo. El reconocimiento de partones está aún fuera del alcance de la mayoría de los ordenadores, y esa es la razón de que cuando se desea entrar en algunos sitios web, para distinguir usuarios humanos de virus o piratas informáticos

automatizados se presente una imagen con letras sesgadas y se requiera que se teclee lo que se ve antes de poder seguir.

Fueron esta área, la física de la computación, y el área relacionada, la computación de la física, las que finalmente captaron la atención de Feynman. Escribió una serie de artículos científicos y un libro de notas de lecciones, publicado póstumamente (tras algunas disputas legales sobre su herencia), del curso que impartió sobre este tema a partir de 1983.

Durante algún tiempo se sintió fascinado por la noción de autómatas celulares, que discutió profusamente con el joven «prodigio» de Caltech, Stephen Wolfram, quien luego se haría famoso como creador del paquete de programas Mathematica, que ha revolucionado considerablemente la manera de realizar cálculos numéricos y analíticos en la actualidad. Los autómatas celulares son básicamente un conjunto discreto de objetos en un retículo que pueden programarse para obedecer reglas simples en cada paso del proceso de un ordenador, dependiendo del estado de sus vecinos más cercanos. Incluso reglas muy simples pueden producir patrones increíblemente complicados. Feynman estaba indudablemente interesado en si el mundo real podría funcionar de esta manera, con reglas locales muy básicas en cada punto del espacio-tiempo, produciendo a la larga la complejidad observada en mayores escalas.

Pero no es de extrañar que su atención principal se dirigiera hacia temas de computación y mecánica cuántica. Se preguntaba cómo tendrían que cambiarse los algoritmos para que un ordenador

simulara un sistema mecánico-cuántico en lugar de uno clásico. Después de todo, las reglas físicas fundamentales eran diferentes. El sistema en cuestión necesitaría ser tratado probabilísticamente, y, como había mostrado en su reformulación del mundo cuántico, a fin de seguir de forma apropiada su evolución temporal era necesario calcular las amplitudes de probabilidad (y no las probabilidades) de muchos caminos alternativos simultáneos diferentes. Una vez más, su formulación de la mecánica cuántica demandaba de manera natural un ordenador que pudiera llevar a cabo cálculos distintos en paralelo, combinando los resultados al final del proceso.

Sus fascinantes meditaciones sobre este tema, contenidas en una serie de artículos escritos entre 1981 y 1985, lo llevaron a una nueva dirección que se retrotraía a su propuesta de 1959. En vez de usar un ordenador clásico para simular el mundo cuántico, ¿podría diseñarse un ordenador con elementos tan pequeños que estarían regidos por las leyes de la mecánica cuántica? Y, de ser así, ¿cómo cambiaría esto la forma en que un ordenador podía computar?

El interés de Feynman en esta cuestión procedía claramente de su continuo interés en entender la mecánica cuántica. Podría pensarse que si había alguien que entendiera cómo funcionaba la mecánica cuántica ese era él. Pero en la conferencia y el artículo de 1981 en el que discutió esto por primera vez, hizo una confesión que revela más acerca de su razonamiento para escoger problemas sobre los que pensar —en este caso la mecánica cuántica— que acerca de su propia incomodidad con la mecánica cuántica.

*Inmediatamente podría decir, de modo que sepan adonde intento llegar realmente, que siempre hemos tenido (¡secreto, secreto, cerrad las puertas!), siempre hemos tenido una gran dificultad en entender la visión del mundo que representa la mecánica cuántica. Al menos yo, porque soy lo suficientemente viejo para no haber llegado al punto de que todo esto sea evidente para mí. Pues sí, todavía me pone nervioso. Y, por tanto, algunos de los estudiantes más jóvenes..., ustedes saben cómo sucede siempre con una idea nueva: han de pasar una generación o dos hasta que se hace evidente que no hay ningún problema real. Todavía no se ha hecho evidente para mí que no hay ningún problema real, pero no estoy seguro de que no haya ningún problema real. Eso es por lo que me gusta investigar cosas. ¿Puedo aprender algo al formular esta pregunta sobre ordenadores, sobre este misterio que tal vez lo es o tal vez no, de cuál es la visión del mundo de la mecánica cuántica?*

Para investigar esta cuestión, Feynman consideró si era posible simular exactamente el comportamiento mecánico-cuántico con un sistema clásico de computación que operara precisamente con probabilidades clásicas. La respuesta ha de ser «no». Si fuera sí, esto equivaldría a decir que el mundo cuántico real es matemáticamente equivalente a un mundo clásico en el que no se miden algunas cantidades físicas. En un mundo así se podrían determinar solo los resultados probabilistas de las variables que pudieran medirse, porque no se sabría el valor de esas otras «variables ocultas». En tal

caso, la probabilidad de cualquier suceso observable dependería de una incógnita, el valor de una cantidad no observada. Aunque este mundo imaginario se parece sospechosamente al mundo de la mecánica cuántica (y es el mundo en el que Einstein esperaba que viviéramos; es decir, un sensato mundo clásico donde la extraña naturaleza probabilista de la mecánica cuántica fuese debida solo a nuestra ignorancia de los parámetros físicos fundamentales de la naturaleza), el mundo cuántico es mucho más raro que eso, como demostró en 1964 John Bell en un artículo digno de recordar. Nos guste o no, un mundo cuántico y un mundo clásico no pueden ser jamás equivalentes.

Feynman dedujo un bello ejemplo físico del trabajo de Bell mostrando que si se trataba de simular un ordenador clásico que pudiera producir exactamente las mismas probabilidades que produciría un sistema cuántico para algunas cantidades observables cuando el sistema evoluciona, entonces la probabilidad de alguna otra cantidad observable debería ser negativa. Dichas probabilidades negativas no tienen sentido físico. De un modo muy real, el mundo de las probabilidades cuánticas es mayor que cualquier cosa que pueda encajarse en un mundo puramente clásico.

Además de proporcionar una bonita demostración física de por qué todas las teorías de variables ocultas están condenadas al fracaso, Feynman también hizo una pregunta más interesante en su artículo. ¿Sería posible inventar un ordenador que tuviese naturaleza cuántica? Esto es, si los bits fundamentales del

ordenador fueran objetos cuánticos, como, digamos, el espín de un electrón, ¿podría simularse numéricamente con exactitud el comportamiento de cualquier sistema cuántico y entonces abordar simulaciones cuánticas que no podría realizar ningún ordenador clásico de manera eficiente?

Su respuesta inicial en el artículo de 1982 era un sonoro «probablemente». No obstante, continuó pensando acerca de esta cuestión, incitado por el trabajo de Charles Bennett, un físico de los laboratorios IBM que había demostrado que gran parte del conocimiento convencional sobre la física de la computación era incorrecto. En particular, estaba la suposición de que cada vez que un ordenador realiza una computación tendría que disipar energía en forma de calor (después de todo, cualquiera que haya trabajado con un portátil sabe lo caliente que se pone). Sin embargo, Bennett mostró que es posible, en principio, que el ordenador realice una computación «reversiblemente». En otras palabras, es perfectamente posible realizar dicho cálculo y después realizar exactamente la operación inversa y acabar donde se empezó, sin ninguna pérdida de energía en calor.

Surgió la pregunta: ¿estropearía el mundo cuántico, con todas sus fluctuaciones cuánticas, este resultado? En un artículo de 1985, Feynman demostró que la respuesta era «no». Pero, para hacer esto, tenía que presentar un modelo teórico para un ordenador cuántico universal cuya evolución pudiera controlarse para producir los elementos lógicos necesarios que forman parte de un ordenador universal (esto es, *and* («y»), *not* («no»), *or* («o»), etc.). Desarrolló un



modelo para un ordenador así y describió cómo se podría operar en principio, concluyendo: «En cualquier caso, parece que las leyes de la física no establecen ninguna barrera a la reducción del tamaño de los ordenadores hasta que los bits tengan el tamaño de átomos y el comportamiento cuántico prevalezca».

Aunque la pregunta física general que estaba formulando era bastante académica, Feynman se daba cuenta de que la posibilidad de construir realmente un ordenador que fuera tan pequeño que las leyes de la mecánica cuántica gobernarían el comportamiento de sus elementos individuales tenía interés práctico. Siguiendo su declaración de que el ordenador cuántico que había esbozado teóricamente lo había diseñado para imitar ordenadores clásicos en los que cada operación lógica se hacía secuencialmente, añadió, casi como un desecho: «Lo que puede hacerse, en estos sistemas cuánticos reversibles, para obtener la velocidad asequible mediante operaciones concurrentes no se ha estudiado aquí». La posibilidad sugerida por esta simple línea podría fácilmente cambiar nuestro mundo. Una vez más, Feynman había sugerido una idea que dominaría los desarrollos en todo un campo de investigación durante una generación, aunque él no obtuviera los resultados fundamentales posteriores.

El campo de la computación cuántica se ha convertido en una de las áreas más apasionantes de interés teórico y experimental, precisamente a causa del argumento de Feynman de que los ordenadores clásicos nunca podrían imitar exactamente los sistemas cuánticos. Los sistemas cuánticos son mucho más ricos, y

por tanto es posible que un «ordenador cuántico» pueda ejecutar nuevos tipos de algoritmos computacionales que le permitirían llevar a cabo de manera realista y eficiente un cálculo que al mayor de los ordenadores clásicos actuales le costaría un tiempo mayor que la edad del universo.

