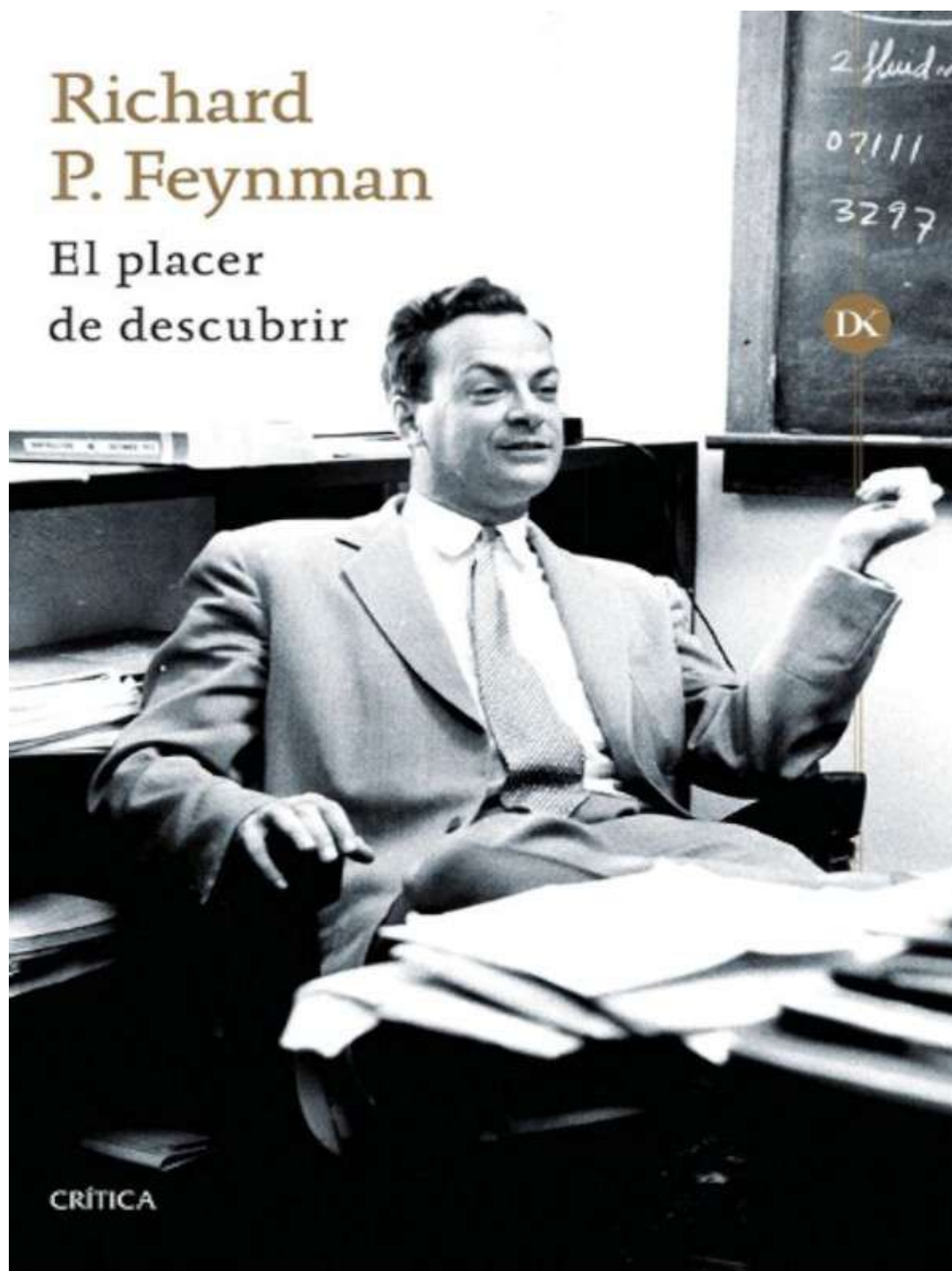




Reseña

El placer de descubrir permite acceder al mundo personal, social y científico de Richard Feynman, por ejemplo, a sus aventuras mientras participó en el Proyecto Manhattan, cuando se divertía —y escandalizaba— descifrando las claves de cajas fuertes, o a cómo se inició, siendo un niño, en el estudio de la naturaleza (en el «placer de descubrir»), que terminaría ocupando toda su vida. Podemos, asimismo, conocer sus pioneras ideas sobre las computadoras del futuro, su opinión acerca del valor de la ciencia o la explicación, tan sencilla como profunda, que dio al desastre de la lanzadera espacial Challenger. Es este, sin duda, un libro tan fascinante como su autor.

Índice

Prólogo

Introducción del editor

1. El placer de descubrir
2. Los computadores del futuro
3. Los Álamos desde abajo
4. Cuál es y cuál debería ser el papel de la cultura científica en la sociedad moderna
5. Hay mucho sitio al fondo
6. El valor de la ciencia
7. Informe minoritario de Richard P. Feynman en la investigación de la lanzadera espacial Challenger
8. ¿Qué es la ciencia?
9. El hombre más inteligente del mundo
10. Ciencia tipo «cultos cargo»
11. Tan sencillo como uno, dos, tres
12. Richard Feynman construye un universo
13. La relación entre ciencia y religión

Procedencias

Sobre el autor

Prólogo

Desde esta idolatría

«Amé al hombre, desde esta idolatría, tanto como el que más», escribió el dramaturgo isabelino Ben Jonson. «El hombre» era William Shakespeare, amigo y mentor de Jonson. Jonson y Shakespeare fueron escritores de éxito. Jonson era culto y erudito, Shakespeare era desenfadado y genial. No existía rivalidad entre ellos. Shakespeare era nueve años mayor, y ya había llenado los escenarios londinenses con obras maestras antes de que Jonson empezara a escribir. Shakespeare era, como dijo Jonson, «honesto y de una naturaleza abierta y franca», y dio a su joven amigo apoyo moral y material. El apoyo más importante que Shakespeare le dio consistió en representar uno de los papeles principales en la primera obra de Jonson, *A cada cual según su humor*, cuando se estrenó en 1598. La obra fue un éxito clamoroso y lanzó la carrera profesional de Jonson. Jonson tenía entonces veinticinco años, y Shakespeare treinta y cuatro. Después de 1598, Jonson siguió escribiendo poemas y obras de teatro, y muchas de sus obras fueron representadas por la compañía de Shakespeare. Jonson llegó a hacerse famoso por propio derecho como poeta y erudito, y al final de su vida fue honrado con un entierro en la Abadía de Westminster. Pero nunca olvidó su deuda para con su viejo amigo. Cuando Shakespeare murió, Jonson escribió un poema, «En recuerdo de mi amado maestro, William Shakespeare», que contenía los versos bien conocidos:

*No era de una época, sino para todos los tiempos
Y aunque sabías poco latín y menos griego,
para honrarte, yo no necesito ir allí a buscar nombres,
sino que directamente invoco a los tronantes Esquilo,
Eurípides y Sófocles...
De nuevo a la vida, para oír su paso melodioso.
La propia Naturaleza estaba orgullosa de sus diseños,
y alegre se adornaba con sus líneas,...
Pero no debo conceder todo a la Naturaleza: tu arte,
mi dulce Shakespeare, se merece su parte.
Pues aunque la naturaleza sea la materia del poeta,
es su arte quien proporciona el estilo; ese es el esfuerzo
de quien escribe una línea viva,...
Pues un buen poeta se hace, además de nacer.*

¿Qué tienen que ver Jonson y Shakespeare con Richard Feynman? Sencillamente esto. Yo puedo decir, como dijo Jonson: «Amé a este hombre, desde esta idolatría, tanto como el que más». El destino me deparó la tremenda suerte de tener a Feynman como mentor. Yo era el estudiante instruido y erudito que vino de Inglaterra a la Universidad de Cornell en 1947 y fui inmediatamente hechizado por el genio en bruto de Feynman. Con la arrogancia de la juventud, decidí que podía desempeñar el papel de Jonson con respecto a Feynman-Shakespeare. No esperaba encontrar a Shakespeare en suelo americano, pero no tuve ninguna dificultad en reconocerlo cuando le vi.

Antes de conocer a Feynman yo había publicado algunos artículos matemáticos llenos de trucos astutos pero totalmente carentes de interés. Cuando conocí a Feynman, supe inmediatamente que había entrado en otro mundo. Él no estaba interesado en publicar artículos bonitos. Él estaba luchando, con más fuerza con la que yo había visto luchar antes a nadie, por comprender el funcionamiento de la naturaleza reconstruyendo la física desde abajo. Tuve la suerte de encontrarle casi al final de sus ocho años de lucha. La nueva física que él había imaginado cuando era estudiante de John Wheeler siete años antes estaba cuajando finalmente en una visión coherente de la naturaleza, la visión que él denominó «el enfoque espacio-temporal». En 1947 la visión estaba todavía inacabada, llena de cabos sueltos e inconsistencias, pero yo vi inmediatamente que tenía que ser correcta. Aproveché cualquier oportunidad para oír hablar a Feynman, para aprender a nadar en el torrente de sus ideas. A él le gustaba hablar, y me acogió como un oyente. Así nos hicimos amigos de por vida.

Durante un año observé cómo Feynman perfeccionaba su forma de describir la naturaleza con imágenes y diagramas, hasta que consiguió atar los cabos sueltos y eliminar las inconsistencias. Entonces empezó a hacer números, utilizando sus diagramas como guía. Con una velocidad sorprendente fue capaz de calcular cantidades físicas que podían cotejarse directamente con los experimentos. Los experimentos coincidían con sus números. En el verano de 1948 pudimos ver cómo se hacían ciertas las palabras de

Jonson: «La propia Naturaleza estaba orgullosa de sus diseños, y alegre se adornaba con sus líneas».

Durante el año en que estuve paseando y hablando con Feynman, también estuve estudiando la obra de los físicos Schwinger y Tomonaga, quienes llegaron a resultados similares siguiendo caminos más convencionales. Schwinger y Tomonaga, que utilizaban métodos más complicados y laboriosos, consiguieron calcular de forma independiente las mismas cantidades que Feynman pudo obtener directamente de sus diagramas. Schwinger y Tomonaga no reconstruyeron la física: la tomaron tal como la encontraron y solo introdujeron nuevos métodos matemáticos para extraer números a partir de ella. Cuando quedó claro que los resultados de sus cálculos coincidían con los de Feynman, yo supe que se me había brindado una oportunidad única para unir las tres teorías. Escribí un artículo titulado «Las teorías de radiación de Tomonaga, Schwinger y Feynman», en el que explicaba por qué las teorías parecían diferentes pero en esencia eran iguales. Mi artículo apareció en *Physical Review* en 1949, y lanzó mi carrera profesional de forma tan decisiva como *A cada cual según su humor* lanzó la de Jonson. Yo tenía entonces, como Jonson, veinticinco años. Feynman tenía treinta y uno, tres años menos de los que tenía Shakespeare en 1598. Tuve cuidado en tratar a mis tres protagonistas con la misma dignidad y respeto, pero en el fondo sabía que Feynman era el más grande de los tres y que el objetivo principal de mi artículo era hacer accesibles sus ideas revolucionarias a los físicos de todo el mundo. Feynman me animó

activamente para que publicara sus ideas, y ni una sola vez se quejó de que yo estuviese robando sus truenos. Él era el protagonista de mi obra.

Una de las preciadas pertenencias que yo llevé de Inglaterra a América era *The Essential Shakespeare* de J. Dover Wilson, una corta biografía de Shakespeare que contiene la mayoría de las citas de Jonson que he reproducido aquí. El libro de Wilson no es una obra de ficción ni una obra de historia, sino algo que está a medias entre ambas. Se basa en el testimonio de primera mano de Jonson y otras personas, pero Wilson utilizaba su imaginación, junto con los escasos documentos históricos, para dar vida a Shakespeare. En particular, la primera evidencia de que Shakespeare actuó en la obra de Jonson procede de un documento datado en 1709, más de cien años después de aquel suceso. Sabemos que Shakespeare era famoso como actor tanto como escritor, y no veo ninguna razón para dudar de la historia tradicional tal como la cuenta Wilson.

Felizmente, los documentos que proporcionan evidencia de la vida y las ideas de Feynman no son tan escasos. El presente volumen es una colección de tales documentos, que nos ofrece la voz auténtica de Feynman registrada en sus conferencias y escritos ocasionales. Son documentos informales, dirigidos a audiencias generales más que a sus colegas científicos. En ellos vemos a Feynman tal como era, siempre jugando con las ideas pero siempre serio sobre las cosas que le importaban. Las cosas que le importaban eran la honestidad, la independencia, la disposición a admitir la ignorancia. Detestaba la jerarquía y disfrutaba de la amistad de personas de las

más diversas condiciones. Era, como Shakespeare, un actor con talento para la comedia.

Además de su pasión trascendental por la ciencia, Feynman también disfrutaba con las bromas y los placeres humanos corrientes. Una semana después de conocerle, escribí una carta a mis padres en Inglaterra en donde le describía como «mitad genio y mitad bufón». Mientras luchaba heroicamente por comprender las leyes de la naturaleza, disfrutaba relajándose con los amigos, tocando sus bongos y divirtiéndose a todo el mundo con trucos e historias. En esto también se parecía a Shakespeare. Del libro de Wilson tomo el testimonio de Jonson:

Cuando se sentaba a escribir, podía estar haciéndolo día y noche; se esforzaba sin pausa, hasta que desfallecía: y cuando lo dejaba, se dedicaba de nuevo a cualquier deporte y ocio; era casi imposible hacerle volver a su libro: pero cuando lo conseguía, se había hecho más fuerte y más serio.

Así era Shakespeare, y así era también el Feynman que yo conocí y amé, desde esta idolatría.

FREEMAN J. DYSON
Institute for Advanced Study
Princeton, New Jersey

Introducción del editor

Recientemente asistí a una conferencia en el venerable Laboratorio Jefferson de la Universidad de Harvard. La conferenciante era de la doctora Lene Hau del Rowland Institute, que acababa de realizar un experimento del que no solo se informó en la reputada revista científica *Nature*, sino también en la primera plana de *The New York Times*. En el experimento, ella (con su grupo de investigación formado por estudiantes y científicos) hizo pasar un haz de luz láser a través de un nuevo tipo de materia denominado un condensado de Bose-Einstein (un extraño estado cuántico en el que un puñado de átomos, enfriados casi hasta el cero absoluto, dejan prácticamente de moverse y actúan en conjunto como una sola partícula), lo que frenaba al haz de luz hasta el ritmo increíblemente lento de 17 metros por segundo¹. La luz, que viaja normalmente a la vertiginosa velocidad de 300.000 kilómetros por segundo, o 1.080.000.000 kilómetros por hora, en el vacío, se frena cuando atraviesa algún medio, como aire o vidrio, aunque su velocidad sigue siendo del mismo orden que la velocidad en el vacío. Pero hagan ustedes el cálculo y verán que 17 metros por segundo dividido por 300.000 kilómetros por segundo es igual a 0,00000006, o *seis millonésimas de un 1 por 100* de su velocidad en el vacío. Para poner un ejemplo comparativo, esto es como si Galileo hubiese dejado caer sus balas

¹ Se refiere a la velocidad de grupo de un pulso de luz compuesto de ondas monocromáticas diferentes. Para que se produzca este fenómeno hay que crear una fuerte dependencia del índice de refracción con la frecuencia cerca de una línea de absorción, lo que se consigue mediante transparencia inducida electromagnéticamente. (N. del t.)

de cañón desde lo alto de la Torre de Pisa y estas hubiesen tardado dos años en llegar al suelo.

La conferencia me dejó sin aliento (incluso Einstein se hubiera sentido impresionado, creo yo). Por primera vez en mi vida sentí una pizca de lo que Richard Feynman llamaba «la excitación del descubrimiento», la repentina sensación (probablemente semejante a una epifanía, aunque una epifanía vicaria en este caso) de que yo había captado una idea nueva y maravillosa, de que había algo nuevo en el mundo y yo asistía a un suceso científico trascendental; una sensación no menos espectacular y excitante que la que sintió Newton cuando se dio cuenta de que la fuerza misteriosa que hizo que la manzana apócrifa cayera en su cabeza era la misma fuerza que hacía que la Luna se mantuviera en órbita alrededor de la Tierra; o la de Feynman cuando dio ese primer y difícil paso hacia la comprensión de la naturaleza de la interacción entre la luz y la materia, que le llevó finalmente al Premio Nobel.

Sentado entre la audiencia, casi pude sentir a Feynman mirando por encima de mi hombro y susurrándome al oído: « ¿Ves? Por esto es por lo que los científicos continúan sus investigaciones, por lo que luchamos tan desesperadamente por cada pedazo de conocimiento, velamos noches enteras buscando la respuesta a un problema, escalamos los obstáculos más escarpados hasta el próximo pedazo de conocimiento, para alcanzar finalmente ese momento feliz de la excitación del descubrimiento, que es parte del

placer de descubrir»². Feynman siempre decía que él no hacía física por la gloria ni por los premios y recompensas, sino por el *placer* de hacerlo, por el puro placer de descubrir cómo funciona el mundo, qué es lo que lo mantiene en marcha.

El legado de Feynman es su inmersión y dedicación a la ciencia: su lógica, sus métodos, su rechazo del dogma, su infinita capacidad de duda. Feynman creía y vivía en el credo de que la ciencia, cuando se utiliza de forma responsable, puede no solo divertir sino que también puede ser de valor inestimable para el futuro de la sociedad humana. Y como todos los grandes científicos, a Feynman le gustaba compartir su asombro ante las leyes de la naturaleza con colegas y legos por igual. En ninguna parte se manifiesta más claramente la pasión de Feynman por el conocimiento que en esta colección de sus obras cortas (casi todas publicadas con anterioridad, salvo una inédita).

El mejor modo de apreciar el misterio Feynman es leer este libro, pues aquí encontrarán ustedes una gran variedad de temas sobre los que el gran físico pensó en profundidad y habló de forma encantadora: no solo de física —en cuya enseñanza no fue superado por nadie— sino también de religión, de filosofía y del temible escenario académico; del futuro de la computación y el de la nanotecnología, de la cual fue un pionero destacado; de la humildad, del placer en la ciencia y del futuro de la ciencia y la civilización; de cómo deberían ver el mundo los científicos en

² Otro de los sucesos más excitantes, si no en mi vida, al menos en mi carrera de editor, fue el encontrar la transcripción largo tiempo extraviada y nunca antes publicada de tres conferencias que dio Feynman en la Universidad de Washington a comienzos de los años sesenta, que se convirtió en el libro *Qué significa todo eso*. Pero eso fue más el placer de encontrar que el placer de *descubrir*. (N. del e.)

ciernes; y de la trágica ceguera burocrática que condujo al desastre de la lanzadera espacial *Challenger*, el informe que fue objeto de titulares de prensa que hicieron de «Feynman» una palabra familiar. Curiosamente, hay muy poco solapamiento en estas piezas, pero en aquellas pocas ocasiones en que una historia se repite me he tomado la libertad de suprimir una de las dos apariciones para ahorrar al lector una repetición innecesaria. Inserto puntos suspensivos [...] para señalar dónde se ha suprimido una «gema» repetida.

Feynman mantenía una actitud muy informal hacia la gramática propiamente dicha, como se muestra claramente en la mayoría de las piezas, que fueron transcritas de conferencias o entrevistas habladas. Por ello, para mantener el tono de Feynman, he conservado en general sus giros poco gramaticales. Sin embargo, donde una transcripción pobre o esporádica hacía que una palabra o frase resultase incomprensible o difícil, la he corregido para hacerla legible. Creo que el resultado queda prácticamente inalterado, aunque legible, feynmanesco.

Aclamado durante su vida, reverenciado en el recuerdo, Feynman sigue siendo una fuente de sabiduría para personas de cualquier condición. Espero que este tesoro de sus mejores charlas, entrevistas y artículos estimulará y divertirá a generaciones de devotos y recién llegados a la mente única y a menudo descarada de Feynman.

Así que lean, disfruten y no tengan miedo de reírse a carcajadas o de aprender una lección o dos sobre la vida; inspírense y, sobre

todo, experimenten el placer de descubrir cosas sobre un ser humano poco común.

* * * *

Me gustaría dar las gracias a Michelle y Carl Feynman por su generosidad y apoyo constante desde ambas costas; a la doctora Judith Goodstein, a Bonnie Ludt y a Shelley Erwin, de los archivos de Caltech, por su ayuda y hospitalidad indispensables; y especialmente al profesor Freeman Dyson por su elegante e iluminador Prólogo.

También me gustaría expresar mis agradecimientos a John Gribbin, Tony Hey, Melanie Jackson y Ralph Leighton por sus frecuentes y excelentes consejos durante la confección de este libro.

JEFFREY ROBBINS

Reading, Massachusetts

Septiembre de 1999

Capítulo 1

El placer de descubrir

Esta es una transcripción retocada de una entrevista con Feynman en 1981 para el programa de la BBC Horizon, emitido en Estados Unidos como un episodio de Nova. Feynman ya había dejado atrás la mayor parte de su vida (murió en 1988), de modo que podía reflexionar sobre sus experiencias y logros con una perspectiva que no suele estar al alcance de una persona más joven. El resultado es una discusión franca, relajada y muy personal sobre muchos temas queridos para Feynman: por qué el simple conocimiento del nombre de una cosa es prácticamente lo mismo que no saber nada en absoluto sobre ella; cómo él y sus colegas científicos del Proyecto Manhattan pudieron beber y festejar el éxito del arma terrible que habían creado, mientras en Hiroshima, en el otro extremo del mundo, miles de sus congéneres humanos habían muerto o estaban muriendo a causa de ello; y por qué Feynman también podría habérselas arreglado sin un Premio Nobel.

Contenido:

- §. La belleza de una flor*
- §. Evitar las humanidades*
- §. Un «Tyrannosaurus» en la ventana*
- §. Álgebra para el hombre práctico*
- §. Charreteras y el Papa*
- §. Invitación a la bomba*
- §. Éxito y sufrimiento*

§. *«Yo no tengo que hacerlo bien porque ellos piensen que voy a hacerlo bien»*

§. *El Premio Nobel: ¿valió la pena?*

§. *Las reglas del juego*

§. *Rompiendo átomos*

§. *«Que lo haga George»*

§. *Aburrido de la historia*

§. *De tal palo, tal astilla*

§. *«Ciencia que no es una ciencia...»*

§. *Duda e incertidumbre*

§. La belleza de una flor

Tengo un amigo artista que suele adoptar una postura con la que yo no estoy muy de acuerdo. Él sostiene una flor y dice: «Mira qué bonita es», y en eso coincidimos. Pero sigue diciendo: «Ves, yo, como artista, puedo ver lo bello que es esto, pero tú, como científico, lo desmontas todo y lo conviertes en algo anodino». Y entonces pienso que él está diciendo tonterías. Para empezar, la belleza que él ve también es accesible para mí y para otras personas, creo yo. Quizá yo no tenga su refinamiento estético, pero puedo apreciar la belleza de una flor. Pero al mismo tiempo, yo veo mucho más en la flor que lo que ve él. Puedo imaginar las células que hay en ella, las complicadas acciones que tienen lugar en su interior y que también tienen su belleza. Lo que quiero decir es que no solo hay belleza en esta escala de un centímetro: hay también belleza en una escala más pequeña, en la estructura interna. También los procesos, el

hecho de que los colores de la flor evolucionan para atraer insectos que la polinicen es interesante, pues significa que los insectos pueden ver el color. Añade una pregunta: ¿existe también este sentido estético en las formas inferiores? ¿Por qué es estético? Todo tipo de preguntas interesantes que ponen de manifiesto que un conocimiento de la ciencia añade algo a la excitación, el misterio y el respeto por una flor. Añade; no entiendo cómo puede restar.

§. Evitar las humanidades

Siempre he estado muy sesgado hacia la ciencia y cuando era joven concentré casi todos mis esfuerzos en ella. No tenía tiempo de aprender ni tenía mucha paciencia con lo que se denominan las humanidades, incluso si en la universidad era obligatorio seguir cursos de humanidades. Hice todo lo posible para no tener que estudiar mucho ni trabajar en ello. Solo más tarde, cuando me hice mayor y estaba más relajado, me he dispersado un poco. He aprendido a dibujar y leo un poco, pero realmente sigo siendo una persona muy sesgada y no sé mucho. Tengo una inteligencia limitada y la utilizo en una dirección concreta.

§. Un «Tyrannosaurus» en la ventana

En casa teníamos la *Enciclopedia Británica* y, cuando yo era pequeño, [mi padre] solía sentarme en su regazo y leerme algunas páginas. Por ejemplo, podíamos estar leyendo algo sobre los dinosaurios, y probablemente hablaría del *Brontosaurus* o algo parecido, o del *Tyrannosaurus rex*, y diría algo parecido a esto: «Este

animal mide diez metros de altura y la cabeza mide dos metros», ya saben ustedes. Entonces él dejaba de leer y decía: «Veamos lo que eso significa. Significa que si el *tyrannosaurus* estuviese en el jardín delantero tendría la altura suficiente para introducir la cabeza por la ventana pero no podría hacerlo porque su cabeza sería demasiado ancha y rompería la ventana al intentarlo».

Todo lo que leíamos se traducía de la mejor forma que podíamos en algo real y así es como aprendí a trabajar: trato de hacerme una imagen de cualquier cosa que leo, de lo que realmente quiere decir, traduciéndolo de esta forma; así que [risas] solía leer la *Enciclopedia* cuando era muchacho pero con traducción, ya ven, y resultaba muy excitante e interesante pensar que había animales de ese tamaño. No tenía miedo de que uno fuera a entrar por mi ventana, no lo creo; más bien pensaba que resultaba enormemente interesante que todos ellos hubieran muerto y en esa época nadie sabía por qué.

Solíamos ir a las Montañas Catskill. Vivíamos en Nueva York y las Montañas Catskill eran un lugar de veraneo: había allí un grupo numeroso de personas. Los padres de familia seguían trabajando en Nueva York y venían a pasar los fines de semana. Cuando venía mi padre me llevaba a dar paseos por el bosque y me contaba las cosas interesantes que allí pasaban, y que explicaré en seguida. Viendo esto, las otras madres pensaban que era maravilloso y que los otros padres también deberían llevar a sus hijos a dar un paseo. Ellas trataron de convencer a sus maridos pero estos se negaron al principio y pretendían que mi padre llevase a todos los niños, pero él no quería porque tenía una relación muy especial conmigo —nos

unía algo muy personal—, de modo que al final los otros padres tuvieron que llevar de paseo a sus hijos el fin de semana siguiente. Y el lunes siguiente, cuando todos habían vuelto a su trabajo, los chicos estábamos jugando en el campo y uno me dijo: « ¿A que no sabes qué tipo de pájaro es ese que hay ahí?». Y yo le dije: «No tengo la menor idea de qué tipo de pájaro es». Él dijo: «Es un tordo de garganta marrón», o algo así; «tu padre no te cuenta nada». Pero era todo lo contrario: mi padre me había enseñado. Mirando a un pájaro decía: « ¿Sabes qué pájaro es ese? Es un tordo de garganta marrón; pero en portugués es un... en italiano un...», decía, «en chino es un..., en japonés un...», etc. «Ahora sabes qué nombre tiene ese pájaro en todos los idiomas que quieras —decía—, pero cuando hayas acabado con eso no sabrás absolutamente nada sobre el pájaro. Solo sabrás cómo llaman al pájaro los seres humanos de diferentes lugares. Ahora —concluía—, miremos al pájaro».

Me había enseñado a fijarme en las cosas. Un día estaba yo jugando con lo que llamamos un vagón exprés, que es un vagón pequeño que va por un raíl circular para que los niños jueguen tirando de él. Tenía dentro una bola —lo recuerdo bien— y me fijé en un detalle del movimiento de la bola, así que le dije a mi padre: «Papá, he notado algo: cuando tiro del vagón la bola rueda hacia la parte trasera, y cuando estoy tirando y de repente dejo de hacerlo, la bola rueda hacia la parte delantera —y añadí—: ¿por qué pasa eso?». Él me dijo: «Nadie lo sabe. Hay un principio general que dice que las cosas que están en movimiento tratan de seguir en movimiento, y las cosas que están en reposo tienden a permanecer en reposo a

menos que ejerzas una fuerza sobre ellas. —Y concluyó—: Esta tendencia se llama inercia pero nadie sabe por qué es verdad». Eso es un conocimiento profundo: él no me dio un nombre, él sabía la diferencia entre saber el nombre de algo y saber algo, y yo lo aprendí muy pronto. Siguió diciendo: «Si te fijas bien verás que no es la bola la que rueda hacia la parte trasera del vagón, sino que es la parte trasera del vagón del que tú estás tirando la que avanza hacia la bola; verás que la bola sigue quieta o que quizá empieza a moverse debido a la fricción, pero en realidad se mueve hacia delante y no hacia atrás». Así que volví corriendo al vagón, puse la bola de nuevo, tiré del vagón y miré de lado, y vi que él tenía razón: la bola nunca se movía hacia atrás en el vagón cuando yo tiraba del vagón hacia delante. Se movía hacia atrás con respecto al vagón, aunque se movía ligeramente hacia delante con respecto al suelo, simplemente [porque] el vagón la arrastraba con él. Así es como me educó mi padre, con este tipo de ejemplos y discusiones, sin presiones, solo con agradables e interesantes discusiones.

§. Álgebra para el hombre práctico

Mi primo, que tenía tres años más que yo, estaba en el instituto de enseñanza secundaria; tenía bastantes dificultades con el álgebra y le habían puesto un profesor particular, y a mí me permitían sentarme en un rincón mientras [risas] el profesor trataba de enseñar álgebra a mi primo: problemas de esos de $2x$ más algo. Entonces le dije a mi primo: «¿Qué estás tratando de hacer? Sabes, le he oído hablar de x ». Él dijo: «Qué sabrás tú: $2x + 7$ es igual a 15, y

estoy tratando de averiguar cuánto vale x ». «Quieres decir 4», le dije. Él dijo: «Sí, pero tú lo has hecho por aritmética, y hay que hacerlo por álgebra». Por eso es por lo que mi primo nunca fue capaz de hacer álgebra: porque no entendía cómo se suponía que tenía que hacerlo. No había manera. Afortunadamente yo aprendí álgebra sin ir a la escuela y sabiendo que la idea general consistía en averiguar cuánto valía x y que daba igual cómo lo hicieras; todo eso de hacerlo por aritmética o hacerlo por álgebra era algo que se habían inventado en la escuela para que los niños que tienen que estudiar álgebra puedan aprobarla. Se habían inventado un conjunto de reglas tales que si uno las seguía mecánicamente podía llegar a la respuesta: restar 7 de ambos miembros, si hay un factor común que multiplica dividir ambos miembros por dicho factor, y todo eso, y una serie de pasos mediante los que uno podía llegar a la respuesta aunque no entendiera lo que estaba tratando de hacer.