La idea clave es realmente la simple característica que Feynman explotó (de manera tan explícita en Los Álamos, y que su formulación de la integral de camino de la mecánica cuántica exhibe tan claramente. Los sistemas cuánticos, por su propia naturaleza, explorarán un número infinito de caminos diferentes a la vez. Si pudiera hacerse que cada camino representara una computación específica, entonces un sistema cuántico podría ser el perfecto procesador en paralelo de la naturaleza.

Considérese el sistema que Feynman discutió primero, una simple partícula cuántica con dos estados de espín, que podríamos etiquetar como «arriba» y «abajo». Si llamamos «1» al estado «arriba» y «0» al estado «abajo», este sistema de espín describe un bit de información típico. Sin embargo, la característica importante de dicho sistema cuántico es que hasta que lo midamos y nos dé el estado arriba o el estado abajo, la mecánica cuántica nos dice que tiene una probabilidad finita de estar en cualquiera de los dos estados, lo que equivale a decir que se halla realmente en ambos estados a la vez. Esto constituye un bit cuántico, o «qubit», como se le conoce ahora, muy diferente del bit clásico. Si encontramos maneras de operar sobre un qubit tal sin realmente medirlo, y por tanto forzarlo a un estado específico, existe la posibilidad de tener

un simple procesador cuántico realizando más de una computación a la vez.

En 1994, Petr Shor, un matemático aplicado de los laboratorios Bell, demostró la fuerza potencial de dicho sistema, y el mundo tomó nota. Shor demostró que un computador cuántico podía resolver eficientemente un problema específico que había resultado imposible que lo resolvieran los ordenadores clásicos en un tiempo menor que prácticamente infinito. El problema se formula sencillamente: todo número puede escribirse de manera única como el producto de números primos. Por ejemplo, 15 es  $3 \times 5$ ; 99 es  $11 \times 3 \times 3$ ; 54 es  $2 \times 3 \times 3 \times 3$ , y así sucesivamente. A medida que los números se hacen cada vez mayores, se hace exponencial mente más difícil determinar su descomposición única. Lo que probó Shor es que puede desarrollarse un algoritmo para que un ordenador cuántico explore el espacio de los factores primos de cualquier número y obtenga la descomposición correcta.

¿Por qué hemos de preocuparnos por este resultado bastante oscuro? Bueno, a los que tengamos dinero en un banco, o usemos tarjetas de crédito para transacciones, o nos interese la seguridad de los códigos empleados para mantener a salvo los secretos nacionales, esto debería importarnos, y mucho. Toda la información importante sobre el actual sistema bancario y la concerniente a la seguridad nacional está codificada usando un simple código que resulta imposible de romper por un ordenador clásico. La codificación se lleva a cabo usando una «clave» basada en el conocimiento de los factores primos de un número muy grande. A

no ser que conozcamos los factores por anticipado, no podemos descifrar el código usando un ordenador normal, porque hacerlo llevaría más tiempo que la edad del universo. Sin embargo, un ordenador cuántico suficientemente «grande» podría hacer el trabajo en un tiempo razonable. Lo que significa «grande» depende de la complejidad del problema, pero sistemas que impliquen unos cientos o miles de qubits llevarían a cabo la tarea fácilmente.

¿Deberíamos apresurarnos a sacar el dinero del banco y esconderlo en un colchón, o correr a nuestro refugio de su pervivencia y esperar la inminente invasión tras el descifrado de nuestros códigos de seguridad nacional? Evidentemente no. En primer lugar, a pesar de los enormes recursos que se dedican a esfuerzos experimentales en marcha, nadie ha sido capaz de construir un ordenador cuántico de más de unos cuantos qubits. La razón es sencilla. Para que el ordenador se comporte cuánticamente, los qubits deben estar cuidadosamente aislados de todas las interacciones exteriores, las cuales borrarían efectivamente toda la información cuántica almacenada en el sistema —la misma razón de que nos comportemos clásicamente y no cuánticamente—. En la mayoría de los sistemas, lo que normalmente se conoce como «coherencia cuántica» —la preservación de la configuración cuántica de los componentes separados del sistema— se destruye en una fracción microscópica de segundo. Mantener los componentes cuánticos funcionando cuánticamente es un importante desafío, y nadie sabe si esto será a la larga práctico en un sentido operativo.

Más importante aún que esta consideración clásica es el hecho de que los mismos principios cuánticos que permiten a un ordenador cuántico obviar las limitaciones clásicas al resolver problemas tales como la descomposición en factores primos también harían posible, en principio, el desarrollo de nuevos algoritmos de «transmisión cuántica» que permiten una transferencia completamente segura de información de punto a punto. Con esto quiero decir que seríamos capaces de determinar con absoluta certeza si un fisgón ha interceptado un mensaje.

La explosión de ideas que ha empujado el nuevo campo de la computación cuántica a partir de un parpadeo de Feynman en 1960 hasta la vanguardia de la ciencia y la tecnología modernas ha sido realmente vasta, demasiado para poder describirla aquí. A la larga estas ideas podrían conducir a cambios en la forma en que están organizadas las sociedades industrializadas modernas. En un sentido práctico, estos desarrollos de la investigación podrían representar algunos de los legados más importantes de Feynman, aunque no viviera lo suficiente para apreciar por completo la significancia de sus sugerencias. Nunca deja de sorprenderme cómo especulaciones aparentemente esotéricas de una mente osada y creativa pueden ayudar a cambiar el mundo.

## Capítulo 17

### Verdad, belleza y libertad

*No me siento asustado por no saber cosas, por estar perdido en un misterioso universo sin propósito alguno, que es como realmente es, hasta donde puedo decir. Posiblemente. Eso no me asusta.*

*RICHARD FEYNMAN*

El 8 de octubre de 1967, el *New York Times Magazine* publicó un reportaje titulado: «Dos hombres en busca del quark». Su autor, Lee Edson, proclamaba: Los hombres responsables en gran parte de enviar a los científicos a esta caza salvaje del quark son dos físicos del Instituto Tecnológico de California (Caltech), llamados Murray Gell-Mann y Richard Feynman. Un científico de California se refiere a los dos hombres como “las propiedades más cotizadas en la física teórica actual”.

En ese momento, la última afirmación estaba justificada. No así la primera. En los seis o siete años previos, tras su trabajo conjunto sobre la interacción débil, Feynman se había separado firmemente de la carrera para encontrarle sentido a la confusión emergente en física de partículas, cuando el zoo creciente de partículas de interacción fuerte producidas en aceleradores parecía diseñado para burlarse de todos los que, como los marineros en la *Odisea*, fueran

atraídos por el canto de la sirena para sencillamente acabar estrellándose contra las rocas. Gell-Mann, por el contrario, había atacado frontalmente la situación, con todas las herramientas a su disposición y a la de sus colegas, y, tras bastantes esfuerzos e intentos fallidos, había llevado finalmente alguna esperanza de claridad al campo.

Feynman resumió la situación en una charla dada en Cornell con motivo de la celebración del sexagésimo cumpleaños de Hans Bethe, repitiendo al principio afirmaciones que hizo en su primer artículo sobre el helio líquido a principios de la década de 1950: «Una de las razones de por qué no he hecho gran cosa con las partículas de interacción fuerte es que creía que no había suficiente información para llegar a tener una buena idea. Mi apreciado colega, el profesor Gell-Mann, está probando constantemente que estoy equivocado. De repente oímos el crepitante ruido de la rotura de la nuez».

Para hacerse una idea de la confusión que reinaba en la física de partículas durante la primera mitad de la década de 1960, basta con reflexionar sobre el mejor enfoque actual para entender la gravedad cuántica y la asociada posible «teoría de todo». Hay muchas ideas pero pocos datos para guiar a los físicos, y cuanto más seguimos las propuestas teóricas, más confusa parece ser la situación. En la década de 1960, ciertamente, las máquinas producían muchos más datos, pero nadie sabía adónde llevaba eso. Si alguien hubiera sugerido en 1965 que en los siguientes diez años se desarrollaría una base teórica casi completa para entender no

solo la interacción débil sino también la fuerte, la mayoría de los físicos se habrían mostrado incrédulos.

Gell-Mann había abierto la nuez con una notable perspicacia. En un momento en que muchos físicos estaban considerando abandonar incluso la posibilidad de desarrollar una comprensión de la física de partículas mediante el uso de las técnicas que habían funcionado tan bien con la QED, Gell-Mann, en 1961, descubrió la importancia de la teoría de grupos, que le proporcionó una herramienta matemática para clasificar la plétora de nuevas partículas elementales de acuerdo con sus propiedades de simetría. Sorprendentemente, todas las diferentes partículas parecían caer dentro de diversos «multipletes», como se los llamó, en los que cada partícula podía ser transformada en otra mediante la aplicación de una transformación de simetría asociada al grupo. Estas simetrías, son como las rotaciones que he descrito anteriormente, las cuales pueden dejar invariantes ciertas figuras, como triángulos y círculos. En el esquema de Gell-Mann (y como descubrieron otros por su cuenta en diversas partes del mundo), las distintas partículas caían dentro de conjuntos de representaciones cuyas propiedades (carga y extrañeza, por ejemplo) podían representarse gráficamente de modo que formaran los vértices de un poliedro,<sup>10</sup> y todas las partículas de cada poliedro podían transformarse entonces una en otra mediante simetrías, las cuales podían efectivamente rotar el poliedro en diferentes direcciones.

---

<sup>10</sup> Realmente no de un poliedro, sino de un polígono (de alguna manera, un poliedro bidimensional). (N. del t.)



El grupo que Feynman descubrió que podía clasificar las partículas de interacción fuerte se etiquetó como «SU(3)». Tenía básicamente ocho rotaciones internas distintas que podían conectar las partículas en diferentes multipletes tipo poliedro de diversos tamaños, aunque la representación más evidente tenía ocho miembros. De esta forma pudo clasificar casi todas las partículas de interacción fuerte conocidas. Exultante ante el éxito de su esquema de clasificación (aunque él y el resto de la comunidad se hallaban lejos de estar convencidos de que era correcto, basándose en la evidencia entonces a mano), lo llamó el «camino óctuple», no por la propiedad numérica del SU(3), sino, de una manera típica en Gell-Mann, por el dicho de Buda sobre los ocho caminos para alcanzar el nirvana: «Esta, oh monjes, es la verdad noble que conduce al cese del dolor. Este es el noble camino óctuple: visión correcta, intención correcta, habla correcta, acción correcta, vida correcta, esfuerzo correcto, atención correcta, concentración correcta».

Cuando Gell-Mann y el físico israelí Yuval Ne'eman clasificaron así las partículas, quedaban nueve sin poderse clasificar de esta manera. Sin embargo, se sabía que había una representación de diez miembros del grupo de simetría SU(3) —un llamado «decúplete»— que ambos indicaron que podría ser una elección apropiada, lo que sugería la necesidad de otra partícula aún no descubierta. Gell-Mann se apresuro a anunciar que dicha partícula, a la que llamó «omega-menos», debía existir, y señaló, usando argumentos de simetría, cuáles deberían ser sus propiedades esperadas de modo que los experimentadores pudieran buscarla.

Sin necesidad de decirlo, en una búsqueda con todo el drama de un guión de película, justo cuando los experimentadores estaban a punto de abandonar, encontraron la partícula de Gell-Mann, precisamente con las propiedades que este había anticipado, incluyendo su extrañeza, y una masa dentro del 1 % de error de su predicción. El camino óctuple no solo había sobrevivido, ¡había florecido!

El día después del descubrimiento experimental de la omega-menos, al final de enero de 1964, apareció un artículo de Gell-Mann en la revista europea de física *Physics Letters*. Había decidido que su atrevida especulación y aún otra nueva gema lingüística harían que los estridentes árbitros de la revista estadounidense *Physical Review* no lo dejaran jamás pasar.

Gell-Mann, y también otros, no había pasado por alto que el 3 en SU(3) podría tener alguna relevancia física. Los multipletes de ocho elementos en SU(3) podían ser formados, de hecho, mediante combinaciones apropiadas de tres copias de una representación más pequeña del grupo de simetría, llamada «representación fundamental», que contiene tres elementos. ¿Podría ser que estos tres elementos correspondieran, de alguna manera, a partículas elementales?

El problema era que si las partículas de interacción fuerte como los protones estuvieran hechas de tres subconstituyentes, estos tendrían, generalmente, por comparación, una carga eléctrica fraccionaria. Sin embargo, uno de los hitos de la física era que todas las partículas observadas tenían cargas eléctricas que eran

múltiplos enteros de la carga del electrón o del protón (que tienen cargas de igual magnitud y signos opuestos). Nadie sabía por qué esto era así, y hasta cierto punto aún no lo sabemos. Pero esto era lo que la naturaleza parecía requerir.

No obstante, tras un año más o menos de discusión trepidante, estimulado por el descubrimiento de una frase maravillosa en la obra de James Joyce *Finnegan's Wake* (El despertar de Finnegan) — «*Three quarks for Muster Mark*»—, Gell-Mann escribió un corto artículo de dos páginas proponiendo que el camino óctuple como un esquema de clasificación fundamental de todas las partículas de interacción fuerte tenía sentido matemático si los constituyentes básicos de este esquema fueran tres objetos distintos cargados fraccionariamente, a los que denominó «quarks».

Gell-Mann era cauto al proponer la existencia de un nuevo conjunto de partículas exóticas y potencialmente ridículas, y, además, por entonces el conocimiento convencional en la comunidad científica se había inclinado hacia la idea de que el mismo concepto de partícula elemental podría estar mal concebido, y que todas las llamadas «partículas elementales» podrían estar realmente constituidas de combinaciones de otras partículas elementales, en lo que se llamó una especie de «democracia nuclear». Por tanto, Gell-Mann era cuidadoso al sostener que estos objetos, que él llamó «quarks», *up* («arriba»), *down* («abajo») y *strange* («extraño»), podrían ser solo sutilezas matemáticas que permitían hacer las cuentas de manera eficiente.

Sorprendentemente, un antiguo estudiante de Feynman en Caltech, George Zweig, que en ese momento era un investigador posdoctoral en el CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, hizo una propuesta exactamente igual, presentada con mucho más detalle y casi a la vez. Además, Zweig estaba mucho más dispuesto a sugerir que estos nuevos objetos cargados fraccionariamente, que él llamó «ases», podrían ser reales. Cuando vio impreso el corto artículo de Gell-Mann, trató rápidamente de publicar su artículo de ochenta páginas en la revista *Physical Review*. Pero Gell-Mann había sido más sabio, y Zweig no pudo ver jamás publicado su artículo en esa revista tan seria.

Sin necesidad de decirlo, con la increíble línea de éxitos de Gell-Mann, de  $V-A$  a la omega-menos, era inevitable que los quarks vencieran a los ases. Esto no significa, sin embargo, que la comunidad de físicos reaccionara con entusiasmo a la propuesta de Gell-Mann. En lugar de ello, la recibió con todo el entusiasmo de un embarazo no deseado. Después de todo, ¿dónde se encontraban las partículas cargadas fraccionariamente? Se realizaron búsquedas en todas partes, desde los datos de aceleradores hasta el interior de ostras, sin éxito. Y, por lo tanto, incluso después de que el *The New York Times* hubiera canonizado los quarks en su artículo de 1976, se citó a Gell-Mann diciendo que el quark probablemente resultaría ser meramente «una invención matemática útil».

Así que fue en 1967 cuando Feynman decidió finalmente volver a su primer amor, la física de partículas, para ver qué problemas interesantes podía atacar. A pesar de expresar palabras elogiosas

sobre Gell-Mann por el artículo del *The New York Times*, no había mostrado mucho entusiasmo por el trabajo de este en los últimos cinco años para hacer avanzar su campo. Se había mostrado muy escéptico con el descubrimiento de la omega-menos, y los quarks le habían parecido poco interesantes, tan poco interesantes que cuando su antiguo estudiante Zweig había propuesto los ases, Feynman tampoco había demostrado ningún entusiasmo por esa iflea. Encontraba el esfuerzo de los teóricos para encontrar confort en la teoría de grupos demasiado parecido a una muletilla que sustituía a la comprensión real. Describía cómo los físicos se repetían usando el lenguaje de las matemáticas como «simple lenguaje de bebés, como una metedura de pata».

Aunque podría sospecharse que las reacciones de Feynman estaban teñidas de envidia, es más probable que su natural escepticismo se combinara con su esencial desinterés por lo que pensaban otros teóricos. Desde hacía tiempo se había mantenido fiel a la idea de que los datos sobre la interacción fuerte eran demasiado confusos para permitir una explicación teórica productiva, y había pasado por alto todas las novedades teóricas fallidas de la década de 1960, incluyendo la idea de la democracia nuclear y su oposición a las partículas fundamentales. Su dicha era resolver problemas, y resolverlos por sí mismo. Como dijo por entonces, siguiendo una recomendación, «no hagas caso», que se hizo a sí mismo después de obtener el Premio Nobel: «Yo tengo que explicar solo las regularidades de la naturaleza, no los métodos de mis amigos». No obstante, una vez más había empezado a impartir un curso de física

de partículas, y eso significaba estar al día en el campo. Para Feynman, eso significaba estar al día en las minucias de los datos experimentales.

Resultó ser el momento apropiado para hacerlo. Se había construido un nuevo acelerador en el norte de California, cerca de Stanford, y por tanto no demasiado lejos de Caltech (en Pasadena). Este nuevo acelerador estaba basado en una técnica diferente para explorar partículas de interacción fuerte. En vez de hacer chocar estas partículas una contra otra y ver lo que sucedía, la máquina SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center*), como se la llegó a conocer, aceleraba electrones en un conducto de más de tres kilómetros de longitud y los hacía colisionar con núcleos. Como los electrones no sienten la interacción fuerte, los científicos podían interpretar sus colisiones más fácilmente, sin las incertidumbres de dicha interacción. De esta manera, esperaban sondear el núcleo como Ernest Rutherford había hecho setenta y cinco años antes, cuando descubrió la existencia del núcleo lanzando partículas alfa sobre átomos. En el verano de 1968, Feynman decidió visitar el SLAC, durante un viaje para ver a su hermana, y descubrir por sí mismo lo que estaba sucediendo.

Feynman había estado ya pensando en cómo dar sentido a los datos experimentales sobre las partículas de interacción fuerte, y yo supongo que estaba influido por su trabajo con el helio líquido. Recuérdese que había tratado de entender cómo un sistema denso de electrones y átomos en un líquido podía comportarse a bajas temperaturas como si los átomos no interaccionaran entre sí.

Un comportamiento algo similar lo habían sugerido los resultados de experimentos anteriores sobre la complicada dispersión de partículas de interacción fuerte por partículas análogas. A pesar de sus dudas en explicar los datos con alguna teoría fundamental, o tal vez a causa de ello, Feynman se dio cuenta de que podía explicar algunas características generales sin necesidad de recurrir a ningún modelo teórico detallado específico. Una de las implicaciones de los resultados experimentales era que las colisiones tenían lugar mayormente en la escala de las partículas involucradas, como los protones, y no en escalas menores. Razonó que si los nucleones tenían constituyentes internos, estos no podían interactuar fuertemente entre sí, o eso se habría manifestado en los datos. Por consiguiente, podía escogerse representar las partículas de interacción fuerte, o «hadrones», como se las llamaba, mediante un modelo de juguete: una caja llena de constituyentes, que llamó «parlones», que no interactuaban fuertemente en pequeñas escalas pero estaban de alguna manera forzados a permanecer dentro de los hadrones.