Había una colección de libros de matemáticas que empezaba por *Aritmética para el hombre práctico*, seguía con *Álgebra para el hombre práctico*, y luego *Trigonometría para el hombre práctico*, y allí aprendí la trigonometría para el hombre práctico. Pronto la olvidé porque no la entendía muy bien, pero la colección continuaba y la biblioteca iba a adquirir el *Cálculo para el hombre práctico*. En aquella época supe, por la lectura de la *Enciclopedia*, que el cálculo infinitesimal era una materia importante y que debería estudiarlo. Ahora era mayor, tenía quizá trece años; finalmente apareció el libro de cálculo y yo estaba tan excitado que fui a la biblioteca a sacarlo y la bibliotecaria me miró y dijo: «Pero ¡si solo eres un niño! ¿Qué

haces sacando este libro? Este libro es un [libro para adultos]». Aquella fue una de las pocas veces en mi vida que me he sentido incómodo, y mentí y dije que era para mi padre, que él lo había seleccionado. Así que lo llevé a casa y aprendí en él el cálculo infinitesimal y traté de explicárselo a mi padre, pero él leyó el principio y lo encontró confuso. Eso realmente me molestó un poco: yo no sabía que él tuviese esa limitación, ya saben, que él no lo entendía; yo pensaba que era relativamente sencillo y directo y él no lo entendía. Y entonces me di cuenta por vez primera que en algo yo había aprendido más que él.

§. Charreteras y el Papa

Una de las cosas que me enseñó mi padre además de física [risas], fuera correcta o no, fue a tener una falta de respeto por lo respetable... por cierto tipo de cosas. Por ejemplo, cuando yo era niño y por primera vez salió un fotograbado en *The New York Times*, él me sentó en sus rodillas, como solía hacer, abrió la página y allí había una foto del Papa con todo el mundo inclinado ante él. Y él dijo: «Mira estos hombres. Aquí hay un hombre de pie, y todos los demás están inclinados. ¿Cuál es la diferencia? Este es el Papa. —Él odiaba al Papa en cualquier caso y decía—: la diferencia está en las charreteras». No en el caso concreto del Papa, por supuesto, sino cuando aparecía un general; pero siempre había un uniforme, una postura. «Este hombre tiene los mismos problemas, come lo mismo que cualquier otro, va al baño, tiene los mismos problemas que todo el mundo, es un ser humano. ¿Por qué se inclinan ante él? Solo por

su nombre y su posición, por su uniforme, no por algo especial que él haya hecho, ni por su honor ni nada parecido». Dicho sea de paso, mi padre se dedicaba al negocio de los uniformes, de modo que sabía cuál era la diferencia entre un hombre sin uniforme y un hombre con uniforme: para él eran el mismo hombre.

Él se sentía feliz conmigo, creo yo. Una vez, sin embargo, cuando regresé del MIT —había permanecido allí algunos años— me dijo: «Ahora que te has instruido en estas cosas, hay una pregunta que siempre me hice y que nunca entendí muy bien; así que, ahora que tú lo has estudiado, me gustaría hacértela para que me la expliques». Yo le pregunté de qué se trataba, y él dijo que entendía que cuando un átomo hace una transición de un estado a otro emite una partícula de luz llamada fotón. «Eso es correcto», dije. Y él replicó: «Bien, pero ¿está el fotón en el átomo antes de salir, o no hay ningún fotón de entrada?». Contesto: «No hay ningún fotón dentro; se produce precisamente cuando el electrón hace una transición» y él pregunta: «Bien, ¿de dónde procede entonces, de dónde sale?». No pude decirle simplemente que «La idea es que el número de fotones no se conserva; los fotones se crean precisamente por el movimiento del electrón». No pude explicarle algo parecido a esto: el sonido que hago ahora no estaba dentro de mí. No es como mi hijo pequeño que cuando empezó a hablar dijo de repente que ya no podía decir una determinada palabra —la palabra era «gato»— porque en su bolsa de palabras se había agotado la palabra gato [risas]. Nadie tiene dentro una bolsa de palabras que vaya gastando a medida que salen: uno simplemente hace las

palabras sobre la marcha; y en el mismo sentido no hay una bolsa de fotones en un átomo, y cuando los fotones salen no vienen de ninguna parte. Pero yo no pude hacerlo mucho mejor. Él no quedó satisfecho conmigo en este aspecto porque yo nunca fui capaz de explicar ninguna de las cosas que él no entendía [risas]. Así que él no tuvo éxito: me envió a todas estas universidades para descubrir estas cosas y nunca las descubrió [risas].

§. Invitación a la bomba

[Mientras estaba trabajando en su tesis doctoral, Feynman fue invitado a unirse al proyecto para el desarrollo de la bomba atómica]. Era algo completamente diferente. Significaba que tendría que dejar la investigación que estaba haciendo, que era el deseo de mi vida, y robar tiempo para dedicárselo a esto que yo sentía que debía hacer para proteger a la civilización. ¿De acuerdo? Así que tuve que debatir esto conmigo mismo. Mi primera reacción fue que no quería interrumpir mi trabajo normal para hacer este otro trabajo extraño. Por supuesto, también estaba el problema moral de todo lo implicado con la guerra. Yo no tendría mucho que ver con esto, pero me asusté cuando me di cuenta de cuál sería el arma, y comprendí que, puesto que podía ser posible, debía ser posible. Por todo lo que yo sabía, si nosotros podíamos construirla, ellos también podrían, y por lo tanto era muy importante tratar de cooperar.

[A comienzos de 1943 Feynman se unió al equipo de Oppenheimer en Los Álamos]. Respecto a las cuestiones morales, me gustaría decirles algo. La razón original para poner en marcha el proyecto,

que era que los alemanes constituían un peligro, me involucró en un proceso que trataba de desarrollar este primer sistema en Princeton y luego en Los Álamos; que trataba de hacer que la bomba funcionase. Se habían hecho todo tipo de intentos por rediseñarla para hacer de ella una bomba más potente y todo eso. Era un proyecto en el que todos trabajamos muy duro, en cooperación. Y una vez que uno ha decidido hacer un proyecto como este, sigue trabajando para conseguir el éxito. Pero lo que yo hice —diría que de forma inmoral— fue olvidar la razón por la que dije que iba a hacerlo; y así, cuando la derrota de Alemania acabó con el motivo original, no se me pasó por la cabeza nada de esto, que este cambio significaba que tenía que reconsiderar si iba a continuar en ello. Simplemente no lo pensé, ¿de acuerdo?

§. Éxito y sufrimiento

[El 6 de agosto de 1945 la bomba atómica fue arrojada sobre Hiroshima]. La única reacción que recuerdo —quizá yo estaba cegado por mi propia reacción— fue una euforia y una excitación muy grandes. Había fiestas y gente que bebía para celebrarlo. Era un contraste tremendamente interesante: lo que estaba pasando en Los Álamos y lo que al mismo tiempo pasaba en Hiroshima. Yo estaba envuelto en esta juerga, bebiendo también y tocando borracho un tambor sentado en el capó de un Jeep; tocando el tambor con excitación mientras recorriamos Los Álamos al mismo tiempo que había gente muriendo y luchando en Hiroshima.

Experimenté una reacción muy fuerte y extraña después de la guerra —quizá por la propia bomba y quizá por alguna otra razón psicológica, pues acababa de perder a mi mujer— pero recuerdo que estaba en Nueva York con mi madre en un restaurante, inmediatamente después [de Hiroshima], y estaba pensando en Nueva York. Yo sabía el tamaño que tenía la bomba de Hiroshima, la gran superficie que había destruido y todo eso, y me di cuenta de que allí donde estábamos —no lo sé muy bien, quizá en la Calle 59— todo quedaría barrido si cayese una bomba en la Calle 34, y todas estas personas morirían y todas las cosas serían destruidas; y que no había solamente una bomba disponible sino que era fácil seguir haciéndolas; y que, por consiguiente, estábamos condenados porque tuve la sensación —muy temprana, mucho antes que otros que fueron más optimistas— de que las relaciones internacionales y la forma en que la gente se estaba comportando no eran diferentes de lo que habían sido antes y que todo iba a seguir igual, y por eso estaba seguro de que esas armas iban a seguir utilizándose muy pronto. Por ello me sentía muy incómodo y pensé, realmente lo creí, que todo era estúpido: veía gente construyendo un puente y decía «no lo entienden». Realmente creía que era absurdo hacer cualquier cosa porque todo sería destruido muy pronto, pero ellos no lo entendían. Y yo tenía esta idea muy extraña, y cuando veía cualquier construcción pensaba siempre que estaban locos por tratar de hacer algo. De modo que caí realmente en una especie de estado depresivo

§. «Yo no tengo que hacerlo bien porque ellos piensen que voy a hacerlo bien»

[Después de la guerra Feynman se unió a Hans Bethe³ en la Universidad de Cornell. Rechazó la oferta de un trabajo en el Instituto de Estudios Avanzados en Princeton]. Ellos [debieron] pensar que yo recibiría encantado una oferta de trabajo como esta, pero yo no estaba encantado, y así comprendí un nuevo principio: que yo no soy responsable de lo que otras personas piensen que puedo hacer, que no tengo que hacerlo bien porque ellos piensen que voy a hacerlo bien. Y de un modo u otro pude relajarme y pensé para mí que no había hecho nada importante y nunca iba a hacer nada importante. Pero solía disfrutar de la física y las matemáticas, y puesto que solía jugar con ellas, muy pronto desarrollé las cosas por las que más tarde gané el Premio Nobel⁴.

§. El Premio Nobel: ¿valió la pena?

[Feynman ganó un Premio Nobel por su trabajo sobre electrodinámica cuántica]. Lo que hice en esencia —y también lo hicieron, independientemente, otras dos personas [Sin-Itiro]Tomonaga en Japón y [Julian] Schwinger— fue imaginar la forma de controlar, de analizar y discutir la teoría cuántica original de la electricidad y magnetismo que había sido elaborada en 1928; cómo interpretarla para evitar los infinitos, para hacer cálculos de los que se pudieran

³ Hans Bethe (n. 1906) ganó el Premio Nobel de Física en 1967 por sus contribuciones a la teoría de las reacciones nucleares, en especial por sus descubrimientos concernientes a la producción de energía en las estrellas. (*N. del e.*)

⁴ En 1965, el Premio Nobel de Física fue compartido por Richard Feynman, Julian Schwinger y Sin-Itiro Tomonaga por su trabajo fundamental en electrodinámica cuántica, y sus profundas implicaciones para la física de partículas. (*N. del e.*)

obtener resultados razonables que luego han resultado estar en completo acuerdo con todos los experimentos que se han hecho hasta ahora, de modo que la electrodinámica cuántica encaja con los experimentos en todos los detalles dentro de su marco de aplicación —cuando no haya implicadas fuerzas nucleares, por ejemplo— y fue por ese trabajo que hice en 1947 para imaginar cómo hacerlo por el que gané el Premio Nobel.

[BBC: *¿Valió la pena el Premio Nobel?*] Tanto como un [risas]... no sé nada sobre el Premio Nobel, no entiendo qué es o para qué sirve, pero si las personas que hay en la Academia sueca deciden que x , y o z gana el Premio Nobel, entonces así sea. No quiero tener nada que ver con el Premio Nobel... es un grano en el... [risas]. No me gustan los honores. Lo aprecio por el trabajo que hice, y por las personas que lo aprecian, y sé que hay muchos físicos que utilizan mi trabajo. No necesito más, no creo que tenga más sentido que ese. No veo qué importancia puede tener que alguien en la Academia sueca decida que este trabajo es lo bastante bueno como para recibir un premio. Yo ya he tenido mi premio. El premio está en el placer de descubrir, en la excitación del descubrimiento, en observar que otras personas lo utilizan [mi trabajo]: esas son cosas reales, los honores no son reales para mí. No creo en los honores, eso me fastidia, los honores me fastidian, los honores son las charreteras, los honores son los uniformes. Así es como me educó mi padre. No puedo soportarlo, me duele.

Cuando estaba en el instituto de secundaria, uno de los primeros honores que obtuve consistió en ser miembro de los Arista, que es

un grupo de niños que sacan buenas notas, ¿eh? Todo el mundo quería ser miembro de los Arista, y cuando entré en los Arista descubrí que lo que hacían en sus reuniones era sentarse y discutir quién más era digno de unirse a este maravilloso grupo que éramos nosotros, ¿entienden? Así que nos sentábamos y tratábamos de decidir a quién se iba a admitir en los Arista. Este tipo de cosas — los honores— me molesta psicológicamente por alguna razón que yo mismo no puedo entender, y desde entonces hasta hoy siempre me ha molestado. Cuando me convertí en miembro de la Academia Nacional de Ciencias, tuve que renunciar finalmente porque era otra organización que gastaba la mayor parte del tiempo en decidir quién era suficientemente ilustre para unirse a ella, para que se le admitiera en nuestra organización, incluyendo cuestiones tales como si los físicos deberíamos unirnos porque hay un químico muy bueno al que ellos tratan de introducir y no hay plazas suficientes y tal y tal. ¿Qué problema hay con los químicos? Todo estaba podrido porque el objetivo principal era el decidir quién podría tener este honor, ¿comprenden? No me gustan los honores.

§. Las reglas del juego

[Desde 1950 hasta 1988 Feynman fue profesor de física teórica en el Instituto de Tecnología de California]. Una forma, una analogía divertida para hacerse una idea de lo que estamos haciendo cuando tratamos de entender la naturaleza, consiste en imaginar que los dioses están jugando una gran partida de ajedrez, pongamos por caso, y nosotros no conocemos las reglas del juego. Pero se nos

permite mirar el tablero, al menos de vez en cuando, quizá en una pequeña esquina, y a partir de estas observaciones tratamos de imaginar cuáles son las reglas del juego, cuáles son las reglas para mover las piezas. Al cabo de un tiempo podríamos descubrir, por ejemplo, que cuando hay solo un alfil en el tablero, este alfil siempre se mueve por casillas del mismo color. Más adelante podríamos descubrir que la ley para el movimiento del alfil consiste en que este se mueve en diagonal, lo que explicaría la ley que descubrimos antes —que el alfil estaba siempre en una casilla del mismo color— y eso sería análogo a descubrir una ley y más adelante obtener una comprensión más profunda de la misma. Luego pueden suceder cosas, todo va bien, hemos obtenido todas las leyes, todo parece muy bien; y entonces, de repente, ocurre un fenómeno extraño en algún rincón, así que empezamos a investigarlo: es un enroque, algo que no esperábamos. Dicho sea de paso y en física fundamental siempre estamos tratando de investigar aquellas cosas de las que no entendemos las conclusiones. Una vez que las hemos puesto a prueba suficientemente, estamos conformes.

Lo que resulta más interesante es aquello que no encaja, la parte que no procede según lo que uno esperaba. Además, podríamos tener revoluciones en física: una vez que hemos advertido que los alfiles se mueven por casillas del mismo color y se mueven en diagonal y así sucesivamente durante mucho tiempo, y todo el mundo sabe que esto es verdad, entonces uno descubre repentinamente un día en cierta partida de ajedrez que el alfil no sigue en una casilla del mismo color, que ha cambiado de color.

Solo más tarde descubrimos una nueva posibilidad, que un alfil haya sido capturado y que un peón haya coronado para dar lugar a un nuevo alfil (lo que puede suceder pero no lo sabíamos). Así que esto se parece mucho a cómo son nuestras leyes: a veces parecen definitivas, siguen funcionando y luego, de repente, algún truco muestra que eran erróneas y entonces tenemos que investigar las condiciones en las que sucedió el cambio de color de este alfil, y así sucesivamente. Y poco a poco aprendemos la nueva regla que lo explica con mayor profundidad. Sin embargo, a diferencia del juego de ajedrez, en el que las reglas se hacen más complicadas a medida que uno avanza, en física todo parece más simple cuando uno descubre cosas nuevas. Parece más complicado en conjunto porque abarcamos más —esto es, aprendemos acerca de más partículas y más cosas nuevas— y por eso las leyes parecen complicarse de nuevo. Pero si uno se fija bien, es algo maravilloso pues, aunque extendamos nuestra experiencia a regiones cada vez más inexploradas, de cuando en cuando obtenemos estas síntesis en las que todo encaja de nuevo en algo unificado, en donde todo resulta ser más simple de lo que parecía antes.

Si ustedes están interesados en el carácter último del mundo físico, o del mundo entero, nuestra única forma de comprenderlo por el momento es mediante un razonamiento de tipo matemático. Por eso yo no creo que una persona pueda apreciar por completo, ni siquiera que pueda apreciar mucho de estos aspectos concretos del mundo y del carácter profundamente universal de las leyes y de las relaciones entre las cosas, sin tener una comprensión de las

matemáticas. Yo no conozco otra forma de hacerlo, no conocemos ninguna otra forma de describirlo con exactitud... o de ver las interrelaciones si no es con ellas. Así que no creo que una persona que no haya desarrollado cierto sentido matemático sea capaz de apreciar por completo este aspecto del mundo. No me malinterpreten: existen muchísimos aspectos del mundo para los que las matemáticas no son necesarias; aspectos tales como el amor, que son deliciosos y maravillosos de apreciar y hacia los que se puede sentir temor y misterio. No pretendo decir que lo único que hay en el mundo sea la física, pero ustedes estaban hablando de física y si es de eso de lo que están hablando, entonces, el no saber matemática es una grave limitación para entender el mundo.

§. Rompiendo átomos

Bien, en lo que estoy trabajando ahora en física es en un problema especial con el que nos hemos encontrado. Voy a describir de qué se trata. Ustedes saben que todo está hecho de átomos, ya hemos descubierto eso hace tiempo y la mayoría de la gente ya sabe que el átomo tiene un núcleo rodeado de electrones. El comportamiento de los electrones en el exterior es ahora completamente [conocido]; se entienden bien las leyes para ello hasta donde podemos afirmar en esta electrodinámica cuántica de la que les he hablado. Y una vez que eso se desarrolló, entonces el problema era: ¿cómo funciona el núcleo, cómo interaccionan las partículas, cómo se mantienen unidas? Uno de los productos secundarios fue el descubrimiento de la fisión y la construcción de la bomba. Pero la investigación de las

fuerzas que mantienen unidas a las partículas nucleares era una larga tarea. Al principio se pensaba que era un intercambio de cierto tipo de partículas en el interior, llamadas piones, que fueron inventadas por Yukawa, y se predijo que si haces chocar protones — el protón es una de las partículas del núcleo— contra un núcleo, entonces golpeas en estos piones y, con toda seguridad, salen tales partículas.

No solo salían piones, sino también otras partículas, y empezábamos a agotar los nombres: kaones y sigmas y lambdas y todo eso; ahora se denomina a todos hadrones. Y a medida que aumentábamos la energía de la reacción obteníamos cada vez más tipos diferentes, hasta que había cientos de tipos de partículas diferentes; entonces el problema, por supuesto —este periodo dura de 1940 a 1950, hasta hoy—, era encontrar el esquema que había detrás de ello. Parecía haber muchas relaciones y muchas pautas interesantes entre las partículas, hasta que se desarrolló una teoría para explicar estas pautas: que todas estas partículas estaban hechas realmente de alguna otra cosa, que estaban hechas de objetos llamados quarks —tres quarks, por ejemplo, formaban un protón— y que el protón es una de las partículas del núcleo; otra es un neutrón. Hay diferentes variedades de quarks: de hecho, al principio solo se necesitaban tres para explicar todos los centenares de partículas y los diferentes tipos de quarks (se llamaban tipo-u, tipo-d, tipo-s). Dos quarks u y un quark d forman un protón, dos quarks d y un quark u forman un neutrón. Si se movieran de un modo diferente en el interior formarían otra partícula. Entonces

surgió el problema: ¿cuál es exactamente el comportamiento de los quarks y qué es lo que les mantiene unidos? Y se ideó una teoría que es muy sencilla, una analogía muy estrecha con la electrodinámica cuántica —no exactamente igual pero muy parecida— en la que los quarks son los análogos del electrón y las partículas denominadas gluones son los análogos de los fotones que se intercambian entre los electrones y dan lugar a las fuerzas eléctricas. Las matemáticas eran muy similares aunque hay algunos términos ligeramente diferentes. La diferencia en la forma de las ecuaciones que se conjeturaron residía en que dichas conjeturas estaban guiadas por principios de belleza y simplicidad tales que no son arbitrarias sino que están casi completamente determinadas. Lo que es arbitrario es cuántos tipos diferentes de partículas existen, pero no el carácter de la fuerza entre ellas.

Ahora hay una diferencia con la electrodinámica, en la que dos electrones pueden ser separados tanto como uno quiera; de hecho, cuanto más separados están, más débil es la fuerza. Si esto fuera verdad para los quarks, uno esperaría que cuando se hicieran chocar objetos con energía suficiente tendrían que salir quarks. Pero lo que sucede, por el contrario, es que cuando se hace un experimento con la energía suficiente para que pudieran salir quarks, lo que se encuentra en su lugar es un gran chorro; es decir, todas las partículas salen en la misma dirección que los viejos hadrones, pero no salen quarks. Y a partir de la teoría estaba claro que lo que se necesitaba era que, en cuanto se producen los quarks,

se formen estos nuevos pares de quarks, se unan en pequeños grupos y formen hadrones.

La pregunta es: ¿por qué esto es tan diferente de lo que sucede en electrodinámica, cómo es posible que estas pequeñas diferencias, estos pequeños términos que son diferentes en la ecuación produzcan efectos tan diferentes, efectos completamente diferentes? De hecho, tan sorprendente resultaba para casi todo el mundo que esto se produjera que al principio se pensó que la teoría era falsa, pero cuanto más se estudiaba más clara resultaba la posibilidad de que estos términos extra produjeran estos efectos. Ahora estamos en una situación que es diferente de cualquier otra en la historia de la física, es totalmente diferente. Tenemos una teoría, una teoría completa y definida de todos estos hadrones, y tenemos un número enorme de experimentos y montones y montones de detalles, de modo que ¿por qué no podemos poner a prueba ya la teoría y descubrir si es correcta o falsa? Porque lo que tenemos que hacer es calcular las consecuencias de la teoría. ¿Qué debería suceder si esta teoría es correcta? ¿Y qué es lo que ha sucedido? Bien, esta vez la dificultad está en el primer paso. Si la teoría es correcta, lo que debería suceder es muy difícil de calcular. Las matemáticas necesarias para calcular cuáles son las consecuencias de esta teoría han resultado ser, por el momento, de una dificultad insuperable. Por el momento, ¿de acuerdo? Y entonces es obvio cuál es mi problema: mi problema es tratar de desarrollar una forma de obtener números de esta teoría, de ponerla a prueba con mucho

detalle, y no solo cualitativamente, para ver si podría dar el resultado correcto.

He pasado algunos años tratando de inventar matemáticas que me permitieran resolver las ecuaciones, pero no llegué a ninguna parte, y entonces decidí que para hacerlo debo comprender primero qué aspecto aproximado va a tener la respuesta. Es difícil explicar esto muy bien, pero tenía que hacerme una idea cualitativa de cómo funciona el fenómeno antes de que pudiera hacerme una buena idea cuantitativa. En otras palabras, la gente ni siquiera comprendía aproximadamente cómo funcionaba, y por eso he estado trabajando recientemente, en el último o en los dos últimos años, en entender aproximadamente cómo funciona, no todavía de una forma cuantitativa, con la esperanza de que en el futuro esa comprensión aproximada pueda refinarse en una herramienta matemática precisa, en una forma o algoritmo para ir de la teoría a las partículas. Ya ven que estamos en una posición divertida: no es que estemos buscando la teoría, tenemos la teoría —una candidata muy buena— pero estamos en ese paso de la ciencia en que necesitamos comparar la teoría con los experimentos, ver cuáles son las consecuencias y comprobarlas. Estamos atascados en ver cuáles son las consecuencias, y mi objetivo, mi deseo, es ver si yo puedo desarrollar una forma de calcular cuáles son las consecuencias de esta teoría [risas]. Es una situación para volverse loco, tener una teoría de la que no puedes desarrollar las consecuencias de... no puedo soportarlo, tengo que entenderlo. Algún día, quizá.

§. «Que lo haga George»

Para hacer un trabajo realmente bueno en física necesitas mucho tiempo, porque cuando estás reuniendo ideas que son vagas y difíciles de recordar, eso es muy parecido a construir un castillo de naipes y cada uno de los naipes es frágil, y si olvidas uno de ellos todo se viene abajo. No sabes cómo llegaste allí y tienes que construirlo de nuevo, y si te interrumpen olvidas cómo se unieron los naipes. Tus naipes son partes de tipos diferentes de ideas, partes que hay que juntar para construir la idea general. Tú pones todo junto, es una torre y es fácil que se venga abajo, hace falta un montón de concentración —esto es, mucho tiempo para pensar— y si te han asignado un trabajo de administración o algo parecido, entonces no tienes el tiempo necesario. Así que yo me he inventado otro mito: el de que soy irresponsable. Digo a todo el mundo que no voy a hacer nada. Si alguien me pide que esté en un comité para ocuparme de las admisiones, digo que no, que yo soy irresponsable y me importan un bledo los estudiantes —por supuesto que sí me importan los estudiantes, pero sé que otro lo hará— y adopto la postura «Que lo haga George», una postura que se supone que no vas a adoptar porque no está bien hacerlo, pero yo lo hago porque me gusta hacer física y quiero ver si aún puedo hacerla, así que soy egoísta, ¿de acuerdo? Yo quiero hacer mi física.

§. Aburrido de la historia

Todos esos estudiantes están en el aula; ahora ustedes me preguntan: ¿Cuál sería la mejor forma de enseñarles? ¿Debería

enseñarles desde el punto de vista de la historia de la ciencia, o partiendo de las aplicaciones? Mi teoría es que la mejor forma de enseñar es no tener ninguna filosofía, ser caótico y mezclarlo todo en el sentido de que uno utiliza todas las formas posibles de hacerlo. Esa es la única forma en que puedo ver una respuesta, enganchar a este o aquel muchacho con ganchos diferentes sobre la marcha, pues mientras el alumno que está interesado en la historia se está aburriendo con las matemáticas abstractas, aquel a quien le gustan las abstracciones se está aburriendo con la historia; si consigues que no se aburran todos, todo el tiempo, mejor que mejor. Realmente yo no sé cómo hacerlo. No sé cómo responder a esta cuestión de los diferentes tipos de mentes con diferentes tipos de intereses: no sé qué es lo que les engancha, lo que les hace interesarse, no sé cómo guiarles para que se interesen. Una forma es recurrir a la imposición, tú tienes que superar este curso, tienes que pasar este examen. Es una forma muy efectiva. Mucha gente pasa así por la escuela y quizá sea una forma efectiva. Lo siento: después de muchos, muchísimos años de tratar de enseñar y tratar todo tipo de métodos diferentes, realmente no sé cómo hacerlo.

§. De tal palo, tal astilla

Cuando yo era un muchacho disfrutaba mucho cuando mi padre me contaba cosas, de modo que traté de contar a mi hijo cosas interesantes acerca del mundo. Cuando él era muy pequeño solíamos llevarle a la cama, ya saben, y contarle historias, y yo inventé una historia acerca de unas personas pequeñas que

merodeaban por allí, [que] iban a picnics y todo eso y vivían en el ventilador; y atravesaban unos bosques con unos objetos largos y azules parecidos a árboles, pero sin hojas y solo con un tronco, y tenían que andar entre ellos y cosas así; y él poco a poco comprendió que eso era la alfombra, el pelo de la alfombra, la alfombra azul, y a él le encantaba este juego porque yo describía todas estas cosas desde un punto de vista singular y le gustaba oír las historias. Pasaban todo tipo de cosas maravillosas: incluso había una cueva húmeda donde el viento entraba y salía; entraba frío y salía caliente y todo así. Resulta que estaban dentro de la nariz del perro, y entonces yo podía hablarle de la fisiología y todo eso. A él le gustaba y así le conté montones de cosas; y yo disfrutaba porque le estaba contando cosas que me gustaban y nos divertíamos cuando él conjeturaba lo que pasaba y todo eso. Luego tuve una hija e intenté lo mismo con ella. Pues bien, la personalidad de mi hija era diferente: ella no quería oír esta historia, quería que le repitiera de nuevo la historia que estaba en el libro, y que se la leyera otra vez. Ella quería que le leyera, no que inventara historias; tiene una personalidad diferente. Y por eso, si dijera que un buen método para enseñar ciencia a los niños consiste en inventar estas historias de personas pequeñas, tendría que decir también que eso no funciona en absoluto en el caso de mi hija —pero resulta que funcionó con mi hijo—, ¿de acuerdo?

§. «Ciencia que no es una ciencia...»

Debido al éxito de la ciencia, existe, pienso yo, un tipo de pseudociencia. Las ciencias sociales son un ejemplo de una ciencia que no es ciencia. No hacen [cosas] de forma científica, solo siguen las formas: recogen datos, hacen esto y aquello y todo lo demás, pero no llegan a ninguna ley, no han descubierto nada. No han llegado a ninguna parte todavía; quizá lleguen algún día, pero todavía no están muy desarrolladas, lo que sucede está en un nivel todavía más trivial. Tenemos expertos en todo que parece que fueran expertos científicos. No son científicos, se sientan ante una máquina de escribir y dicen algo parecido a «el alimento producido con fertilizante orgánico es mejor para usted que el alimento producido con fertilizante inorgánico»; quizá sea cierto o quizá no, pero no ha sido demostrado ni en un sentido ni en el otro. Pese a todo, siguen sentados ahí delante de la máquina de escribir como si fuera ciencia y entonces se convierten en expertos en alimentos, alimentos orgánicos y todo eso. Hay todo tipo de mitos y pseudociencia por todas partes.