La idea era lo que llamamos «fenomenológica»; esto es, era justo una manera de dar sentido a los datos, para ver si se los podía escudriñar con el ánimo de hallar regularidades en todo aquel follón, a fin de obtener algunas pistas de la física subyacente, igual que había hecho la imagen de Feynman del helio líquido. Desde luego, Feynman estaba al tanto de los quarks de Gell-Mann y de los ases de Zweig, pero no trataba de producir una comprensión global fundamental de los hadrones. Sencillamente deseaba entender

cómo extraer información útil de los experimentos, así que no hizo ningún intento de conectar su imagen de patrones a esas partículas (quarks y ases).

Feynman reconocía las limitaciones de su imagen y su distinción de la construcción normal de modelos. Como dijo en su primer artículo sobre el tema: «Estas sugerencias surgieron en estudios teóricos desde varias direcciones y no representan el resultado de considerar algún modelo. Son una extracción de esas características que la relatividad y la mecánica cuántica y algunos hechos empíricos implican casi independientemente de cualquier modelo».

En cualquier caso, la imagen de Feynman le permitió considerar un proceso que la mayoría de los físicos, que trataban de explicar los datos con algún modelo fundamental, había evitado. Estos otros se habían centrado en la posibilidad más simple, en la que dos partículas entraban en una zona de colisión y dos partículas salían de ella. Feynman, sin embargo, se dio cuenta de que su simple imagen le permitiría investigar procesos más complicados. En estos procesos, si los experimentadores lanzaran los hadrones con suficiente energía frontalmente uno contra otro de modo que se produjeran un montón de partículas, podrían esperar medir las energías y los momentos de al menos unas cuantas de las partículas salientes. Se podría pensar que en este caso no obtendrían mucha información útil. Pero Feynman arguyó, motivado por su imagen de partones, que podría merecer la pena considerar realmente estos procesos, que él llamó «procesos inclusivos».



Feynman se dio cuenta de que, a energías muy altas, los efectos relativistas causarían que cada partícula, en el sistema de referencia de la otra partícula, pareciera una torta, porque las longitudes a lo largo de la dirección de movimiento se contraen. Además, los efectos de dilatación temporal significarían que los movimientos oblicuos de los partones en la torta parecerían frenarse hasta el reposo. Por consiguiente, cada hadrón parecería, a los demás hadrones, como una colección de partículas puntuales en reposo dentro de una torta. Entonces, suponiendo que la colisión posterior implicara la colisión de solo uno de los partones de cada torta, con el resto pasando simplemente unos a través de otros, los físicos podrían dar sentido a procesos inclusivos en los que solo se mide detalladamente una de las partículas salientes en la colisión mientras que del resto solo se registran algunas características generales de su distribución. Feynman sugirió que si esta imagen de la colisión fuera correcta, ciertas cantidades medidas, como el momento de la partícula saliente medido en la dirección del haz entrante, deberían tener una distribución simple.

Se atribuye a Louis Pasteur el dicho: «La fortuna favorece a las mentes preparadas». La mente de Feynman estaba bien preparada cuando visitó el SLAC en 1968. Allí los experimentadores habían estado analizando los datos que tenían, los primeros en dispersión de electrones de alta energía por blancos de protones, produciendo una enorme espuma de materia saliente, siguiendo la sugerencia de un joven teórico local, James Bjorken, conocido por todo el mundo como B. J. Bjorken había mostrado en 1967 que si los

experimentadores midieran meramente las propiedades de los electrones salientes en estas colisiones, encontrarían regularidades en su distribución que serían muy distintas si el protón estuviera impuesto de constituyentes puntuales que si no fuera así. Llamó a estas regularidades «propiedades de escalamiento» (*scaling properties*).

Aunque los participantes en el experimento del SLAC no entendían realmente la justificación detallada de la hipótesis de escalamiento de Bjorken, las sugerencias de este proporcionaban una forma útil de analizar los datos, así que lo hicieron. Y, oh maravilla, los datos concordaban con las predicciones de Bjorken. Sin embargo, eso no garantizaba que su sugerencia algo oscura fuera correcta. Quizás otros mecanismos podrían producir los mismos efectos.

Cuando Feynman visitó el SLAC, Bjorken estaba fuera de la ciudad, y Feynman habló directamente con los experimentadores, quienes, huelga decirlo, le proporcionaron un conocimiento mejor de los resultados que por qué o cómo los había deducido Bjorken. Habiendo ya pensado acerca de las más complicadas colisiones hadrón-hadrón, Feynman advirtió que las colisiones electrón-protón podrían ser más fáciles de interpretar y el escalamiento observado podría tener una explicación física simple en términos de partones.

Esa tarde tuvo una revelación después de ir a un bar de *topless* para motivarse (aún hay cierta discusión sobre esto), y de vuelta en su habitación del hotel pudo demostrar que el escalamiento tenía realmente una explicación física simple: en el sistema de referencia en el que el protón se asemejaba a una torta para los electrones

incidentes, si estos rebotaban en partones individuales, cada uno de los cuales era esencialmente independiente, entonces la función de escalamiento que había deducido Bjorken podía entenderse simplemente como la probabilidad de encontrar un partón con un momento dado dentro del protón, promediada por el cuadrado de la carga eléctrica de dicho partón.

Esta era una explicación que podían entender los experimentadores, y cuando Bjorken regresó al SLAC de escalar montañas, Feynman estaba aún allí y lo buscó para hacerle un montón de preguntas sobre lo que este sabía y no sabía. Bjorken recuerda vivamente el lenguaje que empleaba Feynman y lo diferente que era de la manera en que él había considerado las cosas. Como dijo después: «Era un lenguaje fácil y seductor que podía entender todo el mundo. Al vagón del modelo de partones no le llevó ningún tiempo empezar a rodar».

Huelga decir que Feynman estaba a la vez satisfecho y estremecido por la capacidad de su simple descripción de explicar los nuevos datos. Bjorken y él se dieron cuenta de que podían realizarse otros sondeos de protones, para obtener información complementaria de su estructura, usando partículas incidentes que interaccionan con los partones no electromagnéticamente, sino por la interacción débil: los neutrinos. Feynman estaba de nuevo en el centro de la actividad en el campo, y cuando publicó su primer artículo sobre la idea, varios años después, el análisis de la «dispersión profundamente inelástica», como se la llegó a llamar, era donde se centraba toda la acción.

Por supuesto, la pregunta básica era entonces: ¿los partones eran reales? Y, en caso afirmativo, ¿los quarks eran partones? Feynman reconocía que la primera pregunta era difícil de responder completamente, dada la extrema simplicidad de su modelo y la gran probabilidad de que los fenómenos físicos reales pudieran ser más complicados. Años después, en un libro sobre el tema, expresó explícitamente sus inquietudes: «Debería observarse que incluso si nuestra casa de naipes sobrevive y prueba ser correcta, no hemos demostrado por ello la existencia de los partones. Los partones serían una útil guía psicológica en cuanto a qué relaciones hay que esperar; y si continúan sirviendo de esta manera para producir otros pronósticos válidos empezaría desde luego a hacerse “reales”, posiblemente tan reales como cualquier otra estructura teórica inventada para describir la naturaleza».

En cuanto a la segunda pregunta, la dificultad era doble. En primer lugar, en un clima en el que el sesgo teórico era en general contra las partículas fundamentales, pasó algún tiempo antes de que la gente estuviera seriamente dispuesta a considerarla. Y, en segundo lugar, incluso si los partones representaran quarks, ¿por qué no eran estos emitidos como partículas libres en las colisiones de alta energía, para que todos los vieran?

Con el tiempo, sin embargo, usando el formalismo desarrollado por Feynman, los físicos pudieron extraer las propiedades de los partones de los datos y, ¡quién lo iba a decir!, las cargas fraccionarias de estos objetos se hicieron manifiestas. Fiada los primeros años de la década de 1970, Feynman se había convencido

de que los partones eran los hipotéticos quarks de Gell-Mann (y los ases de Zweig), aunque continuaba hablando en el lenguaje de los partones (quizá para fastidiar a Gell-Mann). Por su parte, Gell-Mann desvió las críticas por no haber estado demasiado dispuesto a creer en la realidad de los quarks burlándose de la descripción simplificada de Feynman. A la larga, puesto que los quarks proceden de un modelo fundamental, el mundo físico se movió de la descripción del protón en términos de partones a la descripción en términos de quarks.

Pero ¿dónde se encontraban los quarks? ¿Por qué se ocultaban en el interior de los protones y no se encontraban buscando en ningún otro lugar? Y ¿por qué se comportaban como partículas libres dentro del protón cuando la interacción fuerte que regía las colisiones de protones entre sí, y por tanto las de quarks entre sí, era la fuerza más intensa conocida en la naturaleza?

Sorprendentemente, en un periodo de cinco años no solo se habían respondido en lo esencial estas preguntas acerca de la interacción fuerte, sino que además los teóricos habían conseguido un conocimiento fundamental acerca de la naturaleza de la interacción débil. Una década después de que hubiera empezado el lío, se entendían esencialmente tres de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas en la naturaleza. Tal vez lo más importante, y a pesar de ello probablemente lo menos anunciado en público: las revoluciones en la historia de nuestro conocimiento fundamental de la naturaleza se habían completado en gran parte. Los experimentadores del SLAC que habían descubierto el escalamiento, y por tanto los

quarks, obtuvieron el Premio Nobel en 1990. Por su parte, los teóricos que desarrollaron el «modelo estándar» actual lo obtuvieron en 1979, 1997 y 2004.