Quizá yo esté equivocado y quizá ellos sepan todas estas cosas, aunque yo no creo que esté equivocado. Ya ven, tengo la ventaja de haber descubierto lo duro que es llegar a conocer algo realmente, cuánto cuidado hay que poner en comprobar los experimentos, qué fácil es cometer errores y engañarse a uno mismo. Yo sé lo que significa saber algo, y por eso cuando veo cómo obtienen ellos su información no puedo creer que ellos lo sepan, no han hecho el trabajo necesario, no han hecho las comprobaciones necesarias, no han puesto el cuidado necesario. Tengo grandes sospechas de que

no saben nada, que esto es [falso] y ellos están intimidando a la gente. Así lo creo. No conozco muy bien el mundo pero eso es lo que yo creo.

§. Duda e incertidumbre

Si ustedes esperan que la ciencia dé respuestas a todas las preguntas maravillosas acerca de quiénes somos, a dónde vamos, cuál es el significado del universo y todo eso, creo que podrían desilusionarse fácilmente y buscar alguna respuesta mística a estos problemas. Yo no sé cómo un científico puede adoptar una respuesta mística porque la idea general es comprender; bien, no importa. En cualquier caso, yo no lo entiendo, pero en cualquier caso si uno piensa en ello, lo que yo creo que estamos haciendo es que estamos explorando, estamos tratando de descubrir tanto como podamos del mundo. La gente me dice: « ¿Está usted buscando las leyes últimas de la física? ». No, no estoy haciendo eso, simplemente estoy tratando de descubrir más sobre el mundo; y si resulta que hay una simple ley última que explique todo, así sea, eso sería muy bonito de descubrir.

Si resulta que es como una cebolla con millones de capas y nosotros simplemente estamos hartos y cansados de buscar en las capas, entonces así es. Pero cualquiera que sea su naturaleza, está allí y va a mostrarse como es; y, por consiguiente, cuando vamos a investigarla no deberíamos decidir por adelantado qué es lo que estamos tratando de hacer excepto que tratamos de descubrir más sobre ello. Si uno dice que su problema es tal, porque descubre más

sobre ello, si uno piensa que está tratando de descubrir más sobre ello porque así va a obtener una respuesta a alguna cuestión filosófica profunda, quizá está equivocado. Pudiera ser que no pueda obtenerse una respuesta a esa pregunta concreta por más cosas que descubramos sobre el carácter de la naturaleza, pero yo no lo veo así. Mi interés en la ciencia consiste simplemente en descubrir cosas sobre el mundo, y cuanto más descubro más me gusta descubrir.

Hay misterios muy notables en el hecho de que seamos capaces de hacer muchas más cosas de lo que los animales pueden hacer aparentemente, y otras cuestiones similares, pero esos son misterios que quiero investigar sin saber la respuesta a ellos. Y por eso tampoco puedo creer en esas historias especiales que se han construido sobre nuestra relación con el universo en general, porque parecen demasiado simples, demasiado hilvanadas, demasiado locales, demasiado provincianas. La Tierra, Él vino a la Tierra, una de las personas de Dios vino a la Tierra, imagínenselo y miren lo que hay ahí fuera. No está en proporción. En cualquier caso, no sirve de nada discutir, yo no puedo discutirlo, solo estoy tratando de decirles por qué las ideas científicas que yo tengo tienen algún efecto en mi creencia. Y hay otra cosa que tiene que ver con la cuestión de cómo descubres si algo es verdad; y si todas las religiones diferentes tienen teorías diferentes sobre eso mismo, entonces empiezas a hacerte preguntas. Una vez que uno empieza a dudar, como se supone que lo hace, ustedes me preguntan si la

ciencia es verdad. Uno dice no, no sabemos si es verdad, estamos tratando de descubrir y posiblemente todo sea falso.

Empezamos a entender la religión diciendo que posiblemente todo es falso. Veamos. En cuanto haces eso, empiezas a deslizarte por una pendiente que es difícil de remontar, y así sucesivamente. Con la visión científica, o la visión de mi padre, lo que deberíamos mirar es lo que es cierto y lo que puede ser o puede no ser cierto, una vez que empiezas a dudar. Pienso que esto es una parte muy fundamental de mi espíritu, dudar y preguntar, y cuando dudas y preguntas se hace un poco más difícil creer.

Ya ven cómo es la cosa, yo puedo vivir con duda e incertidumbre y sin saber. Pienso que es mucho más interesante vivir sin saber que tener respuestas que pudieran ser falsas. Yo tengo respuestas aproximadas y creencias posibles y grados diferentes de certeza sobre cosas diferentes, pero no estoy absolutamente seguro de nada y hay muchas cosas de las que no sé nada, tales como si significa algo preguntar por qué estamos aquí, y qué podría significar la pregunta. Yo pensaría un poco sobre ello y si no puedo entenderlo, entonces paso a otra cosa, pero no tengo que conocer una respuesta, no me siento aterrorizado por no conocer las cosas, por estar perdido en un universo misterioso carente de propósito, que así es realmente hasta donde yo alcanzo. No me asusta.

Capítulo 2

Los computadores del futuro

Cuarenta años después del bombardeo atómico de Nagasaki, Feynman, veterano del Proyecto Manhattan, pronuncia una conferencia en Japón. Pero ahora se trata de un tema pacífico que sigue ocupando a nuestras mentes más perspicaces: el futuro de los computadores, incluido el tema que hizo de Feynman un Nostradamus de la ciencia de la computación: el límite teórico inferior para el tamaño de un computador. Este capítulo puede constituir un desafío para algunos lectores; no obstante, es una parte tan importante de la contribución de Feynman a la ciencia que confío en que se tomen el tiempo necesario para leerlo, incluso si tienen que saltarse los puntos más técnicos. Termina con una breve explicación de una de las ideas favoritas de Feynman, que impulsó la revolución actual en la nanotecnología.

Contenido:

- §. Introducción
- §. Computadores paralelos
- §. Reducir la pérdida de energía
- §. Reducir el tamaño
- §. Preguntas y respuestas

§. Introducción

Es para mí un honor y un gran placer estar aquí como conferenciante en recuerdo de un científico al que he respetado y

admirado tanto como al profesor Nishina⁵. Venir a Japón para hablar sobre computadores es como pretender darle un sermón a Buda. Pero llevo algún tiempo pensando sobre computadores y este es el único tema que se me ocurrió cuando se me invitó a hablar.

Lo primero que me gustaría decir es de lo que no voy a hablar. Quiero hablar del futuro de los computadores. Pero no hablaré de los posibles desarrollos futuros más importantes. Por ejemplo, hay un gran trabajo por hacer en el desarrollo de máquinas más inteligentes, máquinas con las que podamos tener una relación más fácil de modo que el *input* y el *output* puedan lograrse con un esfuerzo menor que el que supone la compleja programación que hoy es necesaria. A esto se le suele llamar inteligencia artificial, pero a mí no me gusta ese nombre. Quizá las máquinas no inteligentes puedan hacerlo mejor incluso que las inteligentes.

Otro problema es la estandarización de los lenguajes de programación. Hoy hay demasiados lenguajes, y sería una buena idea escoger solo uno. (Dudo en mencionar esto en Japón, pues lo que sucederá es sencillamente que aparecerán más lenguajes estándar: ustedes ya tienen ahora cuatro formas de escribir, y los intentos por normalizar algo aquí dan como resultado aparente ¡más normas estándar y no menos!).

Otro problema futuro interesante en el que vale la pena trabajar pero del que no voy a hablar es el de los programas de depuración automática de errores. Depurar significa corregir los errores en un

⁵ Yoshio Nishina (1890-1951) fue el introductor en Japón de la mecánica cuántica que estudió y contribuyó a desarrollar durante su estancia en Europa a finales de los años veinte. Entre sus primeros discípulos se encontraban Hideki Yukawa y Sin-Itiro Tomonaga. Hasta la Segunda Guerra Mundial, el Laboratorio Nishina en Riken fue el centro más importante de física teórica en Japón. (*N. del t.*)

programa o en una máquina, y es sorprendentemente difícil corregir programas a medida que se van haciendo más complicados.

Otra vía de mejora consiste en hacer máquinas físicas tridimensionales en lugar de hacerlo todo en la superficie de un chip. Esto puede hacerse por etapas en lugar de hacerlo todo de una vez: se pueden tener varias capas y luego añadir muchas más capas con el paso del tiempo. Otro dispositivo importante sería uno que pudiese detectar automáticamente elementos defectuosos en un chip; entonces el chip se re cablearía automáticamente para evitar los elementos defectuosos. Actualmente, cuando tratamos de hacer grandes chips se suelen producir fallos o defectos en los mismos, y entonces desechamos el chip entero. Sería mucho más eficiente si pudiéramos aprovechar la parte efectiva del chip. Menciono estas cosas para decirles que soy consciente de cuáles son los problemas reales para las máquinas del futuro. Pero de lo que quiero hablar ahora es simplemente de algunas cosas técnica y físicamente válidas que, en teoría, pueden llevarse a cabo de acuerdo con las leyes físicas. En otras palabras, me gustaría discutir la propia maquinaria y no el modo en que utilizamos las máquinas.

Hablaré de algunas posibilidades técnicas para construir máquinas. Serán tres temas. Uno es el de las máquinas de procesamiento paralelo, que pertenece al futuro inmediato, casi actual, y que ahora empieza a desarrollarse. Más lejana está la cuestión del consumo energético de las máquinas, que ahora se plantea como una limitación, aunque realmente no lo es. Finalmente hablaré del tamaño. Siempre es mejor construir máquinas más pequeñas, y la

pregunta es: ¿hasta dónde es posible, en teoría, seguir haciendo máquinas más pequeñas según las leyes de la naturaleza? No discutiré cuáles de estas cosas aparecerán realmente en el futuro. Eso depende de problemas económicos y problemas sociales, y no voy a hacer conjeturas sobre estos.

§. Computadores paralelos

El primer tema se refiere a los computadores paralelos. Casi todos los computadores actuales, los computadores convencionales, trabajan basados en un diseño o una arquitectura ideada por Von Neumann⁶, dividida en una memoria muy grande que almacena toda la información, y una unidad central que hace cálculos simples. Tomamos un número de este lugar de la memoria y un número de aquel otro lugar, enviamos ambos números a la unidad aritmética central para sumarlos, y luego enviamos la respuesta a algún otro lugar de la memoria. Por consiguiente, hay efectivamente un procesador central que está trabajando intensamente y a gran velocidad, mientras que la memoria entera está allí como un fichero de acceso rápido que se usa muy raramente. Es obvio que si hubiese más procesadores trabajando al mismo tiempo deberíamos ser capaces de hacer cálculos con más rapidez. Pero el problema está en que alguien que pudiera estar utilizando un procesador podría estar utilizando alguna información de la memoria que algún otro necesita, y todo se hace muy confuso. Por estas razones se ha

⁶ John von Neumann (1903-1957), matemático húngaro-americano, reconocido como uno de los padres de los computadores. (*N. del e.*)

dicho que es muy difícil tener muchos procesadores trabajando en paralelo.

Se han dado algunos pasos en esta dirección en máquinas convencionales más grandes llamadas «procesadores vectoriales». Cuando en ocasiones haya que hacer exactamente el mismo paso en muchos puntos diferentes, quizá sea posible hacerlos al mismo tiempo. Se confía en poder escribir programas regulares de la forma ordinaria, y luego un programa intérprete descubrirá automáticamente cuándo es conveniente utilizar esta posibilidad vectorial. Esta idea se utiliza ya en el Cray y en los «supercomputadores» en Japón. Otro proyecto consiste en tomar lo que de hecho es un buen número de computadores relativamente simples (aunque no muy simples), y conectarlos todos juntos con una cierta estructura. Entonces cada uno de ellos puede trabajar en una parte del problema. Cada uno de ellos es realmente un computador independiente, y transferirá información a los demás a medida que uno u otro la necesite. Este tipo de esquema se ha utilizado en el Caltech Cosmic Cube, por ejemplo, y representa solo una entre muchas posibilidades. Mucha gente está construyendo ahora máquinas semejantes. Otro proyecto consiste en utilizar un número muy grande de procesadores centrales muy simples distribuidos por toda la memoria. Cada uno de los procesadores trabaja con solo una pequeña parte de la memoria y hay un complicado sistema de interconexiones entre ellos. Un ejemplo de una máquina semejante es la Connection Machine construida en el MIT. Tiene 64 000 procesadores y un sistema de direccionamiento

en el que cada grupo de 16 pueden hablar con otros 16, y por lo tanto tiene 4000 posibilidades de conexión de direccionamiento.

Parece que algunos problemas científicos como la propagación de ondas en determinado material serían muy fácilmente tratables por un procesamiento en paralelo. Esto es así porque lo que sucede en una región del espacio en un instante dado puede calcularse localmente y solo es necesario conocer las presiones y las tensiones en volúmenes vecinos. Estas pueden calcularse simultáneamente para cada volumen y estas condiciones de contorno pueden transmitirse a los distintos volúmenes. Por eso es por lo que este tipo de diseño funciona para problemas semejantes. Resulta que un gran número de problemas de todo tipo pueden trabajarse en paralelo. En cuanto el problema es lo bastante grande para que haya que hacer un montón de cálculos, la computación paralela puede acortar enormemente el tiempo necesario para llegar a una solución, y este principio no solo se aplica a problemas científicos.

¿Qué sucedió con el prejuicio que existía hace dos años en el sentido de que la programación paralela es difícil? Resulta que lo que era difícil, casi imposible, es tomar un programa ordinario e imaginar automáticamente la forma de utilizar la computación paralela en dicho programa. En lugar de ello, hay que empezar de cero con el problema, considerando que tenemos la posibilidad de cálculo paralelo, y reescribir por completo el programa con una nueva [comprensión de] lo que hay dentro de la máquina. No es posible utilizar efectivamente los viejos programas. Deben reescribirse. Esto es una gran desventaja para la mayoría de las

aplicaciones industriales y ha encontrado una resistencia considerable. Pero los grandes programas pertenecen normalmente a científicos u otros programadores inteligentes, no funcionarios, a quienes les gusta la ciencia de la computación y están dispuestos a empezar de cero y reescribir el programa si pueden hacerlo más eficaz. De modo que lo que va a suceder es que los programas difíciles, los muy grandes, serán los primeros en ser reprogramados en la nueva forma por expertos, y luego todo el mundo tendrá que adaptarse poco a poco; cada vez se programarán más programas de esa forma, y los programadores tendrán simplemente que aprender la forma de hacerlo.

§. Reducir la pérdida de energía

El segundo tema del que quiero hablar es de la pérdida de energía en los computadores. El hecho de que estos deban ser refrigerados es una limitación aparente para los computadores más grandes: se gasta mucho esfuerzo en refrigerar la máquina. Me gustaría explicar que esto es simplemente el resultado de una ingeniería muy pobre y no es nada fundamental en absoluto. Dentro del computador, cada fragmento mínimo de información es controlado por un cable cuyo voltaje puede tener dos valores. Se denomina «un bit», y tenemos que cambiar el voltaje del cable de un valor a otro y poner o quitar carga. Se puede establecer una analogía con un sistema hidráulico: supongamos que tenemos que llenar un recipiente con agua para alcanzar un nivel o vaciarlo para alcanzar el otro nivel. Esto es simplemente una analogía; si a ustedes les gusta más la electricidad

pueden pensar de forma más precisa en términos eléctricos. Lo que hacemos ahora es análogo, en el caso del agua, a llenar el recipiente vertiendo agua desde una tubería en un nivel más alto (véase la figura 1), y hacer descender el nivel abriendo una válvula en el fondo y dejando que el agua escape. En ambos casos hay una pérdida de energía debido a que el agua cae bruscamente desde el nivel superior por donde entra hasta el nivel inferior, y también cuando empezamos a verter agua para llenar de nuevo el recipiente. Con el voltaje y la carga ocurre lo mismo.

UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA

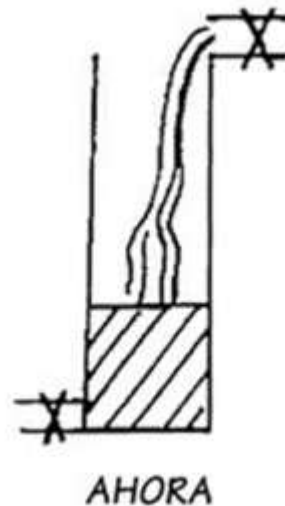


FIGURA 1

Como Mr. Bennett ha explicado, esto es como llevar un automóvil que tiene que ponerse en marcha encendiendo el motor y se para pisando el freno. Cada vez que se enciende el motor y luego se pisa el freno, se pierde potencia. Una forma diferente de disponer las cosas para un automóvil sería conectar las ruedas a volantes inerciales. Entonces, cuando el automóvil se para el volante se acelera, guardando así la energía que luego puede reutilizarse para poner de nuevo en marcha el automóvil. El análogo a esto en el caso del agua sería tener un tubo en forma de U con una válvula en el centro que conecta los dos brazos de la U (véase la figura 2). Empezamos con el brazo derecho lleno y el brazo izquierdo vacío, con la válvula cerrada. Si ahora

abrimos la válvula, el agua pasará al otro lado y podemos cerrar de nuevo la válvula en el momento preciso para atrapar el agua en el brazo izquierdo. Ahora, cuando queramos proceder en sentido contrario, abrimos de nuevo la válvula y el agua vuelve al otro lado y la atrapamos otra vez. Habrá alguna pérdida y el agua no subirá a la misma altura que antes, pero todo lo que tenemos que hacer es añadir un poco de agua para compensar la pérdida: una pérdida de energía mucho menor que con el método de llenado directo. Este truco utiliza la inercia del agua; el análogo de la inercia en el caso de la electricidad es la inductancia. Sin embargo, con los transistores de silicio que hoy utilizamos es difícil formar inductancia en los chips. De modo que esta técnica no es especialmente práctica con la tecnología actual.

Otro método consistiría en llenar el tanque a partir de una reserva con una llave de salida que está solo un poco por encima del nivel del agua, e ir subiendo la llave a medida que llenamos el tanque (véase la figura 3), de modo que la caída de agua es siempre pequeña durante todo el proceso. Análogamente, para reducir el nivel de agua en el tanque podríamos

utilizar un escape que simplemente deje salir el agua próxima al nivel superior y vaya bajando poco a poco, de modo que no

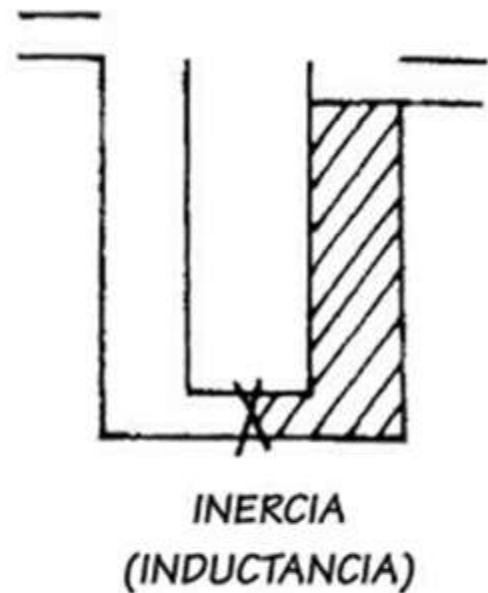


FIGURA 2

aparecerían pérdidas de calor en la posición del transistor o serían pequeñas. La pérdida real dependerá de la diferencia de alturas entre la llave de suministro y la superficie a medida que llenamos el tanque. Este método corresponde a un cambio en la diferencia de potencial con el tiempo. Por ello, si pudiéramos utilizar una diferencia de potencial variable con el tiempo, podríamos utilizar este método. Por supuesto, hay pérdida de energía en el suministro de voltaje, pero toda está localizada en un lugar y allí es sencillo hacer una inductancia grande. Este esquema se denomina «temporización caliente», porque la fuente de voltaje actúa al mismo tiempo como el reloj que lo controla todo. Además, no necesitamos una señal de reloj extra para programar los circuitos como sucede con los diseños convencionales.

Estos dos últimos dispositivos utilizan menos energía si van más lentos. Si intentamos variar demasiado deprisa el nivel del suministro de agua, el agua que hay en el tubo no puede seguir este ritmo y termina habiendo una gran caída de nivel del agua. Así pues, para que el dispositivo funcione hay que proceder lentamente. Análogamente, el esquema del tubo U no funcionará a menos que la válvula central pueda abrirse y cerrarse en un tiempo menor que el tiempo que necesita el agua para ir de un lado a otro del tubo en U. Así pues, mis dispositivos deben ser más lentos: he ahorrado una pérdida de energía pero he hecho los dispositivos más lentos. De hecho, el producto de la pérdida de energía por el tiempo necesario para que opere el circuito toma un valor constante. Pero en cualquier caso, esto resulta muy práctico porque el tiempo

característico del reloj es normalmente mucho mayor que el tiempo característico del circuito con los transistores, y podemos utilizar eso para reducir la energía. Además, si hiciéramos nuestros cálculos tres veces más lentos, pongamos por caso, podríamos utilizar un tercio de la energía durante un tiempo tres veces mayor, lo que supone una potencia disipada nueve veces menor. Quizá esto valga la pena. Quizá con otro diseño que utilice las computaciones en paralelo, o con otros dispositivos, podamos consumir un tiempo un poco mayor que el que consumiríamos a la velocidad máxima del circuito, para hacer una máquina más grande que sea práctica y de la que aún podríamos reducir la pérdida de energía.

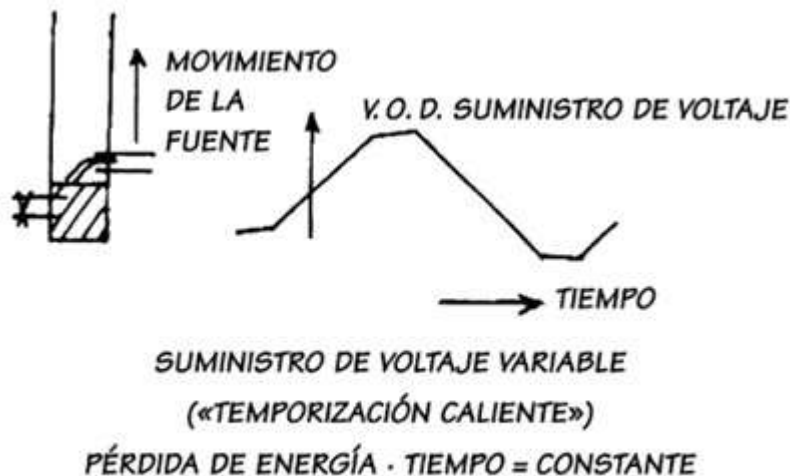


FIGURA 3

Para un transistor, la pérdida de energía multiplicada por el tiempo necesario para operar es un producto de varios factores (véase la figura 4):

1. La energía térmica proporcional a la temperatura, kT .

2. La longitud del transistor entre emisor y colector, dividida por la velocidad de los electrones internos; la velocidad térmica ($\sqrt{3kT/m}$)
3. La longitud del transistor medida en unidades del recorrido libre medio entre colisiones de los electrones en el transistor.
4. El número total de los electrones que hay dentro del transistor cuando está funcionando

$$\begin{aligned}
 & \text{ENERGÍA} \cdot \text{TIEMPO PARA UN TRANSISTOR} \\
 &= kT \cdot \frac{\text{LONGITUD}}{\text{VELOCIDAD}} \cdot \frac{\text{LONGITUD}}{\text{RECORRIDO}} \cdot \frac{\text{NÚMERO}}{\text{DE}} \cdot \frac{\text{ELECTRONES}}{\text{LIBRE MEDIO}} \\
 & \text{ENERGÍA} \sim 10^{9-11} kT \\
 & \therefore \text{REDUCCIÓN DE TAMAÑO : MÁS RÁPIDO MENOS ENERGÍA}
 \end{aligned}$$

FIGURA 4

Introduciendo valores apropiados para todos estos números obtenemos que la energía utilizada hoy en los transistores está entre mil millones y diez mil millones o más veces la energía térmica kT . Cuando el transistor conmuta, utilizamos toda esa energía. Esta es una gran cantidad de energía. Obviamente es una buena idea reducir el tamaño del transistor. Acortamos la longitud entre emisor y colector, y podemos reducir el número de los electrones y utilizar así mucha menos energía. Resulta además que un transistor más pequeño es mucho más rápido, porque los electrones pueden atravesarlo más rápidamente y se pueden hacer conmutaciones más rápidas. Por todas estas razones, es una buena idea hacer el transistor más pequeño, y todo el mundo está tratando siempre de hacerlo.

Pero supongamos que llegamos a una situación en la que el recorrido libre medio es mayor que el tamaño del transistor; entonces descubrimos que el transistor ya no funciona adecuadamente. No se comporta de la forma que esperábamos. Esto me recuerda que hace años existía algo llamado la barrera del sonido. Se suponía que los aviones no podían volar a una velocidad mayor que la del sonido porque, si se diseñaban de la forma habitual y luego se intentaba introducir la velocidad del sonido en las ecuaciones, las hélices no funcionarían y las alas no se levantarían y nada funcionaría correctamente. Pero lo cierto es que los aviones pueden ir más rápidos que la velocidad del sonido. Solo hay que saber cuáles son las leyes correctas en las circunstancias correctas, y diseñar el aparato con las leyes correctas. No podemos esperar que los viejos diseños funcionen en nuevas situaciones. Pero *nuevos* diseños pueden funcionar en *nuevas* situaciones, y yo afirmo que es perfectamente posible construir sistemas de transistores o, más correctamente, sistemas de conmutación y dispositivos de computación en los que las dimensiones sean menores que el recorrido libre medio. Hablo, por supuesto, «en teoría», y no estoy hablando de la fabricación real de tales dispositivos. Discutamos por consiguiente lo que sucede si tratamos de hacer los dispositivos tan pequeños como sea posible.

§. Reducir el tamaño

Mi tercer tema es el tamaño de los elementos de computación y ahora hablo de una forma completamente teórica. Lo primero por lo

que tendríamos que preocuparnos cuando las cosas se hacen muy pequeñas es por el movimiento browniano⁷: todo está en continua agitación y nada permanece quieto. ¿Cómo podemos entonces controlar los circuitos? Además, si un circuito funciona, ¿no tiene una probabilidad de volver atrás accidentalmente? Si utilizamos dos voltios para la energía de este sistema eléctrico, que es lo que utilizamos normalmente (véase la figura 5), esto es, ochenta veces la energía térmica a temperatura ambiente ($kT = 1/40$ voltio) y la probabilidad de que algo vuelva atrás frente a una energía 80 veces superior a la térmica es igual a e , la base de los logaritmos naturales, elevado a menos ochenta, o 10^{-43} . ¿Qué quiere decir esto? Si tuviéramos mil millones de transistores en un computador (que todavía no los tenemos), todos ellos conmutando 10^{10} veces por segundo (un tiempo de conmutación de una décima de nanosegundo), conmutando continuamente durante 10^9 segundos, que son 30 años, entonces el número total de conmutaciones en una máquina semejante sería de 10^{28} . La probabilidad de que uno de los transistores vuelva atrás es de solo 10^{-43} , de modo que en esos 30 años no se produciría ningún error debido a las oscilaciones térmicas. Si a ustedes no les gusta eso, utilicen 2,5 voltios y entonces la probabilidad se hace aún menor. Cualquier rayo cósmico que atravesase accidentalmente el transistor provocaría un fallo real en un tiempo mucho menor, así que no tenemos por qué ser más perfectos.

⁷ Movimiento desordenado de las partículas en suspensión en un medio fluido causado por las continuas colisiones aleatorias de las moléculas del fluido, registrado por primera vez en 1828 por el botánico Robert Brown, y explicado por Albert Einstein en un artículo publicado en 1905 en *Annalen der Physik*. (N. del e.)

Sin embargo, se puede hacer mucho más y me gustaría remitirles a un artículo de C. H. Bennett y R. Landauer, «Los límites físicos fundamentales de la computación»⁸, publicado recientemente en *Scientific American*. Es posible construir un computador en el que cada elemento, cada transistor, puede avanzar e invertirse accidentalmente, y aun así el computador funcionará. Todas las operaciones en el computador pueden ir hacia delante o hacia atrás. La computación procede durante un rato en una dirección y luego se auto-deshace, se «descalcula»; y luego sigue de nuevo hacia delante y así sucesivamente. Basta con tirar de ella un poco para conseguir que el computador avance y concluya el cálculo, con solo hacer un poco más probable que vaya hacia delante que vaya hacia atrás.

MOVIMIENTO BROWNIANO

$$2 \text{ VOLTIOS} = 80 \text{ kT}$$

$$\text{PROB. ERROR } e^{-80} = 10^{-43}$$

$$10^9 \text{ TRANSISTORES}$$

$$10^{10} \text{ CAMBIOS POR SEGUNDO}$$

EN CADA UNO

$$10^9 \text{ SEGUNDOS (30 AÑOS)}$$

$$10^{28}$$

FIGURA 5

⁸ *Scientific American*, julio de 1985. [Hay traducción española en *Investigación y Ciencia*, septiembre de 1985]. (N. del e.)

Es sabido que es posible hacer cualquier computación juntando ciertos elementos simples como los transistores; o, si queremos utilizar un lenguaje lógico más abstracto, algo llamado una puerta NAND (NAND significa NOT-AND). Una puerta NAND tiene dos «cables» de entrada y uno de salida (véase la figura 6). Olvidemos de momento el NOT. ¿Qué es una puerta AND? Una puerta AND es un dispositivo cuya salida es 1 solo si ambos cables de entrada son 1, y de lo contrario la salida es 0. NOT-AND significa lo contrario, de modo que el cable de salida lee 1 (esto es, tiene el voltaje correspondiente a 1) salvo cuando ambos cables de entrada lean 0 (esto es, tengan el voltaje correspondiente a 0). La figura 6 muestra una pequeña tabla de entradas y salidas para una puerta NAND semejante. A y B son entradas y C es la salida. Si A y B son ambas 1, la salida es 0, y en los demás casos es 1. Pero un dispositivo semejante es irreversible: la información se pierde. Si yo solo conozco la salida, no puedo recuperar la entrada. No cabe esperar que el dispositivo salte hacia delante y luego retroceda y siga computando correctamente. Por ejemplo, si sabemos que la salida es ahora 1, no sabemos si eso procedía de $A = 0$, $B = 1$ o de $A = 1$, $B = 0$ o de $A = 0$, $B = 0$, y no se puede volver atrás. Semejante dispositivo es una puerta irreversible.

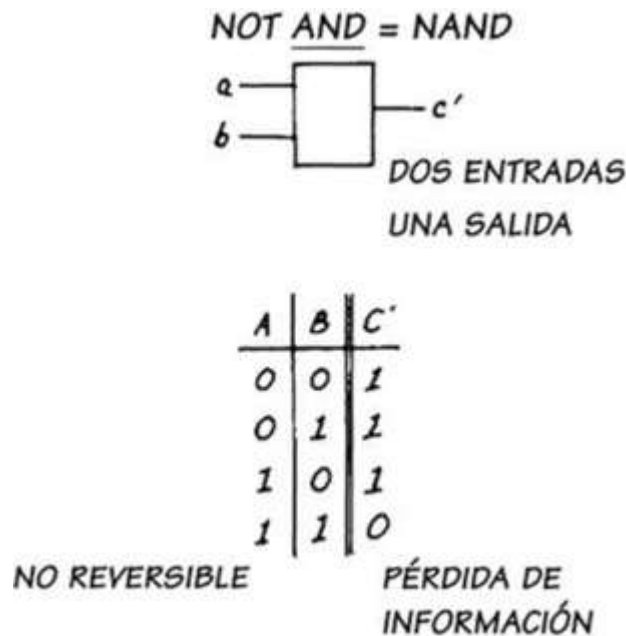


FIGURA 6

El gran descubrimiento de Bennett e, independientemente, de Fredkin consiste en que es posible hacer la computación con un tipo diferente de puerta unidad fundamental, a saber, una puerta unidad reversible. He ilustrado su idea con una unidad que podríamos llamar una puerta NAND reversible. Tiene tres entradas y tres salidas (véase la figura 7). De las tres salidas, dos, A' y B' , son las mismas que dos de las entradas, A y B , pero la tercera entrada funciona de la manera siguiente: C' es la misma que C a menos que A y B sean ambas 1, en cuyo caso cambia cualquiera que sea C . Por ejemplo, si C es 1 cambia a 0, y si C es 0 cambia a 1 (pero estos cambios solo ocurren si A y B son ambas 1). Si colocamos dos de estas puertas seguidas, podemos ver que A y B pasarán, y si C no cambia en ninguna de las dos, seguirá siendo la misma. Si C cambia, cambia dos veces, así que sigue siendo la misma. De modo

que esta puerta puede invertirse y no se pierde información. Es posible descubrir qué es lo que entró si uno sabe lo que salió.

Un dispositivo hecho enteramente con estas puertas hará cálculos si todo avanza hacia delante. Pero aunque las cosas den pasos atrás y adelante durante un cierto tiempo, pero a la larga avancen, seguirá operando correctamente. Si las cosas vuelven atrás y luego siguen hacia delante, todo sigue estando bien. Es muy parecido a lo que sucede con una partícula inmersa en un gas, que es bombardeada por los átomos que la rodean. Normalmente una partícula semejante no va a ninguna parte, pero basta con un pequeño tirón, un pequeño sesgo que haga que la probabilidad de moverse en una dirección sea un poco mayor que la de moverse en la otra, para que el objeto sufra una lenta deriva hacia delante y viaje de un extremo al otro, a pesar del movimiento browniano al que está sometido. Lo mismo hará nuestro computador siempre que apliquemos una fuerza de arrastre que tire de él durante el cálculo. Aunque el cálculo no se haga de un modo uniforme, un cálculo de este tipo, hacia delante y hacia atrás, acabará finalmente la tarea. Como sucede con la partícula inmersa en el gas, si tiramos de ella ligeramente perdemos muy poca energía, pero se necesita mucho tiempo para que cruce de un lado a otro. Si tenemos prisa y tiramos más fuerte de ella, entonces perdemos mucha energía. Lo mismo sucede con el computador. Si somos pacientes y procedemos lentamente, podemos hacer que el computador funcione con una pérdida prácticamente nula, menor incluso que k por paso, cualquier cantidad tan pequeña como queramos si disponemos del

tiempo suficiente. Pero si tenemos prisa, debemos disipar energía, y una vez más es cierto que el producto de la energía perdida para tirar del cálculo hasta su conclusión multiplicada por el tiempo de que disponemos para hacer el cálculo tiene un valor constante.

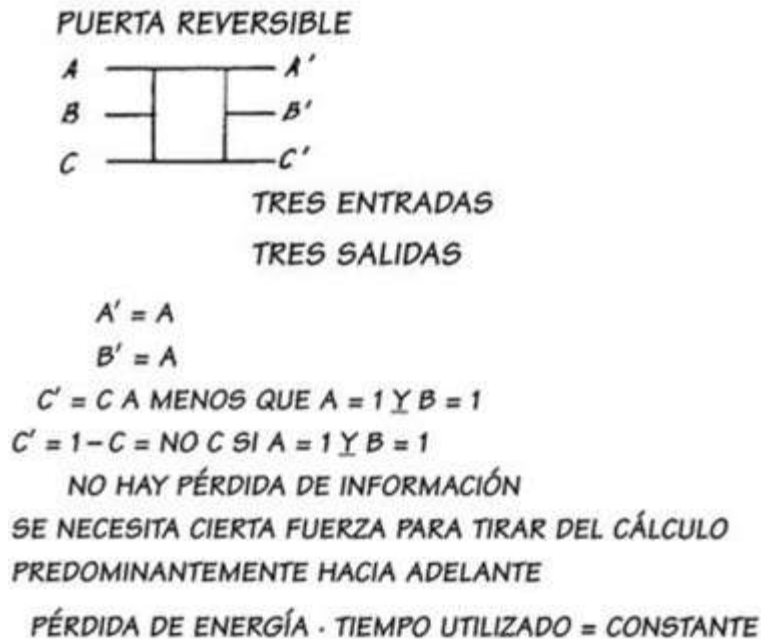


FIGURA 7

Con estas posibilidades en mente, veamos hasta qué punto podemos reducir el tamaño de un computador. ¿Qué tamaño debe tener un número? Todos sabemos que podemos escribir números en base 2 como cadenas de «bits», siendo cada uno de estos un uno o un cero. Y el átomo siguiente podría ser un uno o un cero, de modo que una pequeña cadena de átomos es suficiente para guardar un número, un átomo por cada bit. (En realidad, puesto que un átomo no puede tener más que dos estados, podríamos utilizar incluso un número menor de átomos, ¡aunque uno por bit es suficientemente pequeño!). Así, por puro placer intelectual, consideremos si podríamos construir un computador en el que la escritura de bits

sea de tamaño atómico, en el que un bit consista, por ejemplo, en que el espín del átomo apunte hacia arriba, para 1, o hacia abajo, para 0. Y entonces nuestro «transistor», que conmuta los bits en diferentes lugares, correspondería a ciertas interacciones entre átomos que cambiarían sus estados. El ejemplo más simple sería un tipo de interacción de 3-átomos que pudiese llegar a ser el elemento o puerta fundamental en un computador semejante. Pero una vez más, el dispositivo no funcionará correctamente si lo diseñamos con leyes adecuadas para objetos grandes. Debemos utilizar las nuevas leyes de la física, leyes mecanocuánticas: las leyes que son apropiadas para el movimiento atómico (véase la figura 8)

DEBEN UTILIZARSE AHORA LEYES FÍSICAS NUEVAS

PUERTAS REVERSIBLES
MECÁNICA CUÁNTICA

NO HAY LIMITACIONES
ADICIONALES APARTE DE:

{ NO PUEDE SER MÁS PEQUEÑO
QUE UN ÁTOMO
PÉRDIDA TÉRMICA (BENNETT)
VELOCIDAD DE LA LUZ

FIGURA 8

Por consiguiente, tenemos que preguntarnos si los principios de la mecánica cuántica permiten una disposición de átomos en número no mucho mayor que unas pocas veces el número de puertas en un computador actual, y si tal disposición podría operar como un computador. Esto se ha estudiado en teoría, y se ha encontrado un dispositivo semejante. Puesto que las leyes de la mecánica cuántica son reversibles, debemos utilizar la idea de Bennett y Fredkin de puertas lógicas reversibles. Cuando se estudia esta situación mecanocuántica se encuentra que la mecánica cuántica no añade

ninguna limitación adicional a la que Mr. Bennett ha establecido a partir de consideraciones termodinámicas. Hay por supuesto una limitación, una limitación práctica en cualquier caso, y es que los bits deben ser del tamaño de un átomo y un transistor debe tener 3 o 4 átomos. La puerta mecanocuántica que yo utilicé tiene 3 átomos. (Yo no trataría de escribir mis bits en núcleos, sino que esperaré a que el desarrollo tecnológico llegue a los átomos ¡antes de que yo necesite ir más allá!). Esto nos deja simplemente con:

- a. las limitaciones en tamaño al tamaño de los átomos;
- b. los requisitos energéticos dependientes del tiempo, como los calculados por Bennett;
- c. una característica que no mencioné concerniente a la velocidad de la luz: no podemos enviar señales más rápidas que la velocidad de la luz.

Estas son las únicas limitaciones físicas que conozco para los computadores.

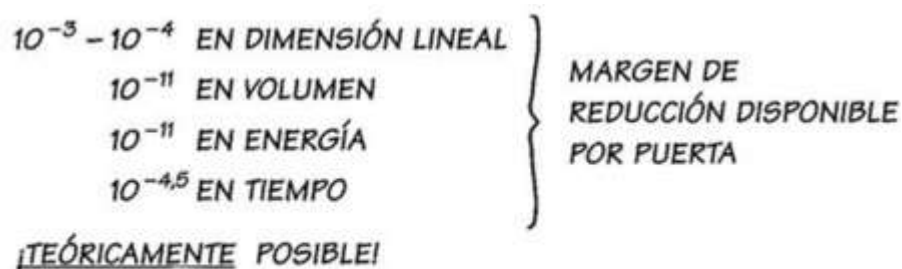


FIGURA 9

Si de algún modo conseguimos construir un computador de tamaño atómico, ello significaría que su dimensión, la dimensión *lineal*, es entre mil y diez mil veces menor que la de los chips minúsculos de los que disponemos ahora. Significa que el volumen del computador

es una 100.000 millonésima parte o 10^{-11} del volumen actual, porque el volumen del «transistor» es menor en un factor 10^{-11} que el de los transistores que construimos hoy. Los requisitos energéticos para un solo conmutador son también once órdenes de magnitud más pequeños que la energía hoy necesaria para conmutar el transistor, y el tiempo para hacer las transiciones será al menos diez mil veces menor por cada paso de cálculo. Así que hay mucho lugar para mejoras en el computador y dejo esto como un objetivo a alcanzar por ustedes, gente práctica que trabaja en computadores. He sobreestimado el tiempo que necesitaría Mr. Ezawa para traducir mis palabras, y no tengo preparado nada más para decir hoy. ¡Gracias! Responderé a preguntas si ustedes quieren.

§. Preguntas y respuestas

Usted mencionó que un bit de información puede ser almacenado en un átomo, y yo me pregunto si usted puede almacenar esta misma cantidad de información en un quark.

Sí. Pero no tenemos control sobre los quarks y eso sería una forma de trabajar realmente impracticable. Quizá usted piensa que lo que he estado contando es impracticable, pero yo no lo creo así. Cuando hablo de átomos, creo que algún día seremos capaces de manejarlos y controlarlos de uno en uno. Habría tanta energía implicada en las interacciones entre quarks que sería muy peligroso manejarlos debido a la radiactividad y cosas así. Pero las energías atómicas de las que estoy hablando nos son muy familiares en términos de energías químicas, energías eléctricas, y con estos números estamos

dentro del mundo de la realidad, creo yo, por absurdo que pueda parecer por el momento.

Usted dijo que es mejor cuanto más pequeño sea el elemento de computación. Pero, yo pienso que el equipo tiene que ser mayor, porque...

Quiere decir que su dedo es demasiado grande para presionar los botones. ¿No es eso lo que quiere decir?

Sí, eso es.

Por supuesto, tiene razón. Yo estoy hablando de computadores internos, quizá para robots u otros aparatos. Las vías de entrada y salida son algo a lo que no me he referido, ya proceda la entrada de mirar fotografías, oír voces, o presionar botones. Estoy hablando de cómo se lleva a cabo la computación en teoría y no la forma que debería tomar la salida. Es verdad que los periféricos de entrada y salida no pueden reducirse en la mayoría de los casos de forma efectiva más allá de las dimensiones humanas. Ya es demasiado difícil pulsar los botones con nuestros dedos en algunos computadores. Pero algunos problemas de computación complicados, que necesitan horas y horas, podrían resolverse rápidamente en máquinas muy pequeñas con bajo consumo de energía. Ese es el tipo de máquinas en las que estoy pensando. No en las aplicaciones simples para sumar dos números sino en cálculos complicados.

Me gustaría saber su método para transformar la información de un elemento a escala atómica en otro elemento a escala atómica. Si usted utilizara una interacción natural o mecanocuántica entre los dos elementos, entonces un dispositivo semejante estaría muy próximo a la propia naturaleza. Por ejemplo, si hacemos una simulación por computador, una simulación Monte Carlo para estudiar fenómenos críticos, entonces su computador de escala atómica estaría muy cerca del propio imán. ¿Cuáles son sus ideas sobre esto?

Sí. Todo lo que hacemos es naturaleza. Nosotros lo disponemos de una forma adecuada a nuestros propósitos, para que haga un cálculo con un propósito. En un imán existe algún tipo de relación, si usted quiere; hay algún tipo de computación en curso, exactamente como la hay en el sistema solar, si así queremos considerarlo. Pero quizá no fuera ese el cálculo que queremos hacer en este momento. Lo que necesitamos construir es un dispositivo en el que podamos cambiar los programas y hacerle computar los problemas que nosotros queremos resolver, y no solo su propio problema como imán que ya tiene que resolver por sí mismo. Yo no puedo utilizar el sistema solar como un computador a menos que el problema que alguien me planteara consistiera precisamente en encontrar el movimiento de los planetas, en cuyo caso todo lo que tengo que hacer es observar. Sobre esto había un divertido artículo escrito en broma. En un futuro lejano, aparece un «artículo» que discute un nuevo método de hacer cálculos aerodinámicos: en lugar

de utilizar los computadores complicados de su tiempo, el autor inventa un sencillo dispositivo para soplar aire en torno al ala. (¡Reinventa el túnel de viento!)

He leído recientemente en un artículo de prensa que las operaciones del sistema nervioso en el cerebro son mucho más lentas que los computadores actuales, y que la unidad en el sistema nervioso es mucho más pequeña. ¿Cree usted que los computadores de los que nos ha hablado hoy tienen algo en común con el sistema nervioso en el cerebro?

Existe una analogía entre el cerebro y el computador en cuanto que hay aparentemente elementos que pueden conmutar bajo el control de otros. Los impulsos nerviosos controlan o excitan otros nervios, de una forma que a menudo depende de si entra o no más de un impulso; algo parecido a una puerta AND o su generalización. ¿Cuál es la cantidad de energía utilizada en una célula del cerebro para una de estas transiciones? Yo no conozco el número. El tiempo necesario para hacer una conmutación en el cerebro es mucho mayor que en nuestros computadores actuales, dejando aparte las fantasías de algún conmutador atómico futuro, pero el sistema de interconexión del cerebro es mucho más complicado. Cada nervio está conectado a miles de otros nervios, mientras que cada transistor solo está conectado a otros dos o tres transistores.

Algunas personas consideran la actividad del cerebro en acción y ven que en muchos aspectos supera al computador actual, y en

muchos otros aspectos el computador nos supera a nosotros. Esto inspira a la gente para diseñar máquinas que puedan hacerlo mejor. Lo que sucede a menudo es que un ingeniero tiene una idea de cómo trabaja el cerebro (en su opinión) y entonces diseña una máquina que se comporta de ese modo. Esta nueva máquina puede de hecho funcionar muy bien. Pero debo advertirles que eso no nos dice nada sobre cómo funciona realmente el cerebro, ni es necesario siquiera saberlo realmente para hacer un computador muy capaz. No es necesario saber cómo baten sus alas los pájaros y cómo están diseñadas las plumas para hacer una máquina voladora. No es necesario entender el sistema de palancas en las patas de un leopardo —un animal que corre mucho— para construir un automóvil con ruedas que vaya muy rápido. Por lo tanto, no es necesario imitar en detalle el comportamiento de la naturaleza para diseñar un dispositivo que pueda superar en muchos aspectos las capacidades de la naturaleza. Es un tema interesante y me gusta hablar sobre ello.

* * * *

Su cerebro es muy débil comparado con un computador. Le daré una serie de números, uno, tres, siete... O mejor, ichi, san, shichi, san, ni, go, ni, go, ichi, hachi, ichi, ni, ku, san, go. Ahora quiero que usted me los repita. Un computador puede tomar decenas de miles de números y repetirlos al revés, o sumarlos o hacer montones de cosas que nosotros no podemos hacer. Por el contrario, si yo miro un rostro, puedo decir de una ojeada quién es, si conozco a esa persona, o decir que yo no conozco a esa persona. Aún no sabemos

cómo hacer un computador que si le proporcionamos una figura de un rostro pueda ofrecernos tal información, incluso si ha visto muchos rostros y hemos tratado de enseñarle.

* * * *

Otro ejemplo interesante son las máquinas de jugar al ajedrez. Es sorprendente que podamos hacer máquinas que juegan al ajedrez mejor que casi todas las personas que hay en la sala. Pero lo hacen ensayando muchas, muchísimas posibilidades. Si mueve aquí, entonces yo podría mover aquí, y él puede mover allí, y así sucesivamente. Estas máquinas consideran todas las alternativas y escogen la mejor. Los computadores consideran millones de alternativas, pero un maestro de ajedrez, un ser humano, lo hace de forma diferente. Él reconoce pautas. Solo considera treinta o cuarenta posiciones antes de decidir el movimiento que va a hacer. Por esa razón, aunque las reglas son más simples en Go, las máquinas que juegan al Go no son muy buenas, porque en cada posición hay demasiadas posibilidades de movimiento y hay también demasiadas cosas que comprobar y las máquinas no pueden ver con mucha anticipación. Por eso, el problema de reconocer pautas y de qué hacer bajo estas circunstancias es lo que los ingenieros informáticos (a ellos les gusta llamarse científicos de computación) siguen encontrando muy difícil. Ciertamente es una de las cosas importantes para los computadores del futuro, quizá más importante que las cosas de las que he hablado. ¡Hacer una máquina que juegue al Go de forma efectiva!

Creo que ningún método de computación sería fructífero a menos que le proporcionásemos una especie de instrucciones para componer tales dispositivos o programas. Yo creía que el artículo de Fredkin sobre lógica conservativa era muy interesante, pero cuando me puse a pensar en la forma de hacer un programa sencillo utilizando tales dispositivos, me quedé atascado, porque elaborar un programa semejante es mucho más complejo que el propio programa. Creo que fácilmente podríamos entrar en una especie de regresión infinita porque el proceso de construir cierto programa sería más complejo que el propio programa y, al tratar de automatizar el proceso, el programa de automatización sería mucho más complejo y así sucesivamente, especialmente en este caso en que el programa está integrado en lugar de estar separado como software. Creo que es fundamental considerar las formas de composición.

Tenemos varias experiencias diferentes. No hay regresión infinita: se detiene en un cierto nivel de complejidad. La máquina de la que Fredkin está hablando en definitiva y aquella de la que yo estaba hablando en el caso mecanocuántico son ambos computadores universales en el sentido de que pueden ser programados para hacer diversas tareas. Esto no es un programa integrado. No están más integrados que un computador ordinario en el que usted puede introducir información —el programa es una parte de la entrada— y la máquina hace el problema que se le asigna. Es integrado pero es universal, como un computador ordinario. Estas cosas son muy inciertas pero yo encontré un algoritmo. Si usted tiene un programa

escrito para una máquina irreversible, un programa ordinario, entonces yo puedo convertirlo en un programa para máquina reversible mediante un esquema de traducción directa, que es muy poco eficiente y utiliza muchos más pasos. Luego, en las situaciones reales, es posible que el número de pasos sea mucho menor. Pero al menos sé que puedo tomar un programa con $2n$ pasos que es irreversible y convertirlo en $3n$ pasos de una máquina reversible. Eso son muchos más pasos. El que yo hice era muy poco eficiente, puesto que no traté de descubrir la forma óptima sino solo una forma de hacerlo. Yo no creo realmente que encontremos esta regresión de la que usted habla, pero quizá tenga usted razón. No estoy seguro.

¿No estaremos sacrificando muchos de los méritos que estábamos esperando de tales dispositivos, debido a que dichas máquinas reversibles son muy lentas? Yo soy muy pesimista sobre este punto.

Son más lentas, pero son mucho más pequeñas. Yo no las hago reversibles a menos que lo necesite. No tiene objeto hacer la máquina reversible a menos que uno esté tratando de reducir la energía enormemente —mejor dicho, ridículamente— porque con solo 80 veces kT la máquina irreversible funciona perfectamente. Ese 80 es mucho menor que los actuales 10^9 o 10^{10} kT , de modo que hay una mejora por hacer de al menos un factor 10^7 en la energía, y ¡aún puede hacerse con máquinas irreversibles! Eso es verdad. Esa es la forma correcta de proceder, por el momento. Yo me entretengo intelectualmente por diversión, preguntando hasta

dónde podríamos llegar en teoría, no en la práctica, y entonces descubro que puedo llegar hasta una fracción de un kT de energía y hacer las máquinas microscópicas, atómicamente microscópicas. Pero para hacerlo, debo utilizar las leyes físicas reversibles. La irreversibilidad aparece porque el calor se reparte sobre un gran número de átomos y no puede ser recogido de nuevo. Cuando hago la máquina muy pequeña, a menos que admita un elemento refrigerador con montones de átomos, yo tengo que trabajar reversiblemente. Es probable que, en la práctica, siempre prefiramos unir un pequeño computador a un gran pedazo de plomo que contenga 10^{10} átomos (que es todavía muy pequeño), y hacerlo así efectivamente irreversible. Por lo tanto, estoy de acuerdo con usted en que en la práctica, durante mucho tiempo y quizá para siempre, utilizaremos puertas irreversibles. Por otro lado, una parte de la aventura de la ciencia está en tratar de encontrar una limitación en cualquier dirección y extender la imaginación humana hasta donde sea posible. Aunque en cada periodo ha parecido que una actividad semejante era absurda e inútil, a menudo resulta que, al menos, no es inútil.

¿Existen limitaciones procedentes del principio de incertidumbre? ¿Existe alguna limitación fundamental sobre la energía y el tiempo de reloj en su esquema de máquina reversible?

Esa es una cuestión muy pertinente. No existe limitación adicional debida a la mecánica cuántica. Uno debe distinguir cuidadosamente

entre la energía perdida o consumida irreversiblemente, el calor generado en la operación de la máquina y el contenido energético de las partes móviles que podría extraerse de nuevo. Existe una relación entre el tiempo y la energía que podría ser extraída de nuevo. Pero esa energía que puede ser extraída de nuevo no es de ninguna importancia o interés. Sería como preguntar si deberíamos o no añadir la mc^2 , la energía en reposo, de todos los átomos que hay en el dispositivo. Yo solo hablo de la energía perdida multiplicada por el tiempo, y entonces no hay limitación. Sin embargo, es cierto que si usted quiere hacer un cálculo a una velocidad extraordinariamente alta, entonces tiene que suministrar a la máquina piezas que se muevan rápidamente y tengan energía, pero esa energía no se pierde necesariamente en cada paso del cálculo; se recupera por inercia.

(Respuesta a ninguna pregunta): Con respecto a la cuestión de las ideas inútiles me gustaría añadir algo más. Esperaba que ustedes me lo preguntasen, pero no lo han hecho. Por eso, responderé en cualquier caso. ¿Cómo podríamos hacer una máquina de dimensiones tan pequeñas que tengamos que colocar los átomos en lugares especiales? Hoy no tenemos ninguna maquinaria con partes móviles cuya dimensión sea extraordinariamente pequeña, en la escala de átomos o cientos de átomos incluso, pero tampoco hay ninguna limitación física en dicha dirección. No hay ninguna razón por la que, cuando depositamos el silicio, incluso hoy, las piezas no puedan formar pequeñas islas de modo que sean móviles.

Podríamos también disponer pequeños chorros de modo que pudiéramos lanzar las diferentes sustancias químicas sobre ciertos lugares. Podemos hacer maquinaria que es extraordinariamente pequeña. Una maquinaria semejante será fácil de controlar mediante el mismo tipo de circuitos computadores que fabriquemos. En definitiva, de nuevo por diversión y placer intelectual, podríamos imaginar máquinas tan minúsculas como de algunas micras de tamaño, con ruedas y cables interconectados por conexiones de silicio, de modo que el objeto en conjunto, un dispositivo muy grande, se mueva no con los torpes movimientos de nuestras máquinas robustas actuales sino con el movimiento suave del cuello de un cisne, que después de todo es un montón de máquinas pequeñas, células interconectadas y controladas de una forma suave. ¿Por qué no podemos hacer eso nosotros?

Capítulo 3

Los Álamos desde abajo

Y ahora, algo más ligero: joyas del Feynman bromista (por no decir desvalijador⁹) metiéndose y saliendo de dificultades en Los Álamos. Feynman violando aparentemente la regla de ninguna mujer en el dormitorio de los hombres para hacerse con su propia habitación privada; burlándose de los censores del campo; codeándose con grandes hombres como Robert Oppenheimer, Niels Bohr y Hans Bethe. Y el impresionante privilegio de ser el único hombre que observó directamente la primera explosión atómica sin gafas protectoras, una experiencia que cambió a Feynman para siempre.

La halagadora presentación del profesor Hirschfelder es bastante inadecuada para mi charla, que es «Los Álamos desde abajo». Lo que quiero decir con desde abajo es que, aunque actualmente tengo cierta fama dentro de mi campo de investigación, en aquella época yo no era famoso en absoluto. Ni siquiera tenía el título de doctor cuando empecé con mi trabajo relacionado con el Proyecto Manhattan¹⁰. Muchas de las otras personas que les van a hablar sobre Los Álamos conocían a alguien en algún escalón superior de la Administración o algo similar, personas involucradas en la toma de grandes decisiones. Yo no tenía que tomar grandes decisiones.

⁹ Juego de palabras entre *wisecracker* (bromista) *safecracker*(desvalijador). (N. del t.)

¹⁰ Nombre dado al gigantesco proyecto para construir la primera bomba atómica, que se inició en 1942 y culminó con el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki el 6 y 9 de agosto de 1945, respectivamente. El proyecto estaba repartido por todo Estados Unidos, con unidades, por ejemplo, en la Universidad de Chicago; Hanford, Washington; Oak Ridge, Tennessee; y Los Álamos, Nuevo México, donde se construyeron las bombas, y que era fundamentalmente el cuartel general del proyecto entero. (N. del e.)

Siempre estaba revoloteando por abajo de un lado a otro. No estaba en el último nivel. Llegué a ascender unos pocos escalones, pero nunca fui una de las personas de arriba. Por eso quiero que ustedes se coloquen en una situación diferente de la citada en la introducción e imaginen simplemente a este joven estudiante licenciado que todavía no tiene su título y está trabajando en su tesis. Empezaré diciendo cómo entré en el proyecto y lo que me sucedió luego. Eso es todo; simplemente lo que me sucedió durante el proyecto.

Estaba un día trabajando en mi despacho¹¹ cuando entró Bob Wilson¹². Estaba trabajando... [risas] ¿Qué demonios pasa?, tengo todavía montones de cosas más divertidas; ¿de qué se ríen ustedes? Bob Wilson entró y dijo que había recibido fondos para hacer un trabajo que era secreto y que no debía contar a nadie, pero iba a contármelo porque sabía que en cuanto yo supiera de qué se trataba, vería que tenía que colaborar con él. Así que me habló del problema de separar los diferentes isótopos del uranio. La finalidad última era hacer una bomba, y tenía un proceso para separar los isótopos de uranio, que era diferente del que se utilizó al final, y quería tratar de desarrollarlo. Me habló de ello y dijo: «Hay una reunión...», y yo dije que no quería ir. Él dijo: «Muy bien, hay una reunión a las tres, te veré allí». Le dije: «Está bien que me hayas contado el secreto porque no voy a decírselo a nadie, pero no voy a ir». Así que volví a trabajar en mi tesis durante tres minutos. Luego empecé a caminar de un lado a otro y a pensar en el asunto. Los

¹¹ En la Universidad de Princeton. (*N. del e.*)

¹² Robert R. Wilson (1914-2000), primer director del Fermi National Accelerator Laboratory, 1967-1978. (*N. del e.*)

alemanes tenían a Hitler y la posibilidad de desarrollar una bomba atómica era obvia, y la posibilidad de que la desarrollasen antes de que lo hiciéramos nosotros era temible. Así que decidí ir a la reunión de las tres. A las cuatro yo ya tenía una mesa en una habitación y estaba tratando de calcular si este método concreto estaba limitado por la corriente total que puede transportar un haz de iones, y todo eso. No entraré en detalles. Pero tenía una mesa, y tenía papel, y estaba trabajando tan duro como podía y tan rápido como puedo hacerlo. Los colegas que estaban construyendo el aparato planeaban hacer el experimento allí mismo. Y era como aquellas películas de animación en las que ves una pieza de la maquinaria que va bruuup, bruuup, bruuuup. Cada vez que miraba la cosa había crecido. Y lo que sucedía, por supuesto, era que todos los muchachos habían decidido trabajar en esto y dejar las investigaciones que estaban haciendo en ciencia pura. Toda la ciencia se interrumpió durante la guerra, excepto lo poco que se hizo en Los Álamos. No tenía mucho de ciencia; era un montón de ingeniería. Y cada uno de ellos estaba desmontando el equipo de su investigación, y estaban reuniendo todo el equipamiento de diferentes investigaciones para construir el nuevo aparato y hacer el experimento para tratar de separar los isótopos de uranio. También yo interrumpí mi trabajo por la misma razón. Es verdad que, cuando llevaba algún tiempo en ese trabajo, me tomé unas vacaciones de seis semanas y acabé de escribir mi tesis. Obtuve mi título justo antes de ir a Los Álamos, así que no estaba tan abajo como les hice creer.