De manera notable, el trabajo de Feynman, tanto durante este periodo como durante los cinco años anteriores, ayudó en gran parte y directamente a hacer posible esta revolución. En el proceso, sin proponérselo y quizá sin apreciar las consecuencias en su totalidad, el trabajo de Feynman contribuyó a una nueva comprensión de la misma naturaleza de la verdad científica. No era algo artificial, sino que proporcionaba una nueva comprensión física fundamental de por qué teorías razonables de la naturaleza en la escala que podemos medir dan lugar a resultados finitos.

La historia de cómo sucedió todo esto empieza, casualmente, con el trabajo que hizo Gell-Mann con su colega Francis Low en Illinois en 1953-1954. Su artículo, que había impresionado a Feynman cuando Gell-Mann visitó Caltech por primera vez, concluía que la magnitud efectiva de la carga en el electrón variaría con el tamaño, haciéndose mayor al moverse hacia dentro y penetrar la nube de los pares virtuales electrón-positrón que apantallan la carga.

Un poco más hacia el este, en el verano de 1954 Frank Yarig y su compañero de despacho Robert Mills, en el laboratorio de Brookhaven en Long Island (Nueva York), motivados por el éxito de la QED como una explicación de la naturaleza, publicaron un artículo en el que postulaban una posible generalización de la teoría que creían que podía ser apropiada para entender las fuerzas nucleares (interacción fuerte).

En QED, la fuerza electromagnética se propaga mediante el intercambio de unas partículas sin masa, los fotones. La forma de las ecuaciones para la interacción electromagnética está enormemente restringida por una simetría, llamada «simetría gauge», que asegura esencialmente que el fotón no tenga masa y, por tanto, que la interacción sea de largo alcance, como he descrito previamente. Nótese que en el electromagnetismo los fotones se acoplan a las cargas eléctricas y ellos mismos son eléctricamente neutros.

Yang y Mills sugirieron una versión más complicada de la invariancia gauge en la que muchos tipos diferentes de «fotones» podían intercambiarse entre muchos tipos de «cargas», y algunos de los fotones podían tener carga, lo que significa que interaccionarían con ellos mismos y con otros fotones. Las simetrías de estas nuevas ecuaciones de Yang-Mills, como llegaron a conocerse, eran a la vez fascinantes y sugerentes. La interacción fuerte no parecía distinguir entre protones y neutrones, por ejemplo, así que inventar una simetría entre ellos, así como una partícula cargada tipo fotón que de alguna manera se acople a uno de ellos y lo convierta en el otro, tenía algún sentido físico. Además, el éxito en quitar los infinitos en QED dependía crucialmente de la simetría gauge de esa teoría, de modo que tenía sentido usarla como base para la nueva teoría.

El problema era que la simetría gauge de las nuevas ecuaciones requeriría, en general, que los nuevos fotones no tuvieran masa, pero como las interacciones fuertes son de corto alcance, operando solo en las escalas nucleares, en la práctica deberían tener masa.

Yang y Mills no tenían ni idea de cómo podía suceder esto exactamente, de modo que su artículo no proporcionaba realmente un modelo sino más bien una idea.

A pesar de estos problemas, algunos aficionados, como Julián Schwinger y Murray Gell-Mann, continuaron dándole vueltas a la idea de las teorías de Yang-Mills durante las décadas de 1950 y 1960, porque tenían la impresión de que su estructura matemática podía proporcionar la clave para entender la interacción débil o la fuerte, o ambas. Resulta interesante que las simetrías de la teoría de Yang-Mills podían expresarse usando la misma clase de lenguaje de teoría de grupos que Gell-Mann usó después como un esquema de clasificación de las partículas de interacción fuerte.

Schwinger asignó a su estudiante de posgrado Sheldon Glashow la tarea de pensar acerca de qué clase de estructura de grupo y qué clase de teoría de Yang-Mills podrían describir las simetrías asociadas a la interacción débil. En 1961, Glashow no solo encontró una simetría candidata, sino que demostró de manera notable que esta podía combinarse con la simetría gauge de QED para construir un modelo en el que la interacción débil y la electromagnética surgían del mismo conjunto de simetrías gauge, y que, en este modelo, el fotón de la QED estaría acompañado de otros tres «bosones gauge», como llegó a conocerse el nuevo tipo de fotones. El problema era, una vez más, que la interacción débil tenía corto alcance mientras que el electromagnetismo era de largo alcance, y Glashow no explicó cómo podía introducirse esta diferencia. En el momento en que se les diera masa a las nuevas partículas,



desaparecería la simetría gauge, y con ella la belleza y potencial consistencia matemática del modelo.

Parte del problema era que nadie sabía realmente cómo convertir las teorías de Yang-Mills en teorías cuánticas de campos completamente coherentes como la QED. Las matemáticas eran más embarazosas y faltaba motivación para embarcarse en una tarea así. Aquí entra Richard Feynman. Cuando empezó a trabajar en la teoría cuántica de la gravedad, los problemas matemáticos eran tan difíciles que pidió consejo a Gell-Mann. Este le sugirió que primero resolviera un problema más sencillo. Le habló de las teorías de Yang-Mills, arguyendo que las simetrías inherentes a estas teorías eran muy similares a las asociadas a la teoría general de la relatividad, pero menos intimidatorias.

Feynman siguió el consejo de Gell-Mann y analizó las propiedades cuánticas de las teorías de Yang-Mills, haciendo descubrimientos fundamentales, que escribió en detalle solo años más tarde. En particular, descubrió que para obtener reglas de Feynman coherentes para la teoría cuántica había que añadir una partícula ficticia a los lazos internos para desarrollar correctamente las probabilidades. Más tarde, dos físicos rusos, Ludvig Faddeev y Víctor Popov, redescubrieron esto, y las partículas ahora se llaman «bosones fantasmas de Faddeev-Popov». Además, Feynman descubrió un nuevo esquema general sobre diagramas de Feynman en teoría cuántica de campos, que relaciona los diagramas con lazos internos de partículas virtuales con los que no tienen esos lazos.

Los métodos de Feynman para entender las teorías de Yang-Mills cuantizadas resultaron ser de crucial importancia para los desarrollos más importantes en física teórica al final de la década. Primero, Steven Weinberg redescubrió el modelo de Glashow para la «unificación electrodébil», como fue llamada, en el contexto de una teoría de Yang-Mills más específica y realista en la que los bosones débiles podían, en principio, comenzar con masa cero —preservando la simetría gauge— y sus masas podían surgir después, espontáneamente, debido a la dinámica de la teoría.

Esta era una bonita solución potencial al problema de encontrar una teoría de la interacción débil. Pero quedaba pendiente un problema: ¿era la teoría «renormalizable»? Esto es, ¿podía mostrarse, como hicieron Feynman, Schwinger y Tomonaga en QED, que pueden quitarse de manera eficiente todos los infinitos en la predicción de cantidades físicas? En 1972, un joven estudiante de posgrado, Gerardus 't Hooft, y su supervisor, Martinus Veltman, desarrollando los métodos de Feynman para cuantizar estas teorías, proporcionaron la respuesta: sí. ¡De repente la teoría de Glashow-Weinberg se volvió interesante! En los cinco años siguientes, los experimentos comenzaron a ofrecer evidencias de que la teoría era correcta, incluyendo la necesidad de tres nuevos bosones-gauge pesados, y en 1984, en el CERN, se descubrieron esos bosones pesados. Todos estos desarrollos dieron lugar a una activa temporada de Premios Nobel: para Glashow, Weinberg y Abdus Salam, quien había hecho un trabajo similar a los de ellos; y para 't

Hooft y Veltman y los experimentadores que descubrieron los bosones débiles.

Ahora los teóricos tenían maravillosas y fundamentales teorías para las interacciones débil y electromagnética, pero la interacción fuerte seguía siendo un enigma. Una teoría de Yang-Mills más complicada, asociada con el grupo de simetría que Gell-Mann había usado para clasificar los quarks,  $SU(3)$ , parecía prometedora. En este caso el «3» no correspondía a diferentes «sabores» de quarks —esto es, arriba, abajo y extraño—, sino más bien a algún nuevo número cuántico interno que acabó llamándose «color». Esta teoría parecía ser capaz de describir los aspectos fenomenológicos de la forma en que los quarks podrían combinarse para formar los hadrones. Por analogía a la QED (electrodinámica cuántica), fue llamada «cromodinámica cuántica», o QCD. Sin embargo, una vez más, la interacción fuerte era de corto alcance, lo que parecía requerir bosones con masa.

Pro, aún más importante, ¿cómo podía una nueva interacción fuerte explicar el hecho de que los objetos dentro de los protones, llámense «quarks» o «partones», actúen como si no interaccionaran? La solución llegó en un año y se retrotraía a los resultados de Gell-Mann y Low sobre la intensificación del valor efectivo de la carga eléctrica en escalas pequeñas.