Una de las primeras experiencias que me resultó muy interesante en este proyecto en Princeton fue la de conocer a grandes hombres. Yo nunca había conocido antes a muchos grandes hombres. Pero había un comité de evaluación que tenía que decidir qué camino íbamos a seguir, e iba a apoyarnos y ayudarnos en definitiva a decidir qué método íbamos a seguir para separar el uranio. En este comité de evaluación había hombres como Tolman, Smyth, Urey, Rabi y Oppenheimer, y así sucesivamente. Y estaba Compton, por ejemplo. Una de las cosas que vi me produjo una terrible conmoción. Yo estaba sentado allí con ellos porque entendía la teoría de los procesos que estábamos tratando, y por eso me hacían preguntas y luego las discutíamos. Entonces alguien hacía una observación, y luego Compton, por ejemplo, exponía un punto de vista diferente, y tenía toda la razón, era la idea correcta, y decía que ese debería ser el método. Otro tipo decía: «Bien, quizá, existe esta otra posibilidad contraria que tenemos que considerar. Hay otra posibilidad que tenemos que considerar». ¡Yo daba un bote! ¡Debería decirlo de nuevo, Compton debería decirlo de nuevo! Así que todo el mundo estaba en desacuerdo, todos daban vueltas alrededor de la mesa. Al final Tolman, que era el presidente, dice: «Bien, después de oír todos estos argumentos creo que es cierto que el argumento de Compton es el mejor de todos y ahora tenemos que seguir adelante». Y fue muy chocante para mí ver que un comité de hombres pudiera presentar un montón de ideas, considerando cada uno de ellos un nuevo aspecto, y recordando lo que habían dicho los otros colegas después de prestarles atención; y al final se tomaba

una decisión sobre qué idea era la mejor, resumiéndolo todo, sin tener que repetirlo tres veces, ¿ven ustedes? Así que aquello supuso para mí una conmoción; eran realmente unos grandes hombres.

Finalmente se decidió que no era este el procedimiento que se iba a seguir para separar el uranio. Nos dijeron entonces que lo dejáramos, y que se iba a poner en marcha en Los Álamos, Nuevo México, el proyecto que realmente llevaría a la bomba, y que todos deberíamos ir allí para hacerla. Había experimentos que realizar y trabajo teórico por hacer. Yo estaba en la parte teórica; el resto de los colegas estaba en la parte experimental. La cuestión entonces era qué hacer, porque teníamos este tiempo muerto desde que nos habían dicho que lo dejáramos y Los Álamos todavía no estaba preparado. Bob Wilson quiso aprovechar el tiempo enviándome a Chicago para averiguar todo lo que pudiera sobre la bomba y sus problemas, para que pudiéramos empezar a construir en nuestro laboratorio instrumental contadores de diversos tipos y todo eso, que pudiesen sernos útiles cuando fuésemos a Los Álamos. Así que no se perdió el tiempo. Fui enviado a Chicago con instrucciones de visitar a cada grupo, decirles que iba a trabajar con ellos, hacer que me explicasen un problema hasta que yo conociese suficientes detalles para que pudiese sentarme realmente y empezar a trabajar en el problema; y tan pronto como lo consiguiera ir a otro tipo y preguntarle por otro problema, y de esa forma yo entendería los detalles de todo. Era una idea muy buena, aunque me remordía un poco la conciencia. Pero resultó, por casualidad (tuve mucha suerte), que cuando uno de los tipos me explicó un problema, yo le

dije: « ¿Por qué no lo haces así?», y en media hora él lo había resuelto, cuando habían estado trabajando en ello durante tres meses. Así que ¡algo hice! Cuando regresé de Chicago describí la situación a los colegas: cuánta energía se liberaba, cómo iba a ser la bomba y todo eso. Recuerdo que un amigo que trabajaba conmigo, Paul Olum, un matemático, vino después y me dijo: «Cuando se haga una película sobre esto saldrá un tipo que vuelve de Chicago y cuenta a los hombres de Princeton todo sobre la bomba, y él llevará un traje y un maletín y todo eso; y tú estás aquí en mangas de camisa y contándonos todo lo que hay». Pero en cualquier caso es algo muy serio, y por eso él apreciaba la diferencia entre el mundo real y el de las películas.

Bueno, parece que seguía habiendo un retraso y Wilson fue a Los Álamos a averiguar qué era lo que estaba retrasando las cosas y en qué punto estaban. Cuando llegó allí encontró que la compañía constructora estaba trabajando muy duro y había terminado el auditorio y algunos otros edificios porque sabían cómo hacerlo, pero nadie les había dado instrucciones claras sobre cómo construir un laboratorio —cuántas conducciones para el gas, cuántas para el agua—, de modo que él simplemente se quedó allí y decidió cuánto para el agua, cuánto para gas y todo eso, y les dijo que empezaran a construir los laboratorios. Y luego regresó con nosotros —nosotros ya estábamos todos preparados para ir, ven ustedes—, y Oppenheimer estaba teniendo dificultades para discutir algunos problemas con Groves y nos estábamos impacientando. Por lo que yo entendí desde la posición en que me encontraba, Wilson llamó

entonces a Manley en Chicago y ellos se reunieron y decidieron que iríamos allí en cualquier caso, incluso si no estaba todo preparado. Así que todos fuimos a Los Álamos antes de que estuviese preparado. Fuimos reclutados, dicho sea de paso, por Oppenheimer y otras personas, y él fue muy paciente con todos: prestó atención a los problemas de todo el mundo. Se preocupó de mi esposa que tenía tuberculosis, y de si había un hospital allí cerca y todo eso; fue la primera vez que tuve un encuentro con él de una forma tan personal; era un hombre maravilloso. Nos dijeron entre otras cosas, por ejemplo, que debíamos tener cuidado. Que no comprásemos nuestro billete de tren en Princeton porque Princeton era una estación ferroviaria muy pequeña, y si todo el mundo compraba billetes de tren para Albuquerque, Nuevo México, se levantarían sospechas de que algo pasaba. Y por eso todo el mundo compró sus billetes en algún otro lugar, excepto yo, porque imaginé que si todo el mundo compraba sus billetes en algún otro lugar... Así que cuando fui a la estación y dije: «Quiero ir a Albuquerque, Nuevo México», el empleado dijo: « ¡Oh, así que todo este material es para *usted!*!». Habíamos estado facturando cajones llenos de contadores durante semanas y confiando en que ellos no advirtiesen que la dirección era Albuquerque. Así que al menos expliqué cuál era la razón de que estuviésemos enviando cajones allí: yo iba a Albuquerque.

Bien, llegamos con mucho adelanto y los edificios para los dormitorios y cosas así no estaban listos. De hecho, ningún laboratorio estaba listo. Estábamos empujándoles, presionándoles

al llegar por adelantado. Iban como locos y alquilaron ranchos en los alrededores. Así que al principio nos alojábamos en un rancho e íbamos en coche por la mañana. La primera mañana que fui en coche fue tremendamente impresionante; la belleza del escenario, para una persona del Este que no viajaba mucho, era algo sensacional. Están los grandes barrancos; ustedes han visto probablemente fotografías, no entraré en detalles. Había *mesas* muy altas a las que se podía subir desde abajo y ver estos grandes barrancos, y quedábamos muy sorprendidos. Lo más impresionante para mí fue que, mientras subía, yo dije que quizá había indios que aún vivían allí, y el tipo que conducía el coche se detuvo; se bajó del coche y caminó hacia una esquina y ahí había cuevas de indios que se podían inspeccionar. De modo que, en ese aspecto, era realmente excitante. Cuando llegué al enclave por primera vez, vi la puerta: había un área técnica que se suponía que finalmente estaría rodeada por una valla pero, puesto que todavía estaba en construcción, seguía abierta. Luego se suponía que habría una ciudad y luego otra *gran* valla más allá, alrededor de la ciudad. Mi amigo Paul Olum, que era mi ayudante, estaba de pie con una tablilla controlando los camiones que entraban y salían y diciéndoles a dónde tenían que ir para descargar los materiales en diferentes lugares. Cuando entré en el laboratorio encontré a hombres a quienes conocía de oídas por haber visto sus artículos en el *Physical Review* y todo eso. Nunca antes me había encontrado con ellos. «Este es John Williams», dijeron. Se levantó un tipo que estaba ante una mesa cubierta de planos, con las mangas

remangadas, y que por una ventana ordenaba dónde debían ir los camiones y los demás materiales necesarios para la construcción. En otras palabras, asumimos el mando de la compañía constructora y acabamos el trabajo. Los físicos, especialmente los físicos experimentales en estos primeros momentos, no tenían nada que hacer hasta que estuviesen listos sus edificios y estuviesen listos los aparatos, así que sencillamente construían o ayudaban a construir los edificios. Se decidió que los físicos teóricos, por el contrario, no vivirían en los ranchos sino que lo harían en las propias instalaciones puesto que podían empezar a trabajar de inmediato. Así que empezamos a trabajar inmediatamente, y eso significaba que teníamos una pizarra rodante, ya saben, una pizarra sobre ruedas que uno puede empujar y llevar de un lado a otro, y Serber nos explicaba todas las cosas que habían pensado en Berkeley sobre la bomba atómica, física nuclear y todo eso, y no sé cuántas cosas más. Yo había estudiado otro tipo de cosas. Y por eso tuve que trabajar mucho. Durante todo el día estudiaba y leía, estudiaba y leía, y fue un tiempo muy ajetreado. Tuve un poco de suerte. Por una casualidad, todos los grandes jefes —todos salvo Hans Bethe— tuvieron que irse al mismo tiempo: Weisskopf tuvo que regresar al MIT para corregir algo, Teller estaba fuera en ese preciso momento, y Bethe necesitaba alguien con quien hablar y confrontar sus ideas. Bien, él vino a hablar con este mequetrefe que tenía un despacho y empezó a argumentar, a explicar su idea. Yo le repuse: «No, no. Está usted loco. Lo que sucederá será esto». Y él respondió: «Un momento», y explicó por qué no estaba loco, y que el loco era yo, y

seguimos así. Ya ven, cuando oigo hablar de física solo pienso en física y no sé a quién estoy hablando, y digo las mayores bobadas como «no, no, estás equivocado, o estás loco»; pero resulta que eso era exactamente lo que él necesitaba. Así que yo me apunté un tanto a cuenta de eso y terminé como jefe de grupo, por debajo de Bethe y con cuatro tipos a mis órdenes.

Tuve un montón de experiencias interesantes con Bethe. El primer día que vino teníamos una máquina de sumar, una Marchant de funcionamiento manual, y él va y me dice: «Veamos, la presión —la fórmula en la que él había estado trabajando incluía el cuadrado de la presión—; la presión es 48; el cuadrado de 48...». Yo cojo la máquina: «Es aproximadamente 2300». Así que enchufo la máquina para calcularlo exactamente y él me interrumpe. « ¿Quieres saber el valor exacto? Es 2304». Y así era: 2304. Así que le pregunté: « ¿Cómo lo hace?». Él declara: « ¿No sabes calcular los cuadrados de números próximos a 50? Si el número está próximo a 50, por ejemplo 3 por debajo, entonces tomas 25 menos 3, que es 22, lo multiplicas por 100 y le sumas el cuadrado de la diferencia. Por ejemplo, con los 3 de diferencia obtienes que 47 al cuadrado es 2200 más 9: 2209. Simpático, ¿verdad?». Seguimos trabajando (él era muy bueno con la aritmética) y unos instantes después teníamos que tomar la raíz cúbica de 2,5. Para calcular raíces cúbicas se utilizaba una tabla con algunos números de prueba que se introducían en la máquina calculadora que nos había dado la Compañía Marchant. Así que (esto le llevó un poco más de tiempo, ¿saben?) abrí el cajón, saqué la tabla y él sentencia: «1,35». Yo

imaginé que había alguna forma de tomar las raíces cúbicas de números próximos a 2,5, pero resulta que no es así. Le pregunto: «¿Cómo lo hace?». Y él me responde: «Bueno, tú sabes que el logaritmo de 2,5 es tal y tal; entonces lo divides por 3 para tener el logaritmo de la raíz cúbica. Ahora bien, yo sé que el logaritmo de 1,3 es este, el logaritmo de 1,4 es... yo hago una interpolación entre los dos». Yo no podía haber dividido nada por tres, y mucho menos... Así que él se sabía toda su aritmética y era muy bueno en ella, y eso fue un desafío para mí. Seguí practicando. Establecimos una pequeña competición. Cada vez que teníamos que calcular algo hacíamos carreras para ver quién llegaba antes a la respuesta, él y yo, y yo tenía que ganar; al cabo de varios años conseguí hacerlo, ya saben, ganar alguna vez, quizá una de cada cuatro. Por supuesto, cuando uno tiene que multiplicar 174 por 140, por ejemplo, se tiene que percatar de alguna propiedad curiosa de los números. Uno advierte que 173 por 141 es aproximadamente cien veces la raíz cuadrada de 3 multiplicado por cien veces la raíz cuadrada de 2, que es diez mil veces la raíz cuadrada de 6, o diez mil por 2,45. Pero hay que reparar en los números, ya ven, y cada cual reparará en ellos de una forma diferente; nos divertíamos mucho.

Bien, como he dicho, cuando llegué allí por primera vez no estaban listos los dormitorios, pero los físicos teóricos teníamos que alojarnos allí. El primer lugar donde nos colocaron fue en el edificio de la vieja escuela, una escuela para niños que hubo allí antes. El primer lugar en donde viví era algo llamado módulo de mecánica; estábamos todos amontonados en literas y todo eso, pero no estaba

muy bien organizado y Bob Christie y su mujer tenían que ir al baño cada mañana cruzando nuestro dormitorio. Así que era muy incómodo.

El siguiente lugar a donde nos trasladamos era algo llamado la Casa Grande, cuya segunda planta rodeaba a un patio central, y allí estaban pegadas todas las camas una junto a otra, a lo largo de la pared. En el piso de abajo había un gran tablón donde decía qué número tenía tu cama y en qué cuarto de baño tenías que cambiarte. Y bajo mi nombre se leía «Baño C», ¡y no había número de cama! Así que yo estaba bastante enfadado. Por fin se construye la residencia. Voy allí para ver cómo se han asignado las habitaciones y me dicen: «Ahora puedes elegir tu habitación». Traté de escoger una; ¿saben lo que hice?: me fijé en dónde estaba el dormitorio de las chicas y escogí una cama desde la que pudiese verlo. Más tarde descubrí que, justo enfrente, estaba creciendo un gran árbol. Pero, de todas formas escogí esta habitación. Me dijeron que temporalmente habría dos personas en cada habitación, pero que eso sería solo temporal. Cada dos habitaciones compartirían un baño. Eran camas de dos pisos, literas, y yo no quería a otra persona en la habitación. Cuando llegué ahí por primera vez, la primera noche, no había nadie más. En ese momento mi mujer estaba enferma con tuberculosis en Albuquerque, y por eso yo tenía algunas cajas con cosas suyas. Así que abrí una caja y saqué un pequeño camisón y simplemente lo tiré descuidadamente. Abrí la cama de arriba y arrojé el camisón descuidadamente. Saqué las zapatillas; esparcí polvos por el suelo del baño. Lo hice simplemente

para que pareciese que había alguien más allí. ¿Comprenden? Si la otra cama está ocupada, nadie más va a dormir ahí. ¿Entienden? ¿Y qué sucedió entonces? Porque es un dormitorio de hombres. Bien, cuando volví aquella noche mi pijama estaba doblado cuidadosamente y puesto bajo la almohada, y las zapatillas estaban colocadas cuidadosamente al pie de la cama. El camisón de mi mujer estaba doblado cuidadosamente y puesto bajo la almohada, la cama estaba hecha y las zapatillas colocadas cuidadosamente. Habían limpiado el polvo del baño y *nadie* dormía allí. Seguía teniendo la habitación para mí solo. Y la noche siguiente, lo mismo. Cuando desperté desordené la cama de arriba, extendí el camisón, esparcí polvos por el baño y todo eso, y seguí así durante cuatro noches hasta que todo el mundo tuvo su lugar. Todo el mundo estaba acomodado y ya no había peligro de que colocasen a una segunda persona en la habitación. Cada noche, todo estaba muy limpio, todo estaba bien, incluso si era un dormitorio de hombres. Así que eso es lo que sucedió en tal situación.

Me vi metido en política porque había algo denominado Consejo Ciudadano. Apparently los militares iban a decidir ciertas cosas acerca del gobierno de la ciudad, con ayuda de una Junta de Gobierno de la que nunca supe nada. Pero había mucha agitación como la hay en cualquier cosa política. En particular, había facciones: la facción de las amas de casa, la facción de los mecánicos, la facción de los técnicos, y demás. Bueno, los solteros y las solteras, la gente que vivía en la residencia, pensaban que tenían que formar una facción porque se había promulgado una nueva

regla: no podían entrar mujeres en el dormitorio de los hombres. ¡Esto es absolutamente ridículo! Todos éramos personas adultas, por supuesto (ja, ja). ¿Qué se han creído? De modo que nos planteamos una acción política. Lo debatimos y lo votamos, y todo eso; ya saben cómo es. Y así fui elegido para representar a la gente de la residencia, ya ven, en el Consejo Ciudadano.

Un día, cuando ya llevaba un año aproximadamente, o año y medio, en el Consejo Ciudadano, estaba yo hablando con Hans Bethe sobre algo. Él había estado en la Junta de Gobierno durante todo este tiempo. Y yo le conté esta historia, el truco que había hecho poniendo las cosas de mi mujer en la cama de arriba, y él se echó a reír. Y confesó: « ¡Por eso estás en el Consejo Ciudadano!». Resulta que había sucedido lo siguiente. Hubo un informe, un informe muy serio. La pobre mujer de la limpieza estaba temblando; la mujer que limpiaba las habitaciones del dormitorio había abierto la puerta y de repente se encuentra con esto: ¡alguien está durmiendo con uno de los hombres! Temblorosa, no sabe qué hacer. Hace un informe, la limpiadora informa a la gobernanta, la gobernanta informa al teniente, el teniente informa al mayor, y la cosa sigue hacia arriba, hasta que llega a los generales en la Junta de Gobierno. ¿Qué van a hacer?: ¡Lo van a pensar! Y mientras tanto, ¿qué instrucciones transmiten a los capitanes, y estos a los mayores, y estos a los tenientes, y estos a la gobernanta, hasta llegar a la limpiadora? «Coloquen las cosas exactamente como están, límpienlas», y veamos qué sucede. ¿Comprenden? Al día siguiente, nuevo informe: lo mismo, brumo, bruuuuump, bruuuuuump. Entre tanto, durante

cuatro días, se preocupan de lo que van a hacer. Finalmente promulgan una regla. « ¡No pueden entrar mujeres en el dormitorio de los hombres!». Y eso causó un gran *revuelo* allí. Ven ustedes, ahora tenían que participar en la política y eligieron a alguien que los representara...

Ahora me gustaría hablarles de la censura que teníamos allí. Decidieron hacer algo completamente ilegal, que era censurar el correo personal dentro de Estados Unidos, en los Estados Unidos continentales, algo a lo que no tenían ningún derecho. De modo que tuvo que ser establecido de forma muy delicada, como algo voluntario. Todos aceptaríamos voluntariamente no cerrar los sobres en los que enviábamos nuestras cartas. Aceptaríamos, estaríamos de acuerdo en que se abriesen las cartas que nos llegaban; eso fue voluntariamente aceptado por nosotros. Dejaríamos abierto el correo saliente; ellos lo cerrarían si les parecía que estaba bien. Si no estaba bien en su opinión, en otras palabras, si encontraban algo que no debería salir fuera, nos devolverían la carta con una nota señalando que había una violación de tal y tal párrafo de nuestro «acuerdo», y todo eso. Así, de forma muy delicada, una vez que todos estos tipos científicos de ideología liberal habían aceptado una proposición semejante, se estableció finalmente una censura. Con muchas reglas: por ejemplo, se nos permitía hacer comentarios sobre el carácter de la administración si así lo queríamos, y podíamos escribir a nuestro senador y decirle que no nos gustaba cómo iban las cosas, y cosas por el estilo. Así

que todo quedó establecido y nos dijeron que nos notificarían cualquier dificultad que hubiera.

Y así llega el día, el primer día de la censura. ¡Teléfono! ¡Riiiiig! Yo: «¿Qué?». «Venga, por favor». Yo voy. «¿Qué es esto?». Es una carta de mi padre. «Bien, ¿qué es?». Hay un papel rayado, y hay unas líneas con puntos: cuatro puntos abajo, un punto arriba, dos puntos abajo, un punto arriba, un punto debajo de un punto. «¿Qué es esto?». Yo dije: «Es un código». Y ellos: «Sí, es un código; pero ¿qué dice?». Yo dije: «No sé lo que dice». Dijeron: «Bien, ¿cuál es la clave del código; cómo lo descifra?». Yo dije: «Pues no lo sé». Entonces ellos dijeron: «¿Qué es esto?». Yo dije: «Es una carta de mi mujer». «Dice TJXYWZ TW1X3. ¿Qué es esto?». Yo dije: «Otro código». «¿Cuál es la clave?». «No lo sé». Dijeron: «¿Usted está recibiendo mensajes en clave y no la conoce?». «Exactamente —dije yo—. Juego con ellos. Les reto a que me envíen un código que yo no pueda descifrar, ¿ven ustedes? De modo que se inventan códigos y me envían mensajes sin decirme cuál es la clave». Ahora bien, una de las reglas de la censura era que no iban a interferir en nada que uno hiciera normalmente en el correo. Así que dijeron: «Bien, usted va a tener que decirles que por favor envíen la clave con el mensaje». Dije: «Pero ¡yo no quiero ver la clave!». Dijeron: «Muy bien, nosotros sacaremos la clave». Y llegamos a ese compromiso. ¿Comprenden? Todo muy bien. Al día siguiente recibo una carta de mi mujer que dice: «Me resulta muy difícil escribir porque me da la sensación de que ese [espacio en blanco] está mirando por encima de mi hombro». Y en ese lugar hay un borrón de algo que ha sido meticulosamente

eliminado con un borrador de tinta. Así que voy a la oficina y digo: «Se suponía que ustedes no iban a tocar el correo entrante si no les gusta. Pueden decírmelo pero se suponía que no iban a tocarlo. Simplemente pueden leerlo, pero se supone que no van a quitar nada». Dijeron: «No sea ridículo; ¿piensa usted que es así como trabajan los censores, con un borrador de tinta? Ellos utilizan unas tijeras para cortar las cosas». Yo dije: muy bien. Así que contesté la carta de mi mujer y le dije: « ¿Utilizaste un borrador de tinta en tu carta?». Me contesta: «No, no utilicé borrador de tinta en mi carta; debe haber sido el...», y aquí hay un hueco recortado. Así que volví al tipo encargado de esto, el mayor que se suponía que estaba encargado de todo esto, y me quejé. Eso sucedió durante algunos días. Yo tenía la sensación de ser una especie de representante que tenía que resolver las cosas. Él trató de explicarme que estos tipos de la censura habían sido instruidos para hacerlo, y no entendían esta nueva forma tan delicada. Yo trataba de ir por delante, de tener la máxima experiencia, escribía a mi mujer todos los días. Así que él dijo: « ¿Qué es lo que pasa, no cree usted en mi buena fe, en mi buena voluntad?». Yo digo: «Sí, usted tiene muy buena voluntad, pero creo que no tiene poder. Porque ya ve usted que esto viene sucediendo hace tres o cuatro días». Dijo: «Bien, ¡vamos a verlo!». Agarra el teléfono... todo estaba solucionado. Ya no habría más cortes en las cartas.

Sin embargo, surgieron otras dificultades. Por ejemplo, un día recibí una carta de mi mujer y una nota del censor que decía que había un código incluido, sin la clave, y que por eso lo habían eliminado. Y

cuando ese mismo día fui a ver a mi mujer a Albuquerque, ella me dijo: «Bien, ¿dónde están todas las cosas?». Yo dije: « ¿Qué cosas?». Ella dice: «El litargirio, la glicerina, los perritos calientes, la ropa de la lavandería». Dije: «Espera un momento, ¿eso era una lista?». Ella dice: «Sí». «Eso era un *código*», dije yo. Ellos lo tomaron como un código: litargirio, glicerina, etc. Otro día estaba yo pasando el tiempo —todo esto sucedió durante las primeras semanas, unas semanas antes de que llegáramos a un acuerdo—: estaba enredando con la máquina de sumar, con la máquina computadora, y advierto algo. Por eso, cada día que escribía tenía un montón de cosas que contar. Porque, fíjense que cosa tan curiosa. Si se divide 1 entre 243 se obtiene 0,004115226337448559. Es muy preciso; luego se complica un poco cuando los restos parciales se hacen pequeños y se pierde la pauta durante algunos pasos, hasta que se llega a un resto parcial de 1 y todo se repite de nuevo. Yo estaba explicando eso, de qué forma tan bonita se repiten los ciclos; a mí me parecía bastante divertido. Pues bien, lo pongo en el correo y me lo devuelven; no pasa, y hay una pequeña nota: «Vea el párrafo 17B». Miro el párrafo 17B donde se especifica: «Las cartas estarán escritas solo en inglés, ruso, español, portugués, latín, alemán... Para escribir en cualquier otra lengua hay que obtener permiso por escrito». Y continuaba: «No se permiten códigos». Así que contesté al censor con una pequeña nota incluida en mi siguiente carta en la que decía que, en mi opinión, esto no puede ser un código, porque si realmente uno divide 1 por 243 *obtiene* de hecho..., y escribía todas esas cifras; y, por consiguiente, no hay más información en el número 1-1-1-1-

cero, cero, cero que la que hay en el número 243, que apenas es información. Y así sucesivamente. Por lo tanto pedía permiso para escribir mis cartas en números arábigos. Me gusta utilizar números arábigos en mis cartas. Así conseguí que todo eso pasara.

Siempre había algún problema con la entrada y salida de las cartas. En una ocasión mi mujer siguió insistiendo en mencionar el hecho de que se sentía incómoda escribiendo con la sensación de que el censor estaba mirando [por encima del hombro]. Como norma, se suponía que no íbamos a mencionar la censura. *Nosotros* no lo íbamos a hacer, pero ¿cómo podían decírselo a ella? Así que continuamente me enviaban notas: «Su mujer mencionó la censura». *Por supuesto* que mi mujer mencionaba la censura, así que finalmente me enviaron una nota que decía: «Por favor, informe a su mujer de que no debe mencionar la censura en sus cartas». Así que cojo mi carta y empiezo: «Me han pedido que te informe de que no debes mencionar la censura en tus cartas». Phoom, phoooo. ¡Devuelta! Así que escribo: «Me han pedido que informe a mi mujer de que no debe mencionar la censura. ¿Cómo demonios voy a hacerlo? Además, ¿por qué tengo que pedirle que no mencione la censura? ¿Me esconden algo?». Es muy interesante que sea el propio censor el que tenga que decirme que le diga a mi esposa que no me diga que ella... Pero tenían una respuesta. Dijeron que sí, que estaban preocupados por la posibilidad de que el correo fuera interceptado en el camino desde Albuquerque y alguien descubriera que había censura si miraban el correo, y que ella debía tener la amabilidad de actuar de forma más natural. Así que la próxima vez

que fui a Albuquerque hablé con ella y le dije: «Mira, no mencionemos la censura», pero habíamos tenido tantos problemas que al final tuvimos que elaborar un código, algo que era ilegal. Establecimos un código; si yo ponía un punto al final de mi firma, eso significaba que había vuelto a tener problemas, y ella pasaría al siguiente de los movimientos que ella había planeado. Ella pasaba allí todo el día sentada a causa de su enfermedad, y tenía tiempo para pensar qué cosas podía hacer. La última cosa que hizo fue enviarme un anuncio, para ella perfectamente legítimo, que decía: «Envíe a su novio una carta-rompecabezas. Aquí están los espacios en blanco. Nosotros le vendemos los espacios en blanco, usted tiene que escribir la carta en ellos, trocearla, meterla en un sobre pequeño y enviarla por correo». Así que con la carta recibí una nota que decía: «No tenemos tiempo para juegos. Por favor, ¡diga a su mujer que se limite a cartas normales!». Bien, estábamos listos para la siguiente jugada. La carta empezaría: «Espero que te hayas acordado de abrir esta carta con cuidado porque he incluido el Pepto-Bismol para tu estómago, tal como quedamos». La carta estaría llena de polvos. Esperábamos que la abrieran en la oficina y el polvo se derramara por el piso; ellos se pondrían nerviosos porque se suponía que no iban a revolver nada, tendrían que recoger todo este Pepto-Bismol... Pero no hizo falta llegar a eso. ¿Comprenden?

Como resultado de todas estas experiencias con el censor, yo sabía exactamente lo que podía pasar y lo que no podía pasar. Nadie más sabía tanto como yo. Y así pude hacer algún dinero haciendo apuestas. Un día descubrí que los hombres que todavía vivían fuera

de la valla y querían entrar eran demasiado perezosos para dar un rodeo hasta la puerta, así que habían abierto un agujero en la valla a cierta distancia. Así que salí por la puerta de la valla, fui hasta el agujero y entré, salí de nuevo, y así muchas veces, hasta que el sargento que estaba en la puerta empezó a preguntarse ¿qué está pasando, cómo es posible que este tipo esté siempre saliendo y nunca entra? Y, por supuesto, su reacción natural fue llamar al teniente y tratar de meterme en la cárcel por hacer esto. Yo les expliqué que había un agujero. Ya ven, yo estaba tratando una vez más de corregir las cosas, de señalar que había un agujero. Hice una apuesta con alguien a que podría decir dónde estaba el agujero de la valla, y enviarlo fuera por correo. Y efectivamente, lo hice. La forma de hacerlo consistía en que yo escribía: «Tendrías que ver cómo se administra este lugar»; ya ven, ese es el tipo de cosas que se nos permitía decir. «Hay un agujero en la valla a 25 metros de tal y cual lugar, es de tal y cual tamaño, así que se puede pasar por él». ¿Qué podían hacer ellos? No podían decirme que no había tal agujero. Lo que quiero decir es que peor para ellos si existía el agujero. Ellos son los que deberían *arreglarlo*. Así que conseguí que eso pasara. También pasé una carta que contaba que uno de los muchachos que trabajaba en uno de mis grupos había sido sacado de la cama en plena noche e interrogado frente a unos focos por algunos idiotas del ejército porque descubrieron algo sobre su padre o algo parecido. No lo sé muy bien, se suponía que era un comunista. Su nombre era Kamane¹³. Ahora es un hombre famoso.

¹³ Este es el nombre que aparece en el original. En realidad, se trata de John Kemeny (1926-1992), matemático y

Bueno, había también otras cosas. Yo siempre estaba tratando de arreglarlas, como lo de señalar los agujeros en la valla y todo eso, pero siempre trataba de señalar estas cosas de una forma indirecta. Y una de las cosas que yo quería señalar era esta: que desde el principio teníamos secretos terriblemente importantes. Habíamos calculado muchas cosas sobre el uranio, sobre cómo funcionaba, y todo este material estaba en documentos que se guardaban en archivadores de madera que tenían pequeños candados corrientes y normales. Los armarios tenían también algunas piezas hechas en el taller, como una barra que los recorría de arriba abajo y luego estaba sujeta por un candado; pero al fin y al cabo era solo un candado. Además, ni siquiera hacía falta abrir el candado para hacerse con lo que había dentro, para sacar cosas de estos armarios de madera; tan solo había que inclinarlos hacia atrás. Ya saben ustedes que en el cajón inferior hay una varilla que supuestamente lo sujetaba. Pero en la parte inferior hay un agujero, y uno puede sacar los papeles desde abajo. Así que yo me acostumbré a abrir las cerraduras y a señalar que eso era muy fácil de hacer. Cada vez que teníamos una reunión de todo el grupo, y nos juntábamos todos, yo me levantaba y decía que teníamos secretos importantes y que no deberíamos guardarlos en esas cosas. Las cerraduras eran muy malas. Necesitábamos candados mejores. Un día que estábamos reunidos, Teller se levantó y me dijo: «Bien, yo no guardo mis secretos más importantes en mi archivador; los guardo en el cajón de mi mesa. ¿No es eso mejor?». Dije: «No lo sé, no he visto el cajón

filósofo de origen húngaro. Después de trabajar en el Proyecto Manhattan fue colaborador de Einstein; también es conocido por ser coautor del lenguaje BASIC. (*N. del t.*)

de tu mesa». Bueno, él estaba sentado en una de las primeras filas y yo estaba sentado muy atrás. Así que la reunión continúa y yo salgo furtivamente de la reunión y bajo a ver el cajón de su mesa. ¿Comprenden? Ni siquiera tenía que abrir la cerradura del cajón. Resulta que si uno metía la mano por la parte trasera inferior, podía sacar los papeles como en esos dispensadores de toallas de papel; sale uno, luego otro, luego otro... Vacíé por completo el condenado cajón, saqué todo, lo aparté a un lado y luego subí al piso superior y volví a entrar. La reunión había concluido y todo el mundo estaba saliendo, así que yo me uno al grupo, ya saben, andando con ellos y corro para alcanzar a Teller, y le digo: «Oh, a propósito, déjame ver el cajón de tu mesa». Y dice: «Por supuesto», y entramos en su despacho y me muestra la mesa, y yo la miro y digo que me parece muy bien. Yo dije: «Veamos qué tienes ahí dentro». «Me encantaría enseñártelo —dice, mientras introduce la llave y abre el cajón—, si no lo hubieras visto ya por ti mismo». El problema de gastarle una broma a una persona tan inteligente como Mr. Teller es que, en cuanto ve que algo va mal, ¡el *tiempo* que necesita para comprender lo que ha pasado exactamente es tan corto que apenas puedes disfrutarlo!

Bien, tuve un montón de otras historias divertidas con cajas fuertes pero esas ya no tienen nada que ver con Los Álamos, así que no seguiré hablando de ello. Ahora quiero hablar de algunos otros problemas con que me encontré y que son bastante interesantes. Uno de ellos tenía que ver con la seguridad de la planta en Oak Ridge. En Los Álamos se iba a construir la bomba, pero en Oak

Ridge estaban tratando de separar los isótopos de uranio, el uranio 238 y el uranio 236, y el último, el uranio 235 que era el explosivo, ¿correcto? Así que justo empezaban a obtener cantidades infinitesimales de algo experimental, de 235, pero al mismo tiempo estaban practicando. Era una planta muy grande, iban a tener tanques llenos del material, de sustancias químicas, y tenían que tomar el material purificado y re purificarlo y tenerlo listo para el paso siguiente. Había que purificarlo en varias etapas. Así que, por una parte, estaban haciendo prácticas y, por otra, estaban obteniendo experimentalmente una pequeña cantidad de una de las piezas del aparato. Y estaban tratando de aprender a analizarlo, de determinar cuánto uranio 235 había allí. Nosotros les enviábamos instrucciones pero ellos nunca lo conseguían. Finalmente Segré¹⁴ dijo que lo único que se podía hacer era que él fuera allí para ver qué es lo que estaban haciendo y para entender por qué el análisis no funcionaba. Los militares dijeron que no, que nuestra política era mantener toda la información de Los Álamos en un solo lugar, y que la gente de Oak Ridge no debería saber nada del uso que se le iba a dar; ellos solo sabían lo que estaban tratando de hacer. Quiero decir que los jefes sabían que estaban separando uranio, pero no sabían lo potente que era la bomba ni cómo funcionaba exactamente, ni muchas otras cosas. La gente que estaba por debajo no tenía la más mínima idea de lo que estaban haciendo. Y el ejército quería mantenerlo así, sin intercambio de información; pero Segré insistió en que eso era importante. Ellos nunca tenían éxito en los análisis,

¹⁴ Emilio Segré (1905-1989), ganador (con Owen Chamberlain) del Premio Nobel de Física en 1959 por el descubrimiento del antiprotón. (*N. del e.*)

todo se iba en humo. Así que Segré fue para ver qué estaban haciendo y mientras andaba por allí vio que alguien llevaba una garrafa llena de agua, agua verde; el agua verde es nitrato de uranio. Él dice: « ¿Van a manejarlo igual cuando esté purificado? ¿Es eso lo que van a hacer?». Dijeron: «Por supuesto, ¿por qué no?». «¿No explotará?», dice él. « ¡¿Hum?! ¿¡Explotar!?! ». Por eso el ejército dijo: «Ven ustedes, ¡no deberíamos haber dejado que se filtrara ninguna información!». Bien, resultó que los militares se habían dado cuenta de cuánto material necesitábamos para hacer una bomba, 20 kilogramos o lo que fuera, y se habían dado cuenta de que nunca estaría todo ese material purificado junto en la planta, así que pensaron que no había peligro. Pero lo que no sabían es que los neutrones son mucho más efectivos cuando son frenados por el agua; y que, por eso, en agua se necesita menos de una décima, mejor dicho, menos de una centésima parte de material para dar lugar a una reacción que genere radiactividad. No se produce una gran explosión, pero se genera radiactividad que mata a las personas que hay en las inmediaciones. Así que era muy peligroso y ellos no habían prestado ninguna atención a la seguridad.

En vista de eso, Oppenheimer envía un telegrama para Segré: «Recorre la planta entera, fíjate dónde se supone que se van a concentrar las cosas, de acuerdo con el proceso que *ellos* han diseñado. Mientras tanto nosotros calcularemos cuánto material puede juntarse antes de que se produzca una explosión». Y así, dos grupos se pusieron a trabajar en ello. El grupo de Christie trabajó sobre disoluciones acuosas y yo, mejor dicho, mi grupo, trabajamos

sobre polvo seco en cajas. Y calculamos cuánto material se necesitaba. Christie iba a ir a Oak Ridge para contarles a todos cuál era la situación. Así que yo le di con mucho gusto todos mis números a Christie y le dije: aquí tienes todo, ve. Christie pilló una pulmonía; tuve que ir yo. Nunca antes había viajado en avión; viajé en un avión. *Ataron* los secretos con una especie de cinturón, ¡en mi espalda! En aquellos días el avión era como un autobús. Tenía varias paradas, con la diferencia de que las estaciones estaban muy separadas. Te paras para esperar. Hay un tipo de pie, cerca de mí, agitando una cadena y diciendo algo como: «Debe ser *terriblemente* difícil volar en avión estos días sin tener una prioridad». No pude resistir. Le dije: «No lo sé, yo *tengo* una prioridad». Un poco más tarde embarcan algunos generales y tienen que sacar a algunos de nosotros, los que tienen un número 3. Muy bien, yo tengo un número 2. El pasajero probablemente escribió a su congresista, si es que él mismo no era un congresista, diciendo, ¿qué hacen enviando a estos niños con altas prioridades en medio de una guerra? En todo caso, llegué allí. Lo primero que hice fue pedir que me llevaran a la planta y no dije nada; simplemente lo miraba todo. Descubrí que la situación era incluso peor de lo que había informado Segré, porque él pasó algunas cosas por alto cuando fue allí por primera vez. Él había advertido algunas cajas amontonadas pero no había advertido otro gran montón de cajas que había en otra habitación, y estaban pared con pared. Y cosas así. Y si se junta mucho material, todo se va por los aires. Me recorrí toda la planta; tengo una memoria muy mala pero cuando trabajo

intensamente tengo una buena memoria a corto plazo y así pude recordar todo tipo de cosas absurdas como el edificio noventa-y-dos-cero-siete, los números de tanques, esto y aquello, y así sucesivamente. Aquella noche volví a casa y lo repasé todo viendo dónde estaban todos los peligros y lo que habría que hacer para prevenirlos. Es bastante fácil: se pone cadmio en disolución para absorber los neutrones que hay en el agua, se separan las cajas de modo que no haya grandes concentraciones, que no haya demasiado uranio junto y así sucesivamente, siguiendo ciertas reglas. Y así utilicé todos los ejemplos, desarrollé todos los ejemplos y calculé cómo funcionaba el proceso de congelación. Yo tenía la impresión de que no se podría hacer la planta segura a menos que ellos supieran cómo funcionaba. Para el día siguiente estaba prevista una gran reunión.

¡Ah!, olvidé decir que, antes de partir, Oppenheimer me dijo: «Cuando vayas a Oak Ridge tienes que saber cuáles son las personas técnicamente capaces allí: Mr. Julian Web, Mr. Tal y Tal, y así sucesivamente. Quiero que te asegures de que estas personas están en la reunión, que les digas cómo están las cosas, ya sabes, cuáles son los problemas de seguridad, que lo *entiendan* realmente: ellos son los responsables». Dije: « ¿Y qué pasa si ellos no están en la reunión, qué se supone que tengo que hacer?». Él dijo: «Entonces tú debes decir: *Los Álamos no puede hacerse responsable de la seguridad de la planta de Oak Ridge a menos que...*». Yo dije: «¿Quiere decir que yo, Ricardito, vaya allí y diga...?». Él dice: «Sí, Ricardito, vas y haces eso». ¡Realmente yo crecía rápido! Acudí al día

siguiente a la reunión y, por supuesto, allí estaban todas estas personas, los grandes jefes y los técnicos de la compañía a los que yo quería encontrar, y los generales y demás, que estaban interesados en los problemas, organizándolo todo. Era una reunión importante para tratar este grave problema de la seguridad, porque la planta nunca iba a funcionar. Hubiera explotado, les juro que hubiera explotado si nadie le hubiera prestado atención. Había un teniente que se ocupaba de mí. Me dijo que el coronel había dicho que yo no debería contarles cómo funcionaban los neutrones y todos esos detalles porque querían mantener las cosas separadas. Solo tenía que decirles lo que había que hacer para mantener la seguridad. Yo dije que, en mi opinión, era imposible que obedecieran un montón de reglas si ellos no entendían el funcionamiento. Por eso, mi opinión es que solo va a funcionar si se lo explico, y ¡Los Álamos no puede hacerse responsable de la seguridad de la planta de Oak Ridge a menos que ellos tengan una información completa del funcionamiento! El efecto fue sensacional. Él fue a ver al coronel. «Deme solo cinco minutos», dice el coronel. Va hacia la ventana y se queda pensando, y en eso ellos son muy buenos. Son buenos tomando decisiones. Para mí era realmente notable que el problema acerca de si debía o no darse información sobre el funcionamiento de la bomba en la planta de Oak Ridge tuviera que decidirse, y pudiera decidirse, en cinco minutos. Por eso yo tengo mucho respeto por estos tipos, los militares, porque yo no puedo decidir nunca nada importante por mucho tiempo que me tome.

Así que, en menos de cinco minutos, él dice: «Muy bien, Mr. Feynman, siga adelante». Entonces me senté y les hablé de los neutrones, de cómo funcionan, da, da, ta ta ta, hay demasiados neutrones juntos, ustedes tendrán que mantener el material apartado, el cadmio absorbe, y los neutrones lentos son más eficaces que los neutrones rápidos, y yak yak; todas las cosas que eran el catón en Los Álamos, pero de las que ellos nunca habían oído hablar, así que me tomaron por un gran genio. ¡Yo era un dios venido del cielo! Estaban todos estos fenómenos que no se entendían y de los que nunca habían oído hablar antes, y yo lo sabía todo sobre ello, pude ofrecerles hechos y números y todo lo demás. Así pasé de ser un principiante allí en Los Álamos a ser un supergenio aquí. Bien, el resultado fue que decidieron hacer grupos pequeños y realizar sus propios cálculos para aprender a hacerlo bien. Empezaron a rediseñar plantas. Allí estaban los diseñadores de las plantas, los arquitectos, los ingenieros y los ingenieros químicos de la nueva planta que iban a tratar el material separado. Había más personas. Volví allí otra vez. Me habían dicho que iban a rediseñar la planta para la separación y que regresara en unos meses.

Así que volví unos meses después, algo más de un mes; los ingenieros de la Compañía Stone and Webster habían acabado el diseño de la planta y ahora me tocaba a mí examinarlo. ¿Comprenden? ¿Cómo examinas una planta que todavía no está construida? Yo no lo sé. Así que entro en una habitación con estos colegas. Siempre había un teniente Zutano que venía conmigo,

cuidando de mí, ya saben; yo tenía que tener un escolta en cualquier lugar. Así que viene conmigo, me introduce en esta habitación y ahí están estos dos ingenieros y una mesa larguísima, una mesa enorme, tremenda, cubierta con un plano tan grande como la mesa; no un plano, sino una pila de planos. Yo había hecho dibujo técnico cuando estaba en el instituto, pero no era muy bueno interpretando planos. Empiezan a explicármelos pensando que yo era un genio. «Mr. Feynman, nos gustaría que entienda cómo está diseñada la planta, ya sabe usted que una de las cosas que teníamos que evitar era la acumulación de material». Hay que resolver problemas del tipo siguiente: hay un evaporador en funcionamiento donde se trata de acumular el material; si la válvula se atasca o algo parecido y se acumula demasiado material, explotará. Así que me explican que esta planta está diseñada de modo que no haya solo una válvula y así, si una de las válvulas se atasca no pasa nada. Hace falta que haya al menos dos válvulas en cada lugar. Me explican cómo funciona. El tetra cloruro de carbono entra por aquí, el nitrato de uranio pasa de aquí allá, sube y baja, atraviesa el piso, sube por las tuberías, sube desde el segundo piso, bluuuuuuurp, desde los planos, baja, sube, baja, sube, hablando y explicando la complicadísima planta química a toda velocidad. Yo estoy completamente aturdido; peor aún, ¡no sé lo que significan los símbolos del plano! Hay una especie de cosa que al principio pienso que es una ventana. Es un cuadrado con una cruz en el medio, y aparece en cualquier maldito lugar. Líneas con este maldito cuadrado. Yo pienso que es una ventana; pero no, no puede ser una

ventana porque no está siempre en el borde. Tengo ganas de preguntarles qué es. Ustedes ya deben haberse encontrado en una situación parecida: no preguntaron inmediatamente, como hubiera sido lo correcto. Pero ellos habían estado hablando demasiado tiempo. Yo había dudado demasiado. Si les preguntas ahora, dirán: ¿por qué me has hecho perder todo este tiempo? Yo no sé qué hacer. Reflexiono, a veces he tenido suerte. Ustedes no van a creer esta historia, pero les juro que es absolutamente cierta; ¡no se puede tener más suerte! Yo pensaba ¿qué voy a hacer, qué voy a hacer? Tuve una idea. ¿No será una válvula? Por eso, para averiguar si es o no una válvula pongo un dedo en uno de los planos en la página número 3, abajo, y digo: «¿Qué sucede si esta válvula se atasca?», imaginando que ellos van a decir: «Eso no es una válvula, señor, es una ventana». Pero uno mira al otro y dice: «Bien, si esa válvula se atasca», y suben y bajan por el plano, suben y bajan, el otro tipo sube y baja, de aquí para allá, y ambos se miran uno a otro y se dirigen hacia mí con la boca abierta: «Usted está absolutamente en lo cierto, señor». Así que enrollan los planos y se van, y nosotros salimos detrás. Y el teniente Zutano, que había estado siguiéndome todo el rato, dijo: «Usted es un genio. Ya pensé que usted era un genio cuando después de recorrer la planta una vez podía hablar a la mañana siguiente del evaporador C-21 en el edificio 90-207, pero lo que usted acaba de hacer es fantástico, ¿cómo puede hacer algo así?». Yo le dije: «Hay que tratar de averiguar si es o no una válvula». Otro tipo de problema en el que trabajé era el siguiente. Teníamos que hacer montones de cálculos y

los hacíamos en máquinas calculadoras Marchant. Dicho sea de paso, y solo para darles una idea de cómo era Los Álamos, teníamos estas computadoras Marchant. No sé si ustedes saben cómo son: son calculadoras manuales en las que hay teclas con números; uno pulsa las teclas y la calculadora multiplica, divide, suma y todo eso. No con la facilidad con que lo hacen ahora, sino con dificultad; eran artilugios mecánicos. Y había que enviarlas a la fábrica cuando necesitaban ser reparadas. No teníamos a nadie preparado para hacerlo, que es lo habitual, y por eso siempre había que enviarlas a la fábrica. Muy pronto empezamos a quedarnos sin máquinas. Así que yo y otros colegas empezamos a quitar las cubiertas. Se suponía que no debíamos hacerlo, porque las instrucciones decían: «Si ustedes quitan las cubiertas, nosotros no nos hacemos responsables...». Así que quitamos las cubiertas y sacamos una buena serie de lecciones. Cuando quitamos la primera cubierta vimos que había un eje con un agujero y un muelle que colgaba, y era obvio que el muelle debía entrar en el agujero: eso era fácil. En cualquier caso, sacamos una serie de lecciones sobre la forma de repararlas y cada vez nos hacíamos más expertos y nos atrevíamos con reparaciones cada vez más complicadas. Cuando nos encontrábamos con algo demasiado complicado enviábamos la máquina a la fábrica, pero nosotros hacíamos las reparaciones fáciles y manteníamos las cosas funcionando. Yo también reparé algunas máquinas de escribir. Acabé reparando todas las computadoras; los demás me lo dejaban a mí. Reparé algunas máquinas de escribir, pero había un tipo en el taller de máquinas

que era mejor que yo en eso y él se ocupó de las máquinas de escribir; yo me ocupé de las máquinas de sumar. El problema más importante que nos planteamos era averiguar qué es lo que sucedía exactamente durante la explosión de la bomba, cuando se comprime el material mediante una explosión y luego se libera. Había que saber qué sucede exactamente, para poder calcular exactamente cuánta energía se liberaba, y eso requería mucha más capacidad de cálculo de la que disponíamos. Y un colega muy inteligente llamado Stanley Frankle se dio cuenta de que eso podía hacerse en máquinas IBM. La compañía IBM disponía de máquinas para fines comerciales, máquinas de sumar, denominadas tabuladoras, y un multiplicador, tan solo una máquina, una caja grande: uno introducía tarjetas perforadas y la máquina tomaba dos números de una tarjeta, los multiplicaba y los imprimía en otra tarjeta. Y luego había compiladoras y clasificadoras y todo eso. Con todo eso, él ideó un bonito programa. Si pudiéramos tener muchas de estas máquinas en una habitación, podríamos tomar las tarjetas y hacer un ciclo de operaciones con ellas; cualquiera que haga cálculos numéricos sabe ahora exactamente de lo que estoy hablando, pero entonces esto era algo nuevo: producción en serie con máquinas.

Habíamos hecho cosas así en máquinas de sumar. Normalmente uno procede paso a paso, y lo hace todo uno mismo. Pero esto era diferente: primero se va al sumador, luego vamos al multiplicador, luego se vuelve al sumador y así sucesivamente. Así que él diseñó este método y encargó una máquina de la compañía IBM, porque comprendimos que era una buena manera de resolver nuestros

problemas. Descubrimos que había alguien en el ejército que tenía formación en IBM. Necesitábamos un hombre para repararlas, para mantenerlas en marcha y todo eso. Nos iban a enviar a este tipo, pero se retrasaba, siempre se retrasaba. Ahora bien, nosotros *siempre* teníamos prisa. Tengo que explicarlo: *todo* lo que hacíamos, tratábamos de hacerlo lo más rápidamente posible. En este caso concreto, desarrollamos todos los pasos numéricos que se suponía que había que hacer, que se suponía que iban a hacer las máquinas: multiplicar esto, y luego hacer eso otro y restar lo de más allá. Desarrollamos el programa, pero no teníamos ninguna máquina para probarlo. De modo que lo que hicimos fue llenar una habitación con chicas, cada una de ellas con una Marchant. Pero *ella* era el multiplicador y *ella* era el sumador, y esta elevaba al cubo; teníamos tarjetas, tarjetas con índices y todo lo que ella hacía era elevar al cubo un número y pasárselo a la siguiente. Esta hacía de multiplicador, la siguiente hacía de sumador; recorriamos el ciclo, eliminábamos todos los errores. Bien, así lo hicimos. Y resultó que podíamos hacerlo a gran velocidad. Nunca antes habíamos hecho cálculo en serie; cualquiera que hubiera hecho cálculos antes alguna vez había realizado todos los pasos por sí mismo. Pero Ford tuvo una buena idea, la maldita cosa trabajaba mucho más rápidamente que de la otra forma, y con este sistema llegamos a alcanzar una velocidad igual a la predicha para la máquina IBM: exactamente la misma. La única diferencia es que las máquinas IBM no se cansaban y podían trabajar tres turnos. Pero las chicas se cansaban al cabo de un rato. En cualquier caso, este proceso nos

sirvió para corregir los errores. Finalmente llegaron las máquinas, pero no el hombre que tenía que repararlas. Así que nosotros las montamos. Estas computadoras eran unas de las máquinas con una tecnología más complicada de aquellos días, grandes mamotretos que venían parcialmente desmontados, junto con montones de cables y planos de lo que había que hacer. Las montamos Stan Frankle y yo con otro colega, aunque tuvimos nuestros problemas. El problema mayor era que continuamente venían los grandes jefes y decían que íbamos a romper algo. Las montamos y a veces funcionaban y a veces estaban mal ensambladas y no funcionaban. Y así nos las apañamos y las hicimos funcionar, aunque no conseguimos que todas funcionasen. Una vez que estaba yo trabajando con un multiplicador, vi una pieza doblada dentro y tuve miedo de enderezarla porque podría romperse. Siempre nos estaban diciendo que íbamos a romperlas y dejarlas irreparables. Hasta que finalmente llegó el hombre de la compañía IBM, tal como estaba previsto. Vino y reparó lo que nosotros todavía no teníamos listo, y así pudimos poner en marcha el programa. Pero él tuvo problemas con la misma máquina con la que yo los había tenido. Al cabo de tres días, él todavía estaba tratando de arreglarla. Fui y le dije: «Oh, yo noté que esto estaba doblado». Y él dijo: « ¡Claro, eso es todo lo que le pasa!». (Chasquido). Todo estaba bien. De modo que era eso.

Bien, Mr. Frankle puso en marcha este programa pero cogió una enfermedad, la enfermedad del computador, algo que ahora conoce todo el que haya trabajado con computadores. Es una enfermedad

muy grave e interfiere completamente en el trabajo. Era un problema serio que tratábamos de resolver. La enfermedad con los computadores es que tú *juegas* con ellos. Son maravillosos. Tienes estos conmutadores que determinan, si es un número par haces esto, si es impar haces aquello; y si eres suficientemente listo, muy pronto puedes hacer cosas cada vez más complicadas en una máquina. Pero al cabo de un tiempo, todo el sistema se vino abajo. Resulta que él no estaba prestando ninguna atención; no estaba supervisando a nadie. El sistema iba muy, muy lentamente. El auténtico problema consistía en que él estaba sentado en una habitación imaginando la forma de hacer que un tabulador imprimiese automáticamente arco-tangente de x , y luego empezase a imprimir columnas y luego bitsi, bitsi, bitsi y calcularía el arco-tangente automáticamente integrando sobre la marcha y haciendo una tabla entera en una misma operación. Eso era absolutamente inútil. *Teníamos* tablas de arcos-tangentes. Pero si ustedes han trabajado alguna vez con computadores comprenderán la enfermedad: es el *placer* de ver todo lo que uno puede hacer. Pero él fue el primero que pilló la enfermedad; el pobre colega que inventó la cosa fue el que pilló la enfermedad.

Así que me pidieron que dejase de trabajar en lo que yo estaba haciendo con mi grupo y asumiese la dirección del grupo de IBM. Advertí la enfermedad y traté de evitarla. Y aunque resolvían tres problemas en nueve meses, mi grupo era muy bueno. El primer problema era que nadie les había dicho nada; los habían seleccionado por todo el país para algo llamado Destacamento de

Ingenieros Especiales. Había muchachos muy inteligentes procedentes de los institutos que tenían una gran capacidad para la ingeniería, y el ejército los reunió en el Destacamento de Ingenieros Especiales. Los enviaron a Los Álamos. Los alojaron en barracones y no les contaron nada. Luego les pusieron a trabajar, y lo que tenían que hacer era trabajar con máquinas IBM, perforando agujeros, números que ellos no entendían: nadie les dijo de qué se trataba. La cosa iba muy lenta. Yo dije: lo primero que hay que hacer es que los técnicos sepan lo que estamos haciendo. Oppenheimer habló con el personal de seguridad y obtuvo un permiso especial. Así que yo di una bonita conferencia en la que les conté lo que estábamos haciendo, y todos ellos quedaron entusiasmados. Estamos luchando en la guerra. Vemos lo que es eso. Ellos sabían lo que significaban los números. Si la presión aumentaba mucho, eso significaba que había más energía liberada y así sucesivamente. Ellos sabían lo que estaban haciendo. ¡Fue una transformación completa! Ellos empezaron a idear formas de hacerlo mejor. Mejoraron el esquema. Trabajaban por la noche. No necesitaban supervisión por la noche. No necesitaban nada. Lo entendían todo. Idearon varios de los programas que utilizamos y así sucesivamente. De modo que mis muchachos realmente cumplieron, y todo lo que hubo que hacer era decirles de qué se trataba, eso es todo. Es simple: si no les cuentas nada, tan solo están perforando agujeros. Como resultado, si antes les había llevado nueve meses resolver tres problemas, ahora resolvíamos nueve problemas en tres meses, que es casi diez veces más rápido. Una de las formas secretas en que trabajábamos con

nuestros problemas era la siguiente: los problemas se traducían en un mazo de fichas que debían recorrer un ciclo. Primero sumar, luego multiplicar, y así iban recorriendo las máquinas de la habitación, dando lentamente una y otra vuelta. Descubrimos un método que consistía en tomar un conjunto de fichas de un color diferente y hacerle seguir otro ciclo, pero desfasado respecto al anterior. Trabajaríamos en dos o tres problemas a la vez. Como ven, era un problema diferente. Mientras en un problema se estaba sumando, en otro se estaba multiplicando. Y con tales esquemas de gestión, resolvimos muchos más problemas.

Finalmente, casi al final de la guerra, muy poco antes de que acabara tuvimos que hacer un ensayo en Alamogordo, y la pregunta era, ¿cuánta energía se liberará? Habíamos estado calculando la liberación de energía para diferentes diseños, pero no habíamos hecho cálculos con el diseño concreto que finalmente se utilizó. Así que Bob Christie vino y dijo: «Quisiéramos tener los resultados de cómo va a funcionar esto en un mes, o en un periodo muy corto, no sé cuánto, menos que eso, tres semanas». Yo dije: «Es imposible». Él dijo: «Mira, tú estás resolviendo tantos problemas a la semana. Se necesitan solo dos semanas por problema, o tres semanas por problema». Yo dije: «Ya lo sé, pero se necesita mucho más tiempo para resolver el problema; lo que pasa es que los estamos resolviendo en *paralelo*. Para cada uno se necesita mucho tiempo y no hay forma de hacer que vaya más rápido». Y él se fue. Me puse a pensar: ¿hay alguna forma de hacerlo más rápido? Quizá si no hiciéramos ninguna otra cosa con la máquina, y no hubiese nada

que interfiriera. Me puse a pensar. Escribí en la pizarra un reto para los muchachos: ¿PODEMOS HACERLO? Todos ellos respondieron: sí, trabajaremos doble turno, trabajaremos tiempo extra, y todo eso, *vamos a intentarlo. ¡Vamos a intentarlo!* Así que la regla era: *¡fuera cualquier otro problema!* Hay que coger solo un problema y concentrarse en ello. De modo que empezaron a trabajar.