En 1973, en una época en que el valor de las acciones en teoría cuántica de campos había aumentado como consecuencia del progreso de la teoría electrodébil, un joven teórico de Princeton, que había mamado en Berkeley los modelos de democracia nuclear, que sostenían que las partículas y los campos eran el modo equivocado

de enfocar la interacción fuerte, decidió cargarse la única teoría remanente que aún tenía alguna esperanza de explicar la interacción fuerte. David Gross y su brillante estudiante de doctorado Frank Wilczek decidieron examinar el comportamiento a distancias cortas de las teorías de Yang-Mills, en particular de la QCD, con la intención de mostrar que el valor de las cargas de color en QCD crecería, como en QED, a distancias cortas debido al apantallamiento por partículas virtuales a distancias más largas. Si este fuera el caso, no habría esperanza para una teoría QCD como esa de explicar los resultados de escalamiento expuestos por Feynman y Bjorken. Por razones distintas, un estudiante de doctorado de Sidney Coleman en Harvard, David Politzer, estaba también investigando por su cuenta las propiedades de escalamiento de la QCD.

Para sorpresa de los tres científicos, en las ecuaciones resultantes se observó precisamente el resultado opuesto del esperado (una vez comprobados y corregidos diversos errores cruciales de signo), pero solo para teorías de Yang-Mills tales como la QCD. La «carga de color» efectiva de los quarks no se haría mayor a distancias cortas, sino menor. Los teóricos llamaron a esta notable e inesperada propiedad «libertad asintótica». Gross y Wilczek y luego Politzer continuaron este descubrimiento con una serie de artículos en los que adoptaron precisamente la formulación que había desarrollado Feynman a fin de hacer comparaciones con los resultados de los experimentos de escalamiento del SLAC. Descubrieron no solo que la QCD podía explicar el escalamiento, sino también que, debido al

hecho de que las interacciones entre quarks no eran cero a pesar de ser no obstante más débiles de lo que serían sin libertad asintótica, era posible calcular correcciones al comportamiento de escalamiento, las cuales habrían de ser observables.

Mientras tanto, durante ese periodo Feynman se mantenía escéptico ante todo el entusiasmo que generaban los nuevos resultados. Flabía visto a teóricos dejarse llevar demasiadas veces por las nuevas ideas de subirse a cualquier tren. Lo particularmente interesante era que este escepticismo persistía *a pesar* del hecho de que estos nuevos resultados surgían de explotar las técnicas que él había creado, tanto para entender los experimentos de escalamiento como para tratar las teorías de Yang-Mills.

Finalmente, hacia mediados de la década de 1970, Feynman había llegado a convencerse de que esas ideas tenían suficiente mérito, así que empezó a seguirlas en detalle y con gran entusiasmo y energía. Con un investigador posdoctoral, Rick Field, Feynman calculó gran cantidad de efectos físicos en QCD potencialmente observables, ayudando a impulsar una nueva y apasionante área de estrecho contacto entre teoría y experimento. Era un trabajo duro. La escala de energía en la que las interacciones en QCD se hacen lo suficientemente débiles para que los cálculos de los teóricos sean fiables era algo mayor de lo que los experimentadores podían alcanzar. Así que, aunque empezaba a aparecer una confirmación provisional de las predicciones de la libertad asintótica, pasaron otros diez años —hasta mediados de la década de 1980, cercana ya la muerte de Feynman— antes de que la teoría fuera completamente

confirmada. Y pasaron otros veinte años antes de que Gross, Wilczek y Politzer obtuvieran el Premio Nobel por su trabajo sobre la libertad asintótica.

Durante sus últimos años, por mucho que Feynman siguiera fascinado con la QCD, una parte de él continuaba resistiéndose a aceptar completamente la teoría. Pues aunque esta parecía hacer un maravilloso trabajo al explicar el escalamiento visto en el SLAC, y aunque también se habían observado las desviaciones del escalamiento predichas después y ciertamente todas las medidas de la intensidad de la interacción en QCD mostraban que se hacía más débil a distancias cortas y energías altas, en la escala opuesta de grandes distancias la teoría se hacía intratable. Esto impedía cualquier test teórico de lo que habría sido el patrón oro para Feynman: una explicación de por qué no se ven quarks libres en la naturaleza.

La sabiduría convencional es que la interacción en QCD se hace tan fuerte a grandes distancias que la fuerza entre quarks permanece constante con la distancia, y por consiguiente haría falta, en principio, una cantidad infinita de energía para separar completamente dos quarks. Esta predicción ha sido apoyada por complejos cálculos de ordenador, cálculos del tipo encabezado por Feynman cuando trabajaba en la Máquina de Conexión para Danny Hillis en Boston.

Pero, para Feynman, un resultado de ordenador no era más que una invitación a entender la física. Como había aprendido al lado de Bethe, hacía muchos años, no confiaría en las ecuaciones hasta que

tuviera una comprensión analítica de por qué sucedía algo, de manera que esta pudiera producir números comparables con los datos experimentales. Y no la tenía. Plasta que la tuviera, no estaba dispuesto a envainar su espada.

Fue entonces cuando conocí a Richard Feynman, como he comentado al principio de este libro. Vino a Vancouver y dio una conferencia con gran entusiasmo sobre una idea que creía que podía probar que la QCD sería «confinante», como se denominaba al problema de la «no observación» de quarks libres aislados. El problema era demasiado difícil para tratarlo en tres dimensiones, pero él estaba bastante seguro de que en dos dimensiones podía desarrollar un método analítico que pusiera fin a la cuestión de una manera que le satisfaría.

Feynman siguió trabajando intensamente, durante su lucha contra el cáncer, que le trataron por primera vez en 1979 y que reapareció de nuevo en 1987, y las crecientes distracciones asociadas con su fama cada vez mayor, desde actividades relacionadas con sus populares libros autobiográficos hasta su tarea en la comisión *Challenger* (en la que ayudó personalmente a descubrir la razón de la trágica explosión del transbordador espacial). Pero no llegó a vivir lo suficiente para ver realizada su meta. A pesar de que los cálculos con ordenador han mejorado de manera extraordinaria, proporcionando cada vez más apoyo a la idea del confinamiento, y aunque existen un montón de nuevas técnicas teóricas que han permitido sofisticados métodos nuevos para tratar las teorías de Yang-Mills, hasta la fecha todavía nadie se ha presentado con una

prueba simple y elegante de que la teoría debe confinar los quarks. Nadie pone en duda la teoría, pero el «test de Feynman», si se lo puede llamar así, aún no ha sido hallado.

Sin embargo, el legado de Feynman continúa vivo día tras día. Las únicas técnicas eficientes y productivas para tratar tanto las teorías gauge de Yang-Mills como la gravedad cuántica implican el formalismo de la integral de camino. En la física actual no se usa de manera esencial ninguna otra formulación de la teoría cuántica de campos. Pero, aún más importante, los resultados de las integrales de camino, la libertad asintótica y la renormalizabilidad de las interacciones débil y fuerte han orientado a los físicos en una nueva dirección, proporcionando una nueva comprensión de la verdad científica de un modo que habría hecho que al final Feynman se sintiera orgulloso del trabajo que realizó en QED, en vez de tener la impresión de que no había encontrado más que una forma elegante de barrer los problemas bajo la alfombra.

La metodología de la integral de camino de Feynman permitía a los físicos examinar sistemáticamente cómo cambian las predicciones de la teoría cuando se cambia la escala de distancia en la que se escoge alterar la misma para dejar fuera los efectos de partículas virtuales de energía cada vez mayor con el fin de renormalizarla. Puesto que en su lenguaje las teorías cuánticas se formulan mediante un examen explícito de caminos espacio-temporales, puede «integrarse sobre» (esto es, tomar el promedio de) las irregularidades muy pequeñas en los caminos apropiados en estas



escalas, y entonces considerar solo caminos que ya no tienen esas irregularidades.

El físico Kenneth Wilson, que después obtuvo el Premio Nobel, demostró que esta integración equivale a que la teoría resultante, la teoría finita, es realmente solo una «teoría efectiva», que es apropiada para describir la naturaleza en escalas mayores que la escala «corte», en la que se integran las pequeñas irregularidades en los caminos.

La técnica de Feynman de librarse de los infinitos no era entonces algo artificial, sino más bien físicamente esencial. Por eso ahora nos damos cuenta de que ya no deberíamos esperar jamás que una teoría se cumpla, inalterada, en todas las escalas de distancia y a todas las energías. Nadie espera que la QED, la teoría de la física mejor verificada y más querida, continúe siendo la descripción apropiada de la naturaleza en distancias cada vez más pequeñas. De hecho, como demostraron Glashow, Weinberg y Salam, en una escala de energía suficientemente alta, la QED se mezcla con la interacción débil para formar una nueva teoría unificada.

Entendemos ahora que *todas* las teorías físicas son meramente teorías efectivas que describen la naturaleza en cierto campo de escalas. No existe algo así como la verdad científica absoluta, si con ello nos referimos a una teoría que es válida en todas las escalas en todos los tiempos. Así, la necesidad física de la renormalización es simple: la teoría infinita —esto es, aquella en la que extrapolamos nuestra teoría hacia escalas de distancias arbitrariamente pequeñas— *no* es la teoría correcta y los infinitos son la prueba de

ello. Si elegimos extrapolar así la teoría, lo estamos haciendo fuera del ámbito de su validez. Al cortar la teoría en alguna escala pequeña, simplemente estamos ignorando la nueva física desconocida que la cambiaría inevitablemente en estas escalas. Las respuestas finitas que obtenemos tienen sentido precisamente porque si deseamos sondear fenómenos en escalas de distancia grandes, *podernos* pasar por alto esta nueva física desconocida en escalas muy pequeñas. Las teorías renormalizables razonables como la QED son insensibles a una nueva física en escalas de distancia muy por debajo de aquellas en las que se realizan los experimentos para verificar las teorías.

La esperanza de Feynman de que, de alguna manera, seríamos capaces de resolver el problema de los infinitos en QED sin renormalización era por tanto una esperanza fuera de lugar. Sabemos ahora que esta imagen, que nos permite ver de manera sistemática cómo ignorar lo que no comprendemos, es la mejor que probablemente vamos a obtener. En pocas palabras, Feynman hizo todo lo que se podía hacer, y lejos de ocultar los problemas de la teoría de campos, su solución matemática era mucho más que eso. Esta demostraba verdaderamente nuevos principios que él siempre esperó que un día consiguiera descubrir.

Esta nueva comprensión le habría complacido a Feynman, no solo porque da una nueva relevancia a su propio trabajo inicial, sino también porque mantiene fresco el misterio. Ninguna teoría conocida actualmente es la respuesta final. Esto a él le habría gustado. Como dijo una vez: «La gente me pregunta: “¿Está

buscando la ley definitiva de la física?”. No, no la busco. Busco descubrir más acerca del mundo. Si resulta que existe una simple ley definitiva que lo explica todo, que así sea; sería estupendo descubrirla. Si resulta que es como una cebolla, con millones de capas, y resulta que nos sentimos mareados y cansados de mirar las capas, pues así son las cosas. Pero sea cual sea la manera en que se muestre, se trata de la naturaleza, y va a mostrarse tal como ella es».

A la vez, los extraordinarios descubrimientos de la década de 1970 hicieron posible, basándose en el trabajo de Feynman, que muchos físicos se aventuraran en otra dirección. Tras el éxito de la unificación electrodébil y la libertad asintótica, surgió una nueva posibilidad. Después de todo, como demostraron Gell-Mann y Low, la QED se hace más fuerte en escalas pequeñas. Y como demostraron Gross, Wilczek y Politzer, la QCD se hace más débil en escalas pequeñas. Tal vez si fuéramos a una escala muy pequeña, que se estima que podría ser dieciséis órdenes de magnitud menor que el tamaño del protón, y unas doce órdenes de magnitud menor que lo que pueden sondear los mayores aceleradores actuales, todas las fuerzas conocidas podrían llegar a unificarse en una sola teoría, con una sola intensidad. Esta posibilidad, que Glashow llamó «gran unificación», se convirtió en la fuerza motriz de la física de partículas en gran parte de la década de 1980, desbordada por una meta incluso mayor cuando se descubrió que la teoría de cuerdas permite una posible unificación de las tres fuerzas no gravitacionales con la gravitación.

Feynman, sin embargo, desconfiaba. Toda su vida había luchado contra una excesiva lectura de los datos, y había sido testigo de cómo multitud de teorías brillantes y elegantes se quedaban por el camino. Además, sabía que a no ser que los teóricos estén dispuestos a, y sean capaces de, contrastar sus ideas con la fría luz de la experimentación, las posibilidades de autoengaño son grandes. El sabía, como decía a menudo, que la persona más fácil de engañar es uno mismo.

Cuando se mofaba de los seudocientíficos, «expertos» en abducción alienígena, astrólogos y charlatanes, trataba de recordarnos que parecemos estar estructurados para encontrar que lo que le sucede a cada uno de nosotros naturalmente parece tener una relevancia y significado especiales. Incluso si es un accidente. Hay que estar en guardia contra esto, y la única forma de hacerlo es adhiriéndose a la camisa de fuerza de la realidad empírica. Así que, al confrontarse con afirmaciones de que el fin de la física estaba cerca y que las leyes definitivas de la física estaban justo a la vuelta de la esquina, Feynman simplemente exclamaba, con la sabiduría de la edad: «Toda mi vida he visto eso |...|, gente que cree que la respuesta está justo a la vuelta de la esquina».

Si hay algo que podamos aprender de la extraordinaria vida profesional de uno de los científicos más destacados del siglo XX, es que el entusiasmo y la arrogancia que se derivan naturalmente del raro privilegio de descubrir aunque sea una sola brizna de los misterios ocultos de la naturaleza deben moderarse al entender que, independientemente de lo mucho que hayamos aprendido, siempre

habrá más sorpresas reservadas para nosotros si estamos dispuestos a seguir investigando. Para un intrépido y brillante aventurero-como Richard Feynman, esta fue, precisamente, la razón para vivir.

## Epílogo

### El carácter marca el destino

*Mi forma de pensar de lo que estamos haciendo es: estamos explorando, estamos tratando de descubrir todo lo que podamos sobre el mundo. Mi interés en la ciencia es simplemente descubrir más sobre el mundo. Y cuanto más descubro, mejor es este.*

*RICHARD FEYNMAN*

Richard Feynman murió poco antes de la medianoche del 15 de febrero de 1988, a los sesenta y nueve años. En esos pocos años se las había arreglado para cambiar no solo el mundo, o al menos nuestra comprensión de él, sino también las vidas de todas las personas que conoció. No había nadie que tuviera el privilegio de conocerlo que no se sintiera marcado por él. Había algo tan único en él que era imposible verlo como se veía a los demás. Si es cierto que el carácter marca el destino, entonces él parecía haber nacido para descubrir grandes cosas, incluso aunque sus descubrimientos fueran el producto de un trabajo increíblemente duro, una energía ilimitada y una rígida integridad alineada con una mente brillante.

Tal vez también sea cierto que, con todo lo que logró, podría haber conseguido mucho más si hubiera estado dispuesto a escuchar a las personas que le rodeaban y aprender de ellas, e insistir menos

en descubrirlo absolutamente todo por sí mismo. Pero su propósito no era el logro. Su propósito era aprender acerca del mundo. Creía que la diversión residía en descubrir algo, por sí mismo, aunque todo el mundo ya lo supiera. Una y otra vez, cuando descubría que alguien se le había adelantado en un descubrimiento, su reacción no era de desesperación, sino más bien: «Anda, ¿no es estupendo que hayamos llegado a lo mismo?».

Quizás una forma de profundizar más sobre una persona sea conociendo las reacciones que genera en quienes la rodean. De modo que para completar la imagen de Richard Feynman he decidido incluir algunas de estas reacciones que no encajaban en las páginas precedentes, pero que podrían dar más luz a la notable experiencia de conocer al hombre, así como una o dos anécdotas, que, para mí, captan su esencia.

Primero, conozcamos la experiencia de un joven estudiante, Richard Sherman, que tuvo la suerte de pasar una tarde en el despacho de Feynman:

*Recuerdo un episodio que encontré particularmente pasmoso. Hacia mediados de mi primer año estaba investigando en superconductividad, y una tarde fui a su despacho para discutir los resultados. Empecé a escribir ecuaciones en la pizarra, y él comenzó a analizarlas muy rápidamente. Nos interrumpió una llamada telefónica. Feynman cambió inmediatamente de la superconductividad a algún problema en física de altas energías, en medio de un cálculo increíblemente complicado que alguien estaba realizando. Habló con esa persona durante cinco*

*o diez minutos. Cuando acabó, colgó el teléfono y continuó la discusión de mis cálculos particulares, en el punto exacto en que la había dejado. El teléfono sonó de nuevo. Esta vez era alguien de física teórica del estado sólido, sin ninguna relación con nada de lo que habíamos estado hablando. Pero allí estaba él, diciéndole: «No, no, esa no es la manera de hacerlo. Tienes que hacerlo de esta manera». Así estuvimos alrededor de tres horas; recibió diferentes clases de llamadas telefónicas con consultas técnicas, cada vez en un campo completamente diferente e implicando distintos tipos de cálculos. Era asombroso. Nunca he vuelto a ver algo así.*

O una experiencia no muy distinta relatada por Danny Hillins, después de que Feynman empezara su trabajo de verano en Thinking Machines:

*A denudo, cuando alguno le pedíamos consejo, él rehusaba ariscamente diciendo: «Este no es mi departamento». No podía figurarme cuál era exactamente su departamento, pero de todos modos no importaba, porque se pasaba la mayor parte del tiempo trabajando en problemas que no eran de su departamento. Casi siempre, al cabo de unos días te venía y te decía: «He estado pensando sobre lo que me preguntaste el otro día y me parece que...». Pero lo que Richard detestaba, o al menos así lo pretendía, era que se le pidiera consejo. Entonces ¿por qué la gente siempre se lo pedía? Pues porque, incluso cuando no entendía, siempre parecía entender mejor que*



*nosotros. Y podía hacer que cualquier cosa que entendía la entendieran también los demás. Richard hacía sentirse a la gente como se sienten los niños cuando un mayor los trata por primera vez como adultos. Nunca tenía miedo de decir la verdad.*

Resolver problemas no era una elección para Feynman, era una necesidad, como se dio cuenta muy pronto su compinche Ted Welton. Feynman no habría podido parar, aunque lo hubiera intentado. Y no lo intentó porque en eso era muy bueno. Ni siquiera una grave enfermedad podía detenerlo. Veamos una anécdota que su colega de Caltech David Goodstein le contó al director cinematográfico Christopher Sykes:

*Un día, la secretaria de Feynman, Helen Tuck, me llamó por teléfono para decirme discretamente que Dick tenía cáncer, y que iría al hospital para someterse a una operación el viernes siguiente. Ese viernes, una semana antes de la operación, le dije que alguien parecía haber encontrado un error en los cálculos que habíamos realizado y que yo no sabía cuál era el error. ¿Estaría dispuesto a dedicar algún tiempo a buscarlo juntos? Y él contestó: «Por supuesto». A la mañana siguiente, nos encontramos en mi despacho y él se sentó y empezó a trabajar. La mayor parte del tiempo yo simplemente me quedaba sentado mirándolo y diciéndome a mí mismo: «Mira a este hombre. Está al borde del abismo. No sabe si va a vivir una semana, y aquí está con un problema realmente sin importancia en la teoría de*