Mi mujer murió en Albuquerque y tuve que ir allí. Le pedí prestado el automóvil a Fuchs¹⁵, que era un amigo de la residencia. Él tenía un automóvil. Lo estaba utilizando para llevarse secretos, ya saben, a Santa Fe. Él era el espía; yo no lo sabía. Tomé prestado su automóvil para ir a Albuquerque. Al condenado cacharro se le pincharon tres ruedas por el camino. Cuando regresé quise entrar en la habitación, porque se suponía que yo lo estaba supervisando todo, pero no pude hacerlo durante tres días. Había un buen *desorden*, una gran agitación por obtener la respuesta para el ensayo que iba a hacerse en el desierto. Entro en la habitación y veo que hay tarjetas de tres colores diferentes. Hay tarjetas blancas, tarjetas azules, tarjetas amarillas y empiezo a decir: «Bien, se suponía que no ibais a trabajar en más de un problema, ¡solo un problema!». Ellos dijeron: «Sal de aquí, sal, sal. Ya te lo explicaremos todo». De modo que esperé, y lo que sucedía era lo siguiente. A veces la máquina cometía un error o ellos introducían un número equivocado; eso solía pasar. Lo que hacíamos en estos casos era

15 Klaus Fuchs (1911-1988), físico de origen alemán nacionalizado británico. Terminado el Proyecto Manhattan regresó a Gran Bretaña, donde fue director de la división teórica en Harwell. En 1950 fue detenido y confesó haber pasado información a agentes soviéticos. Condenado a catorce años de cárcel, fue liberado en 1960. Tras su liberación, el gobierno de la Alemania Oriental le ofreció una cátedra en Leipzig, donde vivió hasta su muerte. (N. del t.)

retroceder y hacerlo de nuevo. Pero ellos habían advertido que el mazo representaba posiciones y profundidad en la máquina, en el espacio o algo. Un error cometido aquí, en un ciclo, solo afecta a los números cercanos; en el ciclo siguiente afecta a más números, y así sucesivamente. El error se propaga a través del paquete de tarjetas. Si uno tiene cincuenta fichas y comete un error en la ficha número 39, esto afecta a la 37, la 38 y la 39. En el ciclo siguiente afecta a las fichas 36, 37, 38, 39 y 40. En los ciclos siguientes se extiende como una epidemia. Así que si ellos encontraban un error, volvían atrás. Pero tuvieron una idea. Computarían solo un pequeño mazo de diez cartas en torno al error. Y puesto que diez cartas podrían pasar por la máquina con más rapidez que el mazo de cincuenta cartas, el cálculo con este otro mazo sería muy rápido, mientras la epidemia se extendía por las cincuenta cartas. Pero como el otro cálculo era más rápido, podrían cancelarlo y corregirlo todo. ¿Comprenden? Muy inteligente. Así es como trabajaban estos muchachos, con intensidad y mucha inteligencia, para ganar velocidad. No había otra forma. Si hubieran parado el proceso para tratar de corregirlo, habríamos perdido tiempo; y no podíamos perderlo. Eso era lo que estaban haciendo. Por supuesto, ya se habrán imaginado ustedes lo que sucedió mientras lo estaban haciendo. Encontraron un error en el mazo azul. Y por eso tenían un mazo amarillo con algunas cartas menos y dando vueltas más rápidamente que el mazo azul, ya saben. Andaban como locos, porque una vez que lo habían resuelto tenían que corregir el mazo blanco, quitar las otras cartas, reemplazarlas por las correctas y

continuar, y esto es bastante confuso; ya saben ustedes cómo son siempre estas cosas. Nadie quiere cometer un error. Y precisamente cuando tenían estos tres mazos en marcha, y estaban tratando de filtrarlo todo, entró el JEFE. «Déjanos solos», dijeron, de modo que les dejé solos y todo salió bien; resolvimos el problema a tiempo y así es como se hizo.

Me gustaría decirles unas pocas palabras sobre algunas de las personas que conocí. Al principio yo era un subordinado. Llegué a ser un jefe de grupo, pero en Los Álamos conocí a algunos hombres extraordinarios, aparte de los hombres del comité de evaluación. Hubo tantos que haber conocido a todos estos físicos maravillosos es una de las mayores experiencias de mi vida. Hombres de los que yo había oído hablar, unos más y otros menos importantes, pero los más grandes estaban también allí. Por supuesto, estaba Fermi¹⁶. Vino en alguna ocasión. La primera vez venía de Chicago para aconsejarnos y para ayudarnos si teníamos algún problema. Tuvimos una reunión con él. Yo había estado haciendo algunos cálculos y había obtenido algunos resultados. Los cálculos eran tan complicados que resultaban muy difíciles de entender. Normalmente, yo era el experto en esto; siempre podía decir cuál iba a ser la respuesta aproximada, o podía explicar por qué era así una vez obtenida. Pero esta vez se trataba de algo tan complicado que yo no podía explicar por qué era así. Así que le dije a Fermi que estaba trabajando en este problema y empecé a hacer cálculos. Él dijo:

¹⁶ Enrico Fermi (1901-1954). Ganador del Premio Nobel de Física en 1938 por demostrar la existencia de nuevas sustancias radiactivas producidas por irradiación con neutrones y trabajos relacionados. Fermi fue también director del equipo que hizo posible la primera reacción nuclear controlada en la Universidad de Chicago en diciembre de 1942. (*N. del e.*)

«Espera, déjame pensar antes de que me digas el resultado. Tiene que salir algo parecido a esto —tenía razón—, y tiene que ser así por esto y lo otro. Hay una explicación perfectamente obvia...». Así que él estaba haciendo aquello en que se suponía que yo era bueno, pero él lo hacía diez veces mejor. Fue toda una lección para mí.

También estaba Von Neumann, el gran matemático. Sugirió algunas observaciones técnicas muy inteligentes; no quiero entrar aquí en detalles. Ocurrían fenómenos muy interesantes con la computación de los números. Parecía que el problema fuera inestable y él explicó por qué y todo eso. Fue un consejo técnico muy bueno. Los domingos y festivos solíamos hacer excursiones para descansar. Caminábamos por los cañones de las proximidades y solíamos ir con Bethe, Von Neumann y Bacher¹⁷. Era un gran placer. Y Von Neumann me dio una idea muy interesante: uno no tiene por qué ser responsable del mundo en el que vive. Así que yo he desarrollado un sentido muy fuerte de irresponsabilidad social como resultado del consejo de Von Neumann. Eso me ha hecho un hombre muy feliz desde entonces. Pero ¡fue Von Neumann quien puso la semilla de la que creció mi irresponsabilidad *activa*!

También conocí a Niels Bohr¹⁸. Eso fue interesante. Viajaba con el nombre de Nicholas Baker y vino con Jim Baker, su hijo, cuyo verdadero nombre es Aage¹⁹. Procedían de Dinamarca y vinieron de

¹⁷ Robert Bacher (n. 1905). Aunque empezó trabajando en el proyecto del radar, a partir de 1943 formó parte del Proyecto Manhattan. Tras la guerra se trasladó a Caltech, donde fue sucesivamente director de la sección de física, vicepresidente y primer rector. (*N. del t.*)

¹⁸ Niels Bohr (1885-1962), ganador del Premio Nobel de Física en 1922 por su trabajo sobre la estructura de los átomos y de la radiación que emana de ellos. (*N. del e.*)

¹⁹ Aage Bohr (n. 1922), ganador (con Ben Mottelson y James Rainwater) del Premio Nobel de Física en 1975 por su teoría de la estructura del núcleo atómico. (*N. del e.*)

visita; eran físicos *muy* famosos, como todos ustedes saben. Incluso para los grandes popes, él era un gran dios. Él hablaba y todos le escuchaban. Estábamos en una reunión y todo el mundo quería *ver* al gran Bohr. Había un montón de personas, yo estaba atrás en un rincón, para hablar y discutir los problemas de la bomba. Eso fue la primera vez. Vino y se fue, y desde mi rincón solo pude verle entre las cabezas de los demás. Estaba prevista una nueva visita. La misma mañana en que estaba prevista su llegada recibí una llamada telefónica. «Hola, ¿es usted Feynman?». «Sí». «Soy Jim Baker»; era su hijo. «Mi padre y yo quisiéramos hablar con usted». «¿Conmigo? Yo soy Feynman, solo soy...» «Muy bien. De acuerdo». Así que a las ocho en punto de la mañana, antes de que nadie se hubiera levantado, acudí a la cita. Entramos en un despacho en el área técnica y me dice: «Hemos estado reflexionando sobre la forma de hacer la bomba más eficaz y hemos pensado en lo siguiente». Dije: «No, eso no va a funcionar, no es eficiente, blah, blah, blah». Él dice: «¿Y qué tal esto otro?». Yo dije: «Eso suena un poco mejor, pero sigue siendo una idea rematadamente loca». Siempre he sido *torpe* en una cosa, nunca he sabido con quién estaba hablando. Solo me preocupaba la física: si la idea parecía pésima, yo decía que parecía pésima; si parecía buena, yo decía que parecía buena. Una simple proposición, yo siempre he vivido así. Está bien, es agradable, si uno puede hacerlo. Tengo suerte de poder hacerlo, la misma suerte que tuve con el plano. Y así seguimos durante dos horas de idas y venidas con un montón de ideas, discutiéndolas y desmenuzándolas. El gran Niels siempre estaba encendiendo su

pipa; se le apagaba continuamente. Y hablaba de una forma incomprensible. Farfullaba «hummm... hummm», era difícil de entender, pero a su hijo podía entenderle mejor. Finalmente dijo: «Bien — encendiendo su pipa—. Creo que podemos llamar *ahora* a los grandes jefes». Así que llamaron a todos los demás y tuvieron una discusión con ellos. El hijo me contó lo que había sucedido: tras la visita anterior su padre le había dicho: «¿Recuerdas el nombre del colega que estaba al fondo? Es el único tipo que no me tiene miedo, así que hablaremos con él cuando se me ocurra una idea loca. La *próxima* vez que queramos discutir ideas, no vamos a poder hacerlo con estos tipos que dicen a todo sí, sí, doctor Bohr. Llamemos primero a ese tipo, hablaremos primero con él».

Una vez que hicimos los cálculos, el siguiente paso era, por supuesto, la prueba. Teníamos que hacer la prueba. En esa época yo estaba en casa con unas cortas vacaciones, por la muerte de mi mujer, y recibí un mensaje de Los Álamos que decía: «Se espera el nacimiento del bebé para tal día». Así que volví rápidamente, y llegué al lugar *justo* cuando estaban partiendo los autobuses; ni siquiera pude ir a mi habitación. En Alamogordo esperamos a cierta distancia; estábamos a 30 kilómetros. Teníamos una radio por la que se suponía que iban a avisarnos cuando estallara la bomba y todo eso. La radio no funcionaba, y nunca supimos qué estaba sucediendo. Pero solo unos minutos antes del momento inicialmente previsto para la explosión, la radio empezó a funcionar y nos dijeron que faltaban veinte segundos o algo parecido. A las personas que estábamos muy lejos —otros estaban más cerca, a 10 kilómetros—

nos dieron gafas oscuras para que pudiéramos observar. ¡Gafas oscuras! A 30 kilómetros de la maldita cosa te dan gafas oscuras. ¡No puedes ver nada con gafas oscuras! Entonces yo pensé que lo único que realmente podía hacer daño a los ojos es la luz ultravioleta; la luz simplemente brillante no daña los ojos. De modo que me puse detrás del parabrisas de un camión, de modo que la luz ultravioleta no pudiera atravesar el cristal, y así estaría a salvo y podría *ver* la maldita cosa. Otras personas no llegarían a *ver* nunca la maldita cosa. Muy bien. Llega el momento y se produce este *tremendo* destello, tan brillante que vi rápidamente una mancha púrpura en el suelo del camión. Yo dije: «Eso no es. Es una imagen posterior». Así que miro de nuevo y veo una luz blanca que se transforma en amarilla y luego en naranja. Se forman nubes y luego se deshacen, la compresión y la expansión provocan que se formen nubes y las hacen desaparecer. Finalmente se formó una gran bola naranja, con un centro muy brillante, una bola naranja que empezó a ascender y a hincharse, y a oscurecerse por los bordes; y luego ves que es una gran bola de humo con destellos de fuego en su interior por el calor que desprende. Yo vi todo lo que acabo de describir; duró un minuto. Fue una sucesión de resplandores y oscuridades, y yo lo vi. Soy prácticamente el único que realmente miró la maldita cosa, el primer test de Trinidad. Todos los demás llevaban gafas oscuras. Los que estaban a 10 kilómetros no pudieron verlo porque les dijeron que se tirasen al suelo con los ojos tapados, de modo que nadie lo vio. Los que estaban donde yo estaba llevaban todos gafas oscuras. Yo soy el único que lo vio a simple

vista. Finalmente, al cabo de un minuto y medio, se produjo repentinamente un ruido tremendo, ¡bang!, y luego un estruendo, como un trueno, y eso es lo que me convenció. Nadie había dicho una palabra durante todo ese minuto, todos estábamos observando inmóviles, pero este sonido liberó a todo el mundo, y me liberó a mí en especial porque la solidez del sonido a esa distancia significaba que realmente había funcionado. Cuando se apagó el sonido, un hombre que estaba de pie junto a mí dijo: « ¿Qué ha sido eso?»; yo dije: «Eso era la bomba». El hombre era William Laurence, un enviado de *The New York Times*. Iba a escribir un artículo en el que describiría toda la situación. Se suponía que yo debía guiarle, pero resultó que todo era demasiado técnico para él.

Más tarde vino Mr. Smyth²⁰ de Princeton y le enseñé Los Álamos. Por ejemplo, entramos en una habitación y allí, en el extremo de un pedestal un poco más estrecho que este, había una pequeña bola plateada, de aproximadamente este tamaño: si uno ponía la mano en ella notaba que estaba caliente. Era radiactiva; era plutonio. Nos quedamos en la puerta de la habitación hablando de ello. Allí había un nuevo elemento químico que había sido fabricado por el hombre y que nunca antes existió en la Tierra, excepto posiblemente durante un periodo muy corto en el mismísimo principio. Y aquí estaba aislado y radiactivo, y tenía estas propiedades. Y lo habíamos hecho nosotros. Por eso era muy valioso, tremendamente valioso, no había nada más valioso. Mientras hablábamos —ya saben ustedes

²⁰ Henry de Wolf Smyth era entonces director del Departamento de Física de Princeton y uno de los principales asesores del Proyecto Manhattan. El «Informe Smyth», La energía atómica al servicio de la guerra, publicado en agosto de 1945, constituyó la primera divulgación pública del proyecto.

qué es lo que hace la gente cuando habla, te mueves de un lado a otro y todo eso— él le estaba dando patadas al tope de la puerta, ven ustedes, y yo digo, sí, y dije que el tope de la puerta es más apropiado que la puerta. El tope de la puerta era un hemisferio de metal amarillo: de hecho, era oro. Era un hemisferio de oro de este tamaño. Resulta que habíamos tenido que hacer un experimento para ver cuántos neutrones eran reflejados por diferentes materiales para ahorrar neutrones y así no tener que utilizar tanto plutonio. Habíamos probado muchos materiales diferentes. Habíamos probado el platino, habíamos probado el zinc, habíamos probado el bronce, habíamos probado el oro. Así que para hacer los test con el oro teníamos estas piezas de oro, y alguien tuvo la brillante idea de utilizar esa gran bola de oro como tope para la puerta de la habitación donde se guardaba el plutonio, lo que era bastante apropiado.

Tras la explosión y las noticias que nos llegaron, se produjo una tremenda excitación en Los Álamos. Todo el mundo lo celebraba, todos corríamos de un lado a otro. Yo me senté en el capó de un jeep tocando un tambor y haciendo cosas por el estilo. Todos lo celebraban salvo una persona, que yo recuerde. Era Bob Wilson, quien precisamente me había introducido en esto. Estaba sentado y abatido²¹. Le dije: « ¿Qué haces tan abatido?». Dijo: «Es terrible lo que hemos hecho». Yo dije: «Pero tú lo empezaste, tú nos metiste en ello». Ya ven, lo que me sucedió a mí, lo que nos sucedió a todos los

²¹ Recién terminada la guerra, Robert Wilson fue uno de los principales impulsores y primer presidente de la Federación de Científicos Atómicos, cuyo objetivo era limitar la aplicación de la energía nuclear a fines civiles y pacíficos. (*N. del t.*)

demás es que *empezamos* por una buena razón, pero luego estuvimos trabajando muy duramente por hacer algo, por conseguirlo: eso es un placer, es excitante. Y entonces dejas de pensar, simplemente dejas de pensar. Después de haberlo pensado al comienzo, dejas de pensar. Y él era el único que aún estaba pensando en ello, en aquel momento concreto. Yo volví a la civilización inmediatamente después de eso y fui a Cornell a dar clases. Mi primera impresión fue muy extraña, algo que todavía no puedo entender, pero que entonces sentí de forma muy intensa. Estaba sentado en un restaurante en Nueva York, por ejemplo, miraba los edificios y la distancia a que se encontraban y, saben, yo pensaba en cuál fue el radio de destrucción de la bomba de Hiroshima y cosas así. ¿A qué distancia estaba la Calle 34? Pensar en todos estos edificios aplastados... Tuve una sensación muy extraña. Después veía a gente que estaba construyendo un puente o haciendo una nueva carretera; y pensaba, están *locos*, no entienden nada, no lo entienden. ¿Por qué están construyendo cosas nuevas si es tan inútil? Pero, afortunadamente, ha sido inútil durante treinta años, ahora, más o menos, pronto hará treinta años. He estado equivocado durante treinta años sobre la utilidad de hacer puentes, y me alegro de que esas otras personas fueran capaces de seguir adelante. Pero mi primera reacción, una vez que había acabado con esto, fue pensar que era inútil hacer cualquier cosa. Muchas gracias.

PREGUNTA: ¿Qué hay de su historia sobre algunas cajas fuertes?

Bien, hay un montón de historias sobre cajas fuertes. Si me dan diez minutos, les contaré tres historias sobre cajas fuertes. ¿De acuerdo? La motivación para abrir el archivador, descerrajar la cerradura, fue mi interés por la seguridad del conjunto. Alguien me había dicho cómo abrir cerraduras. Entonces nos dieron archivadores que tenían cerraduras de combinación. Tengo una enfermedad, y es que trato de reventar cualquier cosa que sea secreta. Y por eso las cerraduras de aquellos archivadores, hechos por la Mosler Lock Company, en los que colocábamos nuestros documentos —todo el mundo los tenía—, representaban un desafío para mí. ¿Cómo demonios abrirlos? Así que trabajé y trabajé con ellos. Se cuentan todo tipo de historias acerca de cómo se pueden sentir los números de la combinación y oír las ruedas y todo eso. Eso es cierto; yo lo entiendo muy bien. Eso es para cajas de seguridad pasadas de moda. Pero ellos tenían un nuevo diseño de modo que nada presionaba los engranajes mientras uno estaba probándolos. No voy a entrar en los detalles técnicos, pero el caso es que ninguno de los viejos métodos funcionaba. Yo leo libros escritos por magos profesionales. Los libros escritos por magos profesionales siempre empiezan contando cómo abrían ellos las cerraduras. Es el no va más: la mujer está bajo el agua, la caja fuerte está bajo el agua y la mujer se está ahogando o algo parecido y él abre la caja. No sé, es una historia loca. Y al final cuentan cómo lo hacen y no dicen nada razonable; parece imposible que sea así como abrían

realmente las cajas. ¡Es tan poco razonable como *conjeturar* la combinación de una caja basándose en la psicología del propietario! Por eso, yo siempre he pensado que guardaban un secreto. En cualquier caso, seguí trabajando. Y así, como una especie de enfermedad, seguí trabajando hasta que descubrí algunas cosas. En primer lugar descubrí qué margen admite la combinación, hasta dónde tienes que acercarte. Y entonces ideé un sistema por el que se pueden ensayar todas las combinaciones que sean necesarias. En este caso eran ocho mil, porque había un margen de dos en torno a cada número. Resulta así que hay que probar un número de cada cinco, entre cuarenta mil... ocho mil combinaciones. Y entonces desarrollé un esquema por el que podía ensayar números sin alterar un número que ya había conseguido, moviendo correctamente las ruedas, de modo que podía ensayar todas las combinaciones en ocho horas. Y luego descubrí aún más cosas. Esto me llevó otros dos años de investigación; ya ven, no había muchas diversiones allí y me dedicaba a jugar. Finalmente descubrí una forma fácil de obtener los dos números finales, los dos últimos números de la combinación de la caja, si la caja está abierta. Si el cajón está fuera, uno puede girar el número y ver si sube el pasador, y tantear y descubrir qué hace, a qué número vuelve y cosas así. Con un poco de habilidad es posible obtener la combinación. Así que yo solía practicar igual que un malabarista practica con naipes, ya saben, todo el tiempo. Cada vez con más rapidez y más desenvoltura, entraba y hablaba con algún tipo y me apoyaba contra su archivador, igual que estoy jugando con este

reloj ahora; ustedes ni siquiera han notado que yo esté haciendo algo. No estoy haciendo nada. Simplemente jugaba con el dial, eso es todo, solo jugaba con el dial. Pero ¡estaba sacando los dos números! Luego volvía a mi despacho y apuntaba los dos números. Los dos últimos números entre tres. Ahora, si uno tiene los dos últimos números solo se necesita un minuto para ensayar el primer número; solo veinte posibilidades y está abierto. ¿Comprenden?

* * * *

Así que me gané una excelente reputación como desvalijador. Me decían: «Mr. Schmultz está fuera de la ciudad, necesitamos un documento de su caja fuerte. ¿Puedes abrirla?». Yo decía: «Sí, puedo abrirla, pero tengo que ir a por mis herramientas» (yo no necesito ninguna herramienta). Voy a mi oficina y miro los números de su caja fuerte. Yo tenía los dos últimos números. Tenía los números de las cajas de todo el mundo en mi despacho. Ponía un destornillador en mi bolsillo trasero, como si fuese la herramienta que yo decía necesitar. Volvía a la habitación y cerraba la puerta. Se trata de que este asunto de cómo se abren las cajas fuertes no es algo que todo el mundo debiera saber, porque lo hace todo muy inseguro; es muy peligroso que todo el mundo sepa cómo hacerlo. Así que cierro la puerta y entonces me siento y leo una revista, o hago algo. Solía estar unos veinte minutos de media sin hacer nada y luego la abría; mejor dicho, la abría en seguida para ver que todo estaba bien y entonces me sentaba allí durante veinte minutos para ganarme una buena reputación y que no pensaran que era demasiado fácil o que había algún truco en ello. Y entonces salía sudando un poco, ya

saben, y decía: «Está abierta. Ahí la tienen», y todo eso. ¿Comprenden?

* * * *

En cierta ocasión también abrí una caja simplemente por accidente, y eso ayudó a reforzar mi reputación. Causó sensación, fue pura suerte, la misma suerte que tuve con los planos. Pero eso fue una vez que la guerra había terminado. Puedo contarles ahora estas historias porque una vez que la guerra había terminado yo volví a Los Álamos para acabar algunos artículos y allí abrí algunas cajas fuertes. Podría escribir un libro de desvalijadores *mejor* que cualquier libro de desvalijadores. Al principio explicaría cómo abrí la caja absolutamente en frío sin saber la combinación, una caja que contenía *más* secretos que cualquier caja que hubiera abierto antes. Abrí la caja que contenía el secreto de la bomba atómica, *todos* los secretos, las fórmulas, los ritmos a los que se liberaban los neutrones del uranio, cuánto uranio se necesita para hacer una bomba, todas las teorías, todos los cálculos, ¡TODA LA MALDITA COSA!

* * * *

Les explicaré cómo sucedió. ¿De acuerdo? Yo estaba tratando de escribir un informe. Necesitaba este informe. Era un sábado y yo creía que todo el mundo trabajaba. Creía que las cosas seguían igual en Los Álamos. Así que fui a sacarlo de la biblioteca. Todos estos documentos estaban en la biblioteca de Los Álamos. Había una gran cámara acorazada con un gran tirador de un tipo diferente de los que yo conocía. Yo entendía los archivadores, pero solo era

experto en archivadores. Por si fuera poco, había guardas caminando arriba y abajo con pistolas. No puedes conseguir que uno te abra, ¿comprenden? Entonces pienso, ¡un momento! El viejo Freddy De Hoffman de la Sección de Desclasificación está encargado de desclasificar documentos. ¿Qué documentos pueden desclasificarse ahora? Para eso, él tenía que bajar a la biblioteca, y volver a subir, y estaba cansado de hacerlo. Así que tuvo una idea brillante. Se haría una copia de todos los documentos de la biblioteca de Los Álamos. Se hizo su archivo: tenía *nueve* archivadores, uno junto a otro en dos habitaciones, *llenos* con todos los documentos de Los Álamos; y yo sabía que él lo tenía. Así que iría a De Hoffman y le pediría que me prestase los documentos; él tenía una copia. Así que subí a su despacho. La puerta del despacho está abierta. Parece que él vaya a volver, la luz está encendida; parece que vaya a volver en un minuto. Así que espero. Y como siempre que estoy esperando, me pongo a jugar con los tiradores. Probé 10-20-30, y no funcionó. Probé 20-40-60, y no funcionó. Lo probé todo. Estoy esperando, no tengo nada que hacer. Entonces empiezo a pensar en estos magos, ya saben, yo nunca he sido capaz de imaginar cómo abrir las cajas con astucia. Quizá ellos tampoco lo hacen, quizá sea cierto todo lo que me están contando sobre psicología. Voy a abrir esto a base de psicología. Primero, el libro dice: «La secretaria está muy nerviosa porque puede olvidar la combinación». Le han dicho la combinación. Ella podría olvidarla y el jefe podría olvidarla, así que ella tiene que saberla. De modo que ella la escribe nerviosamente en alguna parte. ¿Dónde? Lista de

lugares donde una secretaria podría escribir combinaciones. ¿Comprenden? Empieza, esta es la cosa más astuta, empieza que abres el cajón y en la madera lateral del cajón, por la parte de fuera, hay un número descuidadamente escrito, como si fuera un número de una factura. Este es el número de la combinación. Bien. Está en el lado de la mesa. ¿Comprenden? Yo recordaba eso, está en el libro. El cajón de la mesa está cerrado, abro la cerradura inmediatamente, saco el cajón, miro en la madera: nada. Está bien, está bien. Hay un montón de papeles en el cajón. Miro entre los papeles y finalmente lo encuentro, un bonito trozo de papel que tiene el alfabeto griego. Alfa, beta, gamma, delta, etc., cuidadosamente escrito. Las secretarias tienen que saber cómo hacer estas letras y cómo llamarlas cuando están hablando de ellas, ¿conecto? Así que todas las tenían, cada una de ellas tenía una copia. *Pero* garabateado descuidadamente en la parte superior está π , igual a 3,14159. Bien, ¿por qué necesita ella el valor numérico de π si no está calculando nada? Así que voy a la caja de seguridad. Honesto, esto es honesto, ¿de acuerdo? Es igual que en el libro. Estoy simplemente diciéndoles cómo se hizo. Subí a la caja, 31-41-59. No se abre. 13-14-95. No se abre. 95-14-13. No se abre. 14-31, hace veinte minutos que le estoy dando vueltas a π . No sucede nada. Así que me dispongo a salir del despacho y entonces recuerdo el libro sobre la psicología y me digo, ya saben, pero ¡claro! Psicológicamente, yo tengo razón. De Hoffman es *precisamente* el tipo de persona que utilizaría una constante matemática para la combinación de su caja fuerte. Otra constante matemática importante es e . Así que vuelvo a

la caja, 27-18-28, clic, cloc, se abre. De paso comprobé que *todas* las combinaciones eran la misma. Bien, hay otras muchas historias sobre ello pero es demasiado tarde y esa está bien, de modo que dejémoslo así.

Capítulo 4

Cuál es y cuál debería ser el papel de la cultura científica en la sociedad moderna

Esta es una conferencia que pronunció Feynman ante una audiencia de científicos en el Galileo Symposium en Italia, en 1964. Con frecuentes reconocimientos y referencias a la gran obra y las grandes penalidades de Galileo, Feynman habla del efecto de la ciencia sobre la religión, la sociedad y la filosofía, y nos advierte de que es nuestra capacidad de dudar lo que determinará el futuro de la civilización.

Soy el profesor Feynman, a pesar de este traje. Normalmente doy conferencias en mangas de camisa, pero cuando salía del hotel esta mañana mi mujer me dijo: «Deberías ponerte un traje». Yo le dije: «Pero yo doy normalmente las conferencias en mangas de camisa». Y ella respondió: «Sí, pero esta vez tú no sabes a quién vas a hablar, de modo que deberías causar buena impresión...». Así que me puse un traje.

Voy a hablar sobre el tema que me propuso el profesor Bernardini²². Para empezar, me gustaría decir que, en mi opinión, encontrar el lugar adecuado de la cultura científica en la sociedad moderna no va a resolver los problemas de la sociedad moderna. Hay muchos problemas que no tienen mucho que ver con la posición de la ciencia en la sociedad, y es un sueño pensar que el mero hecho de decidir la forma ideal en que deberían encajar ciencia y sociedad va a resolver de un modo u otro todos los problemas. Por eso, y les

²² Presidente de la Conferencia. (N. del e.)

ruego que lo entiendan, aunque yo voy a sugerir algunas modificaciones en esa relación, no espero que estas modificaciones sean la solución a los problemas de la sociedad.

Esta sociedad moderna parece estar sometida a diversas amenazas serias, y me gustaría centrarme en una de ellas que será de hecho el tema central (aunque habrá un montón de pequeñas cuestiones secundarias). El tema central de mi conferencia es que yo creo que uno de los mayores peligros para la sociedad moderna es el posible resurgimiento y expansión de las ideas de control del pensamiento; ideas semejantes a las que tenía Hitler, o Stalin en su época, o la religión católica en la Edad Media, o la China actual. Creo que uno de los mayores peligros es que esto vaya en aumento hasta que incluya a todo el mundo.

Ahora bien, al analizar la relación de la ciencia con la cultura científica de la sociedad, lo primero que viene inmediatamente a la mente es, por supuesto, lo más obvio, que son las aplicaciones de la ciencia. Las aplicaciones también son cultura. Sin embargo, no voy a hablar de las aplicaciones, aunque no tengo ninguna buena razón para no hacerlo. Soy consciente de que todos los debates populares sobre el tema de la relación entre la ciencia y la sociedad giran casi enteramente alrededor de las aplicaciones, y de que las cuestiones morales que se plantean los científicos acerca de su trabajo también implican normalmente a las aplicaciones. De todas formas, no voy a hablar sobre ellas porque hay otras cuestiones de las que no se habla tanto, y así, por el placer de hacerlo, me gustaría hablar sobre algo ligeramente diferente.

Acerca de las aplicaciones diré, sin embargo, que, como todos ustedes saben, la ciencia crea un poder mediante su conocimiento, el poder de hacer cosas: uno puede hacer cosas una vez que conoce algo científicamente. Pero la ciencia no incluye instrucciones con este poder acerca de cómo hacer el bien frente a cómo hacer el mal. Digámoslo de una forma simple: no vienen instrucciones con el poder, y la cuestión de aplicar o no la ciencia se reduce esencialmente al problema de organizar las aplicaciones de una forma que no haga mucho daño y haga el máximo bien posible. Pero, por supuesto, es frecuente que quienes se dedican a la ciencia digan que esa no es su responsabilidad, porque la aplicación es precisamente el poder de hacer cosas, y es independiente de lo que uno haga con ello. Desde luego, es verdad en cierto sentido que probablemente es bueno crear para el género humano el poder de controlar esto, pese a las dificultades que tiene cuando trata de imaginar cómo controlar el poder para hacerse el bien en lugar del mal.