*la elasticidad en dos dimensiones». Pero él estaba absorto en el problema y trabajó durante todo el día. Finalmente, a las seis de la tarde, decidimos que el problema era insoluble, así que nos rendimos y nos fuimos a casa. Dos horas después, me llamó a casa para decirme que había resuelto el problema. No había podido dejar de trabajar en él y finalmente había encontrado la solución de ese oscuro problema. Estaba entusiasmado, absolutamente en las nubes. Esto era cuatro días antes de la operación. Creo que esto dice un poco acerca de lo que lo motivó para hacer lo que hizo.*

El proceso era lo que Feynman amaba. Era un escape del tedio de la existencia. Stephen Wolfram, quien creó *Mathematica*, fue un joven protegido de Feynman durante varios años cuando era estudiante en Caltech, y describe algo similar:

*Probablemente era 1982. Había ido a casa de Feynman, y nuestra conversación había derivado a algún tipo de situación desagradable que estaba ocurriendo. Estaba a punto de irme cuando Feynman me detiene y dice: «¿Sabes?, tú y yo somos muy afortunados. Porque, pase lo que pase, siempre tenemos nuestra física». [...] Feynman amaba hacer física. Y creo que lo que más amaba era el proceso de calcular, de descifrar las cosas [...] No parecía importarle mucho si lo que salía era grande e importante. O esotérico y raro. Lo que le importaba era el proceso de hallarlo. Algunos científicos (entre los que yo probablemente me incluya) se guían por la ambición de construir*

*grandes edificios intelectuales. Creo que Feynman —al menos en los años en que lo conocí— se guiaba mucho más por el puro placer de hacer realmente ciencia. Parecía que en lo que más le gustaba emplear su tiempo era en descifrar cosas y calcular. Y era una gran calculadora. En general, quizá la mejor calculadora humana que ha existido jamás. Siempre me parecía increíble. Empezaba con algún problema y llenaba páginas con cálculos. ¡Y al final, siempre hallaba la respuesta correcta! Pero normalmente no se quedaba satisfecho. Una vez obtenía la respuesta, iba hacia atrás y trataba de descifrar por qué era evidente.*

Cuando a Feynman le interesaba algo, o alguien, era de verdad. El efecto era magnético. Centraba toda su energía, su concentración y su brillantez en esa cosa o persona. Esa es la razón de que mucha gente se quedara tan afectada cuando Feynman iba a oír sus seminarios y se quedaba para hacer preguntas.

Puesto que las reacciones que los colegas de Feynman tenían con él eran por lo general muy intensas, estas tendían a reflejar no solo el carácter de Feynman, sino también el de ellos mismos. Por ejemplo, pregunté a David Gross y Frank Wilczek, dos personas muy diferentes que descubrieron la libertad asintótica en QCD, cómo había reaccionado Feynman con relación a la QCD y a sus resultados de 1973. David me dijo que le irritó que Feynman no hubiera mostrado ningún interés, en gran parte, creía David, porque él no había obtenido el resultado. Más tarde, cuando le

hablé a Frank del mismo tema, me dijo cómo se sintió de sorprendido y honrado por el interés que había mostrado Feynman. Dijo que Feynman era escéptico, pero en esos primeros años Frank pensaba que esa era la respuesta apropiada. Sospecho que ambos tenían razón.

La anécdota más notable que capta el Richard Feynman que he llegado a conocer escribiendo este libro, así como los principios que guiaron su vida y dirigieron la naturaleza de su física, me la contó un amigo, Barry Barish, quien fue colega de Richard en Caltech durante los últimos veinte años de su vida. Barry y Richard vivían relativamente cerca, así que se veían a menudo. Y, como ambos vivían a unos cinco kilómetros del campus, en algunas ocasiones preferían caminar —a veces juntos y otras, no— a ir en coche al campus. Un día, Richard preguntó a Barry si había visto cierta casa en cierta calle y qué pensaba de ella. Barry no conocía la casa porque, como la mayoría de nosotros, encontró un camino que le iba bien y lo tomaba cada día para ir al trabajo y regresar. Barry se enteró de que Feynman se empeñaba en hacer precisamente lo opuesto: trataba de no tomar el mismo camino dos veces.

## **Agradecimientos y fuentes**

Como ya he comentado en la introducción, una de las razones de que aceptara escribir este libro, después de que James Atlas me propusiera la idea, fue que me proporcionaba la oportunidad, y la motivación, de volver a leer, con más o menos detalle, todos los artículos científicos de Feynman. Sabía que, como físico, la experiencia sería esclarecedora y me permitiría entender mejor el curso real de la historia de la física, en vez de la versión revisionista que inevitablemente se revela cuando un físico refina y simplifica técnicas que una vez fueron oscuras.

Sin embargo, no tengo ninguna pretensión de haber realizado algún tipo de obra erudita histórica fundamental. Aunque he llevado a cabo algunas investigaciones históricas que requirieron visitar archivos y buscar cartas y otras fuentes documentales, en el caso de Richard Feynman casi todo el material que he necesitado ha sido muy bien compilado y se halla disponible en diversas publicaciones. Si a esto se le añaden dos libros extraordinarios, uno centrado principalmente en la vida de Feynman y otro en la historia detallada de la física de su trabajo en electrodinámica cuántica, el lector interesado y técnicamente preparado puede tener acceso directo a casi todo el material que he usado como base de este libro.

Aparte de estas fuentes, estoy agradecido a muchos de mis colegas físicos por las discusiones que hemos mantenido acerca de sus impresiones sobre Feynman y sus experiencias personales con él. Entre estos, aunque no solo, se hallan Sheldon Glashow, Steven

Weinberg, Murray Gell-Mann, David Gross, Frank Wilczek, Barry Barish, Marty Block, Danny Hillis y James Bjorken. Además, agradezco a Harsh Mathur por ayudarme, como hace con frecuencia, actuando como guía preliminar a la bibliografía sobre materia condensada, en este caso al trabajo de Feynman en esta área.

Las fuentes de información más importantes a las que puede dirigirse el lector interesado, y que, dicho sea de paso, suministran todas las citas de Feynman que se encuentran en este libro, incorporan material de fuentes fundamentales publicado por Feynman y sobre Feynman. Estas incluyen, como ya he comentado, una exhaustiva presentación técnica no solo del trabajo de Feynman sobre QED, sino también reproducciones de todos sus artículos importantes y una maravillosa y definitiva biografía personal. Además, hay varias referencias excelentes, entre las que se incluye una reveladora compilación reciente de cartas de Feynman y diversos compendios de reflexiones sobre este por parte de quienes lo conocieron, tanto científicos como no científicos.

- Sylvan S. Schweber, *QED and the Men Who Made It*, Princeton University Press, 1994.
- **Laurie Brown** (ed.), *Selected Papers of Richard Feynman*, World Scientific, 2000.
- **James Gleick**, *Genius: The Life and Science of Richard Feynman*, Pantheon, 1992.

- **M. Feynman** (ed.), *Perfectly Reasonable Deviations: The Letters of Richard Feynman*, Basic Books, 2005.
- **Laurie Brown** y **John Rigden** (eds.), *Most of the Good Stuff: Memories of Richard Feynman*, Springer Press, 1993 (actas de un encuentro de un día entero, en 1988, en las que algunos científicos escribieron sus reflexiones sobre Feynman).
- **Christopher Sykes** (ed.), *No Ordinary Genius: The Illustrated Richard Feynman*, W. W. Norton, 1994
- **Jagdish Mera**, *The Beat of a Different Drum: the Life and Science of Richard Feynman*, Oxford University Press, 1994.

Tres fuentes adicionales útiles incluyen estudios históricos <sup>1</sup> de la física y de otros físicos:

- **Laurie M. Brown, Max Dresden, Lileian Hoddeson** (eds.), *Pions to Quarks: Particle Physics in the 1950s*, Cambridge University Press, 1989.
- **G . Johnson**, *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in the Twentieth Century Physics*, Vintage, 1999.
- **David Kaiser**, *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, University of Chicago Press, 2005.

Finalmente, entre los libros científicos de Feynman que pueden resultar útiles:

- *Electrodinámica cuántica. La extraña teoría de la luz y la materia*. Alianza, 1988.

- *El carácter de la ley física*, Tusquets, 2000.
- *Conferencias sobre computación*. Crítica, 2003.
- **B. Hatfield** (ed.), *The Feynman Lectures on Gravitation*, con F. B. Morinigo y W. G. Wagner, Addison-Wesley, 1995.
- *Statistical Mechanics: A Set of Lectures*, Addison-Wesley, 1981.
- *Theory of Fundamental Processes*, Addison-Wesley, 1961.
- *Quantum Electrodynamics*, Addison-Wesley, 1962.
- *Quantum Mechanics and Path Integrals*, con a. Hibbs, McGraw-Hill, 1965.
- *The Feynman Lectures on Physics*, con R. B. Leighton y M. Sands, Addison-Wesley, 2005.
- *Nobel Lectures in Physics, 1964-72*, Elsevier, 1973.
- *Elementary Particles and the Laws of Physics: The 1986 Dirac Memorial Lectures*, con S. Weinberg, Cambridge University Press, 1987.
- *¿Qué significa todo eso?: reflexiones de un científico-ciudadano*, Crítica, 2010.
- **Laurie Brown** (ed.), *Feynman's Thesis: A New Approach to Quantum Theory*, World Scientific, 2005.