Podría decir también que aunque muchos de los que estamos aquí somos físicos, y la mayoría de nosotros pensamos en los problemas serios de la sociedad en términos de física, yo creo que con toda seguridad la próxima ciencia que se encontrará en dificultades morales con sus aplicaciones es la biología; y si los problemas de la física con relación a la ciencia parecen difíciles, los problemas del desarrollo del conocimiento biológico serán fantásticos. Estas posibilidades fueron apuntadas, por ejemplo, en el libro de Huxley, *Un mundo feliz*, pero ustedes pueden pensar en muchas cosas. Por

ejemplo, si la energía en un futuro lejano puede ser suministrada libre y fácilmente por la física, entonces es una mera cuestión de química reunir los átomos de tal forma que produzcan alimentos, a partir de la energía que los átomos han conservado, de modo que uno puede producir tanto alimento como productos residuales haya de los seres humanos; y hay así una conservación de la materia y no hay problema de alimentación. Habrá serios problemas sociales cuando descubramos cómo controlar la herencia, y qué tipo de control, bueno o malo, utilizar. Supongamos que llegáramos a descubrir las bases fisiológicas de la felicidad o de cualquier otro sentimiento, tal como el sentimiento de ambición, y supongamos que pudiéramos controlar entonces si alguien se siente ambicioso o no se siente ambicioso. Y, finalmente, está la muerte.

Una de las cosas más notables es que en ninguna de las ciencias biológicas se encuentra una clave respecto a la necesidad de la muerte. Si alguien quiere construir el movimiento perpetuo, hemos descubierto leyes suficientes en nuestro estudio de la física para ver que esto es absolutamente imposible; y si no es así, las leyes están equivocadas. Pero todavía no se ha encontrado nada en biología que indique la inevitabilidad de la muerte. Esto me sugiere que no es en absoluto inevitable, y que solo es cuestión de tiempo antes de que los biólogos descubran qué es lo que nos causa el problema y se cure esa terrible enfermedad universal o temporalidad del cuerpo humano. En cualquier caso, uno puede ver que habrá problemas de una magnitud fantástica provenientes de la biología.

Hablaré ahora sobre algo diferente.

Además de las aplicaciones están las ideas, y las ideas son de dos tipos. Uno de ellos es el producto de la propia ciencia, es decir, la visión del mundo que produce la ciencia. Esta es en cierta forma la parte más bella del conjunto. Algunas personas piensan: no, lo importante son los métodos de la ciencia. Bien, depende de si a uno le gustan los fines o los medios, pero los medios eran medios para producir algunos fines maravillosos y no les voy a aburrir con los detalles (o mejor dicho, no les aburriría si pudiera hacerlo bien). Pero todos ustedes saben algo de las maravillas de la ciencia —no es una audiencia popular a la que me dirijo—, de modo que no voy a intentar que se entusiasmen una vez más con los hechos del mundo: el hecho de que todos estamos formados de átomos, los enormes intervalos de tiempo y espacio existentes, nuestra propia posición histórica como resultado de un notable proceso evolutivo, y nuestra propia posición en la secuencia evolutiva. Y además, el aspecto más notable de nuestra visión científica del mundo es su universalidad en el sentido de que, aunque decimos que somos especialistas, realmente no lo somos. Una de las hipótesis más prometedoras de toda la biología es que todo lo que hacen los animales o hacen las criaturas vivientes puede entenderse mejor en términos de lo que pueden hacer los átomos, es decir, en términos de leyes físicas, en definitiva, y la perpetua atención a esta posibilidad —hasta el momento no se ha encontrado ninguna excepción— ha sido una y otra vez fuente de sugerencias respecto a cuáles son realmente los mecanismos. No es apreciado como debiera el hecho de que nuestro conocimiento es universal, que la

posición de las teorías es tan completa que andamos a la busca de excepciones y vemos que son muy difíciles de encontrar —al menos en física—, y si se gasta tanto en todas estas máquinas y demás es para encontrar alguna excepción a lo que ya se conoce. Y, si no es así, ese es otro aspecto de lo maravilloso que es el mundo, en el sentido de que las estrellas están hechas de los mismos átomos que las vacas y que nosotros mismos, y que las piedras.

De cuando en cuando todos tratamos de comunicar a nuestros amigos no científicos esta visión del mundo; y muy a menudo nos vemos en dificultades porque nos equivocamos al tratar de explicarles las últimas preguntas, tales como el significado de la conservación de CP²³, cuando no saben nada sobre las cosas más elementales. Durante los cuatrocientos años transcurridos desde Galileo hemos estado reuniendo información sobre el mundo que entonces no se conocía. Ahora estamos trabajando en alguna vía de salida y en los límites del conocimiento científico. Y las cosas que aparecen en los periódicos y que parecen excitar la imaginación adulta son siempre aquellas cosas que ellos no pueden entender, porque no se les ha instruido en absoluto en ninguna de las cosas mucho más interesantes y bien conocidas [para los científicos] que la gente ha descubierto antes. No es este el caso de los niños, gracias a Dios, por el momento; al menos hasta que se hagan adultos.

²³ La conservación de CP supone que las leyes de la física son invariantes si se cambia el signo de las cargas eléctricas y, simultáneamente, se invierten todas las coordenadas. En otras palabras, que tan posible es un proceso físico como su imagen especular y con las cargas invertidas. En realidad, hay evidencia experimental de que la conservación CP se viola en las interacciones débiles. (*N. del t.*)

Pienso, y todos ustedes deben saberlo por experiencia, que la gente —quiero decir la persona media, la gran mayoría de las personas, la inmensa mayoría de las personas— son lamentablemente, penosamente, absolutamente ignorantes de la ciencia del mundo en el que viven, y pueden seguir así. No quiero decir nada de ellos; lo que quiero decir es que pueden seguir sin que les preocupe lo más mínimo —solo tibiamente— y cuando ocasionalmente ven la CP mencionada en los periódicos, preguntan qué es eso. Y una cuestión interesante de la relación entre la ciencia y la sociedad moderna es precisamente esa: ¿por qué es posible que la gente en una sociedad moderna permanezca tan penosamente ignorante, y pese a todo razonablemente feliz, cuando hay tanto conocimiento al que no pueden acceder?

A propósito de conocimiento y maravillas, Mr. Bernardini dijo que no deberíamos enseñar maravillas sino conocimiento.

Quizá haya una diferencia en el significado de las palabras. Yo creo que deberíamos enseñarles maravillas, y que el objetivo del conocimiento es apreciar todavía más las maravillas. Y que el conocimiento es simplemente poner en el marco correcto la maravilla que constituye la naturaleza. Sin embargo, él estará probablemente de acuerdo en que yo he cambiado algunas palabras y ese significado se ha filtrado en la conversación. En cualquier caso, quiero responder a la pregunta de por qué la gente puede permanecer tan penosamente ignorante y no tener dificultades en la sociedad moderna. La respuesta es que la ciencia es irrelevante. Y en un minuto explicaré lo que quiero decir. No es que tenga que

serlo, sino que dejamos que sea irrelevante para la sociedad. Volveré a esta cuestión.

Los otros aspectos de la ciencia que son importantes y que tienen algún problema en relación con la sociedad, aparte de las aplicaciones y los fenómenos reales que se descubren, son las ideas y las técnicas de la investigación científica: los medios, si ustedes prefieren. Porque yo creo que resulta difícil comprender por qué el descubrimiento de dichos medios, que parecen tan autoevidentes y obvios, no se hizo mucho antes: ideas sencillas que, con solo ensayarlas, se ve lo que sucede y así sucesivamente. Es probable que la mente humana evolucionase a partir de la del animal; y evoluciona de cierta forma [tal] que es como cualquier herramienta nueva, en cuanto que tiene sus problemas y dificultades. Tiene sus problemas, y uno de los problemas es que se contamina por sus propias supersticiones, se confunde, hasta que finalmente se descubrió una forma de mantener más o menos una línea de actuación para que los científicos puedan hacer un pequeño progreso en cierta dirección en lugar de ir en círculos y verse obligados a algún agarradero. Y creo que este es, por supuesto, el momento adecuado para discutir esta cuestión debido a que los inicios de este nuevo descubrimiento se remontan a la época de Galileo. Estas ideas y técnicas, por supuesto, son conocidas por ustedes. Yo simplemente las revisaré; es, una vez más, una de esas cosas en las que uno tiene que entrar en detalles cuando habla a una audiencia profana; aquí solo las mencionaré para que ustedes aprecien de qué estoy hablando concretamente.

La primera es la cuestión de juzgar la evidencia; bien, lo primero realmente es: antes de empezar uno no debe saber la respuesta. Así que uno empieza estando inseguro de cuál es la respuesta. Esto es muy, muy importante, tan importante que me gustaría entretenerme un poco en este punto, y hablar de ello aún más a lo largo de mi charla. La cuestión es que la duda y la incertidumbre son algo necesario para empezar, pues si uno ya conoce la respuesta no hay necesidad de reunir ninguna evidencia sobre ello. Bien, estando inseguros, la próxima cosa es buscar evidencia, y el método científico consiste en empezar con ensayos. Pero otra forma, y una muy importante que no debería despreciarse y que es vital, consiste en reunir ideas para tratar de conseguir una consistencia lógica entre las diversas cosas que uno conoce. Es algo muy valioso tratar de relacionar esto, lo que uno sabe, con aquello, lo que otro sabe, y tratar de descubrir si son compatibles. Y cuanto mayor sea la actividad en el intento de reunir ideas de diferentes direcciones, mejor será.

Una vez que hemos buscado la evidencia tenemos que juzgar la evidencia. Existen las reglas normales sobre la forma de juzgar la evidencia; no es correcto tomar solo lo que a uno le gusta, sino que hay que considerar toda la evidencia, hay que tratar de mantener cierta objetividad sobre el asunto —suficiente para seguir su marcha— y no depender en última instancia de la autoridad. La autoridad puede ser un indicio de cuál sea la verdad, pero no es la fuente de información. Mientras sea posible deberíamos descartar la autoridad cuando quiera que las observaciones estén en desacuerdo

con ella. Y, finalmente, el registro de los resultados debería hacerse de forma desinteresada. Esta es una frase muy divertida que siempre me fastidia, porque da la impresión de que, una vez que alguien ha estudiado todo acerca de algo, le importan un bledo los resultados. Pero no se trata de eso. El desinterés aquí significa que los resultados no deben publicarse de una forma que trate de inducir en el lector una idea que es diferente de lo que la evidencia indica.

Y todos ustedes son conscientes de todos estos aspectos.

Ahora bien, todo esto, todas estas ideas y todas las técnicas están en el espíritu de Galileo. El hombre cuyo nacimiento estamos conmemorando tuvo mucho que ver con el desarrollo y la difusión y, lo que es más importante, la demostración de la potencia de esta forma de considerar las cosas. En cualquier centenario, o en este caso cuatricentenario, uno siempre se pregunta antes o después: ¿qué diría este hombre si estuviese aquí ahora y le enseñásemos el mundo? Por supuesto, dirán ustedes, esto es algo espinoso y no se puede hacer en una charla, pero eso es lo que voy a hacer ahora. Supongamos que Galileo estuviera aquí y le mostrásemos el mundo actual y tratásemos de complacerle, para ver qué descubre él. Y le hablaríamos de la cuestión de la evidencia, de aquellos métodos de juzgar cosas que él desarrolló. Y señalaríamos que nos mantenemos exactamente en la misma tradición, la seguimos exactamente, incluso en los detalles de hacer medidas numéricas y utilizarlas como una de las mejores herramientas, al menos en física. Y que las ciencias se han desarrollado en muy buena forma, continua y

directamente a partir de sus ideas originales, en el mismo espíritu que él desarrolló. Y como resultado ya no hay más brujas y fantasmas.

Realmente digo [que el método cuantitativo funciona muy bien] en ciencia, pero eso es de hecho casi una definición de la ciencia actual; las ciencias de las que se ocupó Galileo, la física, la mecánica y cosas semejantes, se han desarrollado, por supuesto, pero las mismas técnicas funcionan en biología, en historia, geología, antropología, etc. Sabemos mucho sobre la historia pasada del hombre, la historia pasada de los animales y de la Tierra mediante técnicas muy similares. Con éxito algo similar, pero no tan completo debido a las dificultades, los mismos sistemas funcionan en economía. Pero hay lugares donde solo de boquilla se presta atención a las formas, en los que muchas personas solo siguen los movimientos. Me daría un poco de vergüenza decírselo a Mr. Galileo, pero realmente no funciona muy bien, por ejemplo, en las ciencias sociales. Por ejemplo, mi propia experiencia personal. Como ustedes se habrán dado cuenta, hay una terrible cantidad de estudios sobre los métodos de educación en curso, especialmente en la enseñanza de la aritmética; pero cuando traten de averiguar si realmente se conoce una forma de enseñar aritmética mejor que cualquier otra, descubrirán que hay una enorme cantidad de estudios y de estadística, pero todos son inconexos y son mezcla de anécdotas, experimentos no controlados y experimentos muy poco controlados, de modo que hay muy poca información resultante.

Y ahora, finalmente, puesto que me hubiera gustado mostrarle nuestro mundo a Galileo, debo mostrarle algo que me da mucha vergüenza. Si miramos fuera de la ciencia y consideramos el mundo que nos rodea, descubrimos algo bastante lamentable: que el entorno en que vivimos es activa e intensamente acientífico. Galileo podría decir: «Yo advertí que Júpiter era una bola con lunas y no un dios en el cielo. Díganme, ¿qué sucedió con los astrólogos?». Bien, ellos publican sus resultados en los periódicos, al menos en Estados Unidos, todos los días y en todos los diarios. ¿Por qué tenemos aún astrólogos? Cómo se puede escribir un libro como *Mundos en colisión*, de alguien con un nombre que empieza por V, ¿es un nombre ruso? ¿Huh? ¿Vininkowski?²⁴ ¿Y cómo se hizo famoso? ¿Qué es toda esa tontería acerca de Mary Brody²⁵, o algo parecido? No lo sé, eso es un disparate. Siempre hay algún disparate. Hay una infinita cantidad de disparates, lo que, dicho de otra forma, significa que el entorno es activa y fuertemente acientífico. Todavía se habla de telepatía, aunque cada vez menos. Por todas partes hay curaciones por la fe. Hay toda una religión basada en la curación por la fe. Hay milagros en Lourdes donde sigue habiendo curaciones. Ahora bien, podría ser verdad que la astrología fuera correcta. Podría ser verdad que ir al dentista un día en el que Marte forma un ángulo recto con Venus fuera mejor que ir otro día. Podría

²⁴ En realidad se trataba de Immanuel Velikovsky: *Mundos en colisión* (Doubleday, Nueva York, 1950). (N. del e.) [En su libro, Velikovsky exponía la teoría de que un cometa expulsado de Júpiter había pasado en dos ocasiones cerca de la Tierra antes de asentarse en órbita solar como lo que ahora conocemos como el planeta Venus. Sus pasos próximos a la Tierra serían responsables de hechos tales como la separación de las aguas del mar Rojo o la detención del Sol referidos en el Éxodo. (N. del t.)]

²⁵ Probablemente se refiera a Bridey Murphy, un supuesto caso de reencarnación en Colorado, que hizo correr ríos de tinta a mediados de los años cincuenta. (N. del t.)

ser cierto que uno puede curarse por el milagro de Lourdes. Pero si eso es cierto debería ser investigado. ¿Por qué? Para mejorarlo. Si fuera cierto que podemos descubrir si las estrellas influyen en la vida, entonces podríamos hacer el sistema más potente mediante investigaciones estadísticas, juzgando la evidencia objetivamente y de forma científica, con más cuidado. Si el proceso de curación funciona en Lourdes, la pregunta es: ¿a qué distancia del lugar del milagro puede permanecer la persona que está enferma? ¿Quizá han cometido un error y eso no funciona realmente en la fila de atrás? ¿O funciona tan bien que hay mucho sitio para que puedan situarse muchas personas cerca del lugar del milagro? ¿O es posible, como sucede con los santos que se han canonizado recientemente en Estados Unidos —hay una santa que aparentemente curaba la leucemia de forma indirecta—, es posible, digo, que cintas que han estado en contacto con la sábana del enfermo (una vez que la cinta ha tocado previamente alguna reliquia del santo) incrementen la curación de la leucemia? La pregunta es: ¿se está diluyendo su efecto poco a poco? Ustedes pueden reírse, pero si creen en la verdad de la curación, entonces tienen la responsabilidad de investigarla para mejorar su eficiencia y hacerla satisfactoria en lugar de trampear. Por ejemplo, podría resultar que al cabo de un centenar de contactos ya no funcionase. Ahora bien, también es posible que los resultados de esta investigación tengan otra consecuencia, a saber: que no hay nada.

Y otra cosa que me molesta, debería mencionarla también, son las cosas que pueden discutir los teólogos en los tiempos modernos sin

sentirse avergonzados. Hay muchas cosas que pueden discutir y de las que no tienen por qué avergonzarse, pero algunas de las cosas que ocurren en los congresos religiosos, y las decisiones que tienen que tomarse, son ridículas en los tiempos modernos. Me gustaría explicar que una de las dificultades, y una de las razones por las que esto puede seguir ocurriendo, es que no se comprende la profunda modificación que se produciría en nuestra visión del mundo si tan solo un ejemplo de estas cosas funcionase realmente. La idea global, si uno pudiera establecer la verdad, no ya de la idea global de la astrología sino tan solo de un mínimo punto de la misma, podría tener una influencia fantástica en nuestra comprensión del mundo. Y por eso, la razón de que lo tomemos a risa es que confiamos tanto en nuestra visión del mundo que estamos seguros que ellos no van a contribuir en nada. Por otra parte, ¿por qué no nos desembarazamos de ello? Llegaré a por qué no nos desembarazamos de ello en un minuto, porque la ciencia es irrelevante [para la astrología], como he dicho antes.

Ahora voy a mencionar todavía otra cosa que es un poco más dudosa, pero sigo creyendo que en la forma de juzgar la evidencia, en la forma de informar de la evidencia y demás, hay un tipo de responsabilidad que sienten unos científicos hacia otros y que se puede representar como una especie de moralidad. ¿Cuál es la forma correcta y la forma errónea de informar de los resultados? Desinteresadamente, de modo que los otros sean libres de entender exactamente lo que uno está diciendo, y tan fielmente como sea posible para no taparlo con los propios deseos. Eso es útil, es algo

que nos ayuda a cada uno de nosotros a comprender a los demás, a trabajar de hecho en una dirección que no depende de nuestros propios intereses sino que contribuye al desarrollo general de las ideas; es algo muy valioso. Y por eso hay, si ustedes quieren, una especie de moralidad científica. Yo creo, aunque sin mucha esperanza, que esta idea, este tipo de moralidad debería extenderse mucho más; y que cosas tales como propaganda deberían ser una palabra sucia. Que una descripción de un país hecha por gente de otro país describa ese país de una forma desinteresada. ¡Qué milagro! ¡Eso es más raro que un milagro en Lourdes! Los anuncios, por ejemplo, son un caso de una descripción científicamente inmoral de los productos. Esta inmoralidad está tan extendida que uno se ha habituado a ella en la vida cotidiana, y ya no la considera algo malo. Y pienso que una de las razones importantes para aumentar el contacto de los científicos con el resto de la sociedad es explicar, y tratar de despertar en ella, esta condición permanente de claridad de mente que proviene de no tener información, o [no] tener información siempre en una forma que resulte interesada. Hay otras cosas en las que los métodos científicos serían de valor; son perfectamente obvias, pero se hacen cada vez más difíciles de discutir; cosas tales como tomar decisiones. Yo no quiero decir que debiera hacerse científicamente, como [la forma] en que la Compañía Rand en Estados Unidos se sienta y hace cálculos aritméticos. Eso me recuerda mis días de novato en la facultad en los que, al hablar de mujeres, descubrimos que utilizando terminología eléctrica —impedancia, reactancia, resistencia—

teníamos una comprensión más profunda de la situación. La otra cosa que horripila a un hombre científico en el mundo actual son los métodos de elegir líderes (en todas las naciones). Hoy día, por ejemplo, en Estados Unidos, los dos partidos políticos han decidido emplear a expertos en relaciones públicas, esto es, hombres anuncio que están entrenados en los métodos de decir la verdad y mentir para desarrollar un producto. No era esta la idea original. Se supone que ellos van a discutir situaciones y no solo a formular eslóganes. Sin embargo, es cierto que, si miran la historia, la elección de líderes políticos en Estados Unidos ha estado en muchas ocasiones basada en eslóganes. (Estoy seguro de que cada partido tiene ahora cuentas bancarias de millones de dólares y van a sacar algunos eslóganes muy inteligentes). Pero yo no puedo hacer ahora un resumen de todo esto.

He dicho que la ciencia era irrelevante. Esto suena extraño y me gustaría volver sobre ello. Por supuesto es relevante, por el hecho mismo de que es relevante para la astrología; porque si entendemos el mundo como lo hacemos, no podemos entender cómo pueden tener lugar los fenómenos astrológicos. Y por eso es relevante. Pero para la gente que cree en la astrología no hay relevancia, porque los científicos nunca se molestan en discutir con ellos. La gente que cree en la curación por la fe no se preocupa por la ciencia en absoluto, porque nadie discute con ellos. Uno no tiene que aprender ciencia si no le apetece. De modo que uno puede olvidarse del asunto si supone demasiada tensión mental, que es lo que sucede normalmente. ¿Por qué puede uno olvidarse del asunto?; porque no

hacemos nada respecto a ello. Creo que debemos atacar estas cosas en las que no creemos. No atacar por el método de cortar cabezas, sino atacar en el sentido de discutir. Creo que deberíamos pedir a esa gente que traten por sí mismos de obtener una imagen coherente de su propio mundo; que no se permitan el lujo de tener su cerebro dividido en cuatro fragmentos, o ni siquiera dos fragmentos, y en un lado creen esto y en otro lado creen eso, pero nunca tratan de comparar los dos puntos de vista. Porque hemos aprendido que tratando de juntar y comparar los puntos de vista que tenemos en nuestra cabeza, hacemos algún progreso en la comprensión y en la apreciación de dónde estamos y adónde vamos. Y creo que la ciencia ha seguido siendo irrelevante porque esperamos hasta que alguien nos plantea preguntas o hasta que se nos invita a dar una charla sobre la teoría de Einstein a gente que no entiende la mecánica newtoniana, pero nunca se nos invita a refutar la curación por la fe, o a la astrología, a cuál es la visión científica actual de la astrología.

Creo que principalmente deberíamos escribir algunos artículos. Ahora bien, ¿qué sucedería? La persona que cree en la astrología tendría que aprender algo de astronomía. La persona que cree en la curación por la fe tendría que aprender algo de medicina, pues hay muchos argumentos en un sentido u otro; y algo de biología. En otras palabras, será necesario que la ciencia se haga relevante. El comentario que leí en alguna parte, según el cual la ciencia es correcta mientras no ataque a la religión, fue la clave que necesitaba para entender el problema. Mientras no ataque a la religión no hay

que prestarle atención y nadie tiene que aprender nada. Por eso puede distanciarse de la sociedad moderna excepto en sus aplicaciones, y así queda aislada. Y luego tenemos esta lucha terrible por tratar de explicar cosas a gente que no tiene ninguna razón para querer saberlo. Pero si ellos quieren defender su propio punto de vista, tendrán que aprender cuál es el de ustedes. Así que sugiero, quizá incorrectamente y quizá erróneamente, que somos demasiado educados. Hubo en el pasado una era de conversación sobre estas cuestiones. La Iglesia sentía que las ideas de Galileo atacaban a la Iglesia. La Iglesia actual no siente que las ideas científicas ataquen a la Iglesia. Nadie se preocupa por ello. Nadie ataca; quiero decir que nadie escribe tratando de explicar la falta de coherencia entre las ideas teológicas y las ideas científicas que hoy sostienen diferentes personas, o siquiera la falta de coherencia sostenida a veces por el mismo científico entre sus creencias religiosas y sus creencias científicas.

El siguiente tema, y el último tema principal del que quiero hablar, es el que realmente considero más importante y más serio. Y eso tiene que ver con la cuestión de la incertidumbre y la duda. Un científico nunca está seguro. Todos lo sabemos. Sabemos que todos nuestros enunciados son enunciados aproximados con diferentes grados de certeza; que, cuando se hace un enunciado, la cuestión no es si es cierto o falso, sino más bien qué probabilidad tiene de ser cierto o falso. « ¿Existe Dios? ». « Cuando lo ponemos en forma de pregunta, ¿qué probabilidad hay de ello? ». Esto supone una transformación terrorífica del punto de vista religioso y por eso es

por lo que el punto de vista religioso es acientífico. Debemos discutir cada cuestión dentro de las incertidumbres permitidas. Y a medida que la evidencia crece, aumenta o disminuye la probabilidad de que una cierta idea sea correcta. Pero nunca la hace absolutamente cierta en un sentido o el otro. Ahora hemos descubierto que esto es de importancia trascendental para progresar. Debemos dejar sitio para la duda o no hay progreso ni hay aprendizaje. No hay aprendizaje sin plantear una pregunta, y una pregunta requiere duda. La gente busca certeza. Pero no hay certeza. La gente está aterrorizada: ¿cómo puedes vivir y *no saber*? No es extraño en absoluto. Uno solo cree que sabe, como cuestión de hecho. Y la mayoría de nuestras acciones están basadas en un conocimiento incompleto y realmente no sabemos de qué va todo, o qué finalidad tiene el mundo, ni sabemos mucho de otras cosas. Es posible vivir y no saber.

Ahora bien, la libertad de dudar, que es absolutamente esencial para el desarrollo de las ciencias, nació de una lucha frente a la autoridad constituida de la época que tenía una solución para cada problema: la Iglesia. Galileo es un símbolo de esa lucha, uno de los luchadores más importantes. Y aunque el propio Galileo fue obligado aparentemente a retractarse, nadie toma su confesión en serio. No sentimos que deberíamos seguir a Galileo por este camino y que todos deberíamos renunciar. De hecho, consideramos la retractación como una locura (que la Iglesia pedía tales locuras lo vemos una y otra vez). Y nos sentimos solidarios con Galileo como nos sentimos solidarios con los músicos y los artistas de la Unión

Soviética que han tenido que retractarse, y por fortuna en número algo menor en los últimos tiempos. Pero la retractación es algo absurdo, por mucha habilidad con la que esté preparada. Es perfectamente obvio para cualquier observador exterior que no hay nada que considerar, y que no necesitamos discutir la retractación de Galileo para demostrar nada sobre Galileo, excepto quizá que él era viejo y que la Iglesia era muy poderosa. El hecho de que Galileo estuviera en lo cierto no es esencial para esta discusión. Lo esencial, por supuesto, es el hecho de que él estaba siendo reprimido.

Todos nos sentimos tristes cuando miramos el mundo y vemos qué poco hemos conseguido comparado con lo que pensamos que son las capacidades de los seres humanos. La gente del pasado, en la pesadilla de sus tiempos, tenía sueños para el futuro. Y ahora que el futuro se ha materializado vemos que los sueños han sido superados en muchos aspectos, pero en otros aspectos aún más numerosos muchos de nuestros sueños actuales son parecidos a los sueños de la gente en el pasado. En el pasado hubo grandes entusiasmos por uno u otro método de resolver un problema. Uno era que la educación debería llegar a ser universal, pues entonces todos los hombres llegarían a ser Voltaire y lo tendríamos todo solucionado. La educación universal es probablemente algo bueno, pero uno puede enseñar el mal tanto como el bien; uno [podría] enseñar la falsedad tanto como la verdad. La comunicación entre naciones, a medida que se desarrolla mediante el desarrollo técnico de la ciencia, debería ciertamente mejorar las relaciones entre naciones. Bien, depende de lo que uno comunique. Uno puede

comunicar la verdad y uno puede comunicar mentiras. Uno puede comunicar amenazas o favores. Había una gran esperanza en que las ciencias aplicadas liberarían al hombre de sus penalidades físicas; y en medicina, especialmente, parece que todo es para bien. Sí; pero mientras estamos hablando, hay científicos trabajando en laboratorios ocultos tratando de desarrollar, como mejor pueden, enfermedades que otros hombres no puedan curar. Quizá hoy soñamos con que la satisfacción económica de todos los hombres será la solución al problema. Entiendo por ello que todo el mundo debería tener lo suficiente. No pretendo decir, por supuesto, que no debiéramos intentarlo. No quiero decir, con lo que estoy diciendo, que no deberíamos educar, o no deberíamos comunicar, o que no deberíamos producir saciedad económica. Pero es dudoso que esa sea por sí sola la solución a todos los problemas. Porque en aquellos lugares donde tenemos un cierto grado de satisfacción económica, tenemos un montón de nuevos problemas, o probablemente viejos problemas que solo parecen un poco diferentes porque resulta que sabemos bastante acerca de la historia.

De modo que hoy no nos sentimos muy bien, no vemos que lo hayamos hecho demasiado bien. Los hombres, los filósofos de todas las edades, han tratado de encontrar el secreto de la existencia, el significado de todo eso. Porque si pudiesen encontrar el significado real de la vida, entonces todo este esfuerzo humano, toda esta maravillosa potencialidad de los seres humanos, podría moverse en la dirección correcta y avanzaríamos con gran éxito. Por eso ensayamos estas ideas diferentes. Pero la cuestión del significado

del mundo, de la vida, y de los seres humanos, etc., ha sido respondida muchas veces por muchas personas. Por desgracia, todas las respuestas son diferentes; y la gente que tiene una respuesta mira con horror las acciones y los comportamientos de la gente que tiene otra respuesta. Horror, porque ven las cosas terribles que se hacen; porque ven cómo el hombre está siendo llevado hacia un callejón sin salida por esta visión rígida del significado del mundo. De hecho, quizá sea realmente por la fantástica magnitud del horror por lo que se ha hecho evidente cuán grandes son las potencialidades de los seres humanos, y es esto posiblemente lo que nos hace confiar en que si pudiésemos mover las cosas en la dirección adecuada, las cosas serían mucho mejores. ¿Cuál es entonces el significado del mundo? No sabemos cuál es el significado de la existencia. Como resultado de estudiar todas las opiniones que hemos mantenido antes, descubrimos que no sabemos el significado de la existencia. Pero al decir que no sabemos el significado de la existencia hemos encontrado probablemente el canal abierto: y este es simplemente admitir que, a medida que progresamos, debemos dejar oportunidades abiertas para las alternativas; que no debemos hacernos entusiastas del hecho, del conocimiento, de la verdad absoluta, sino que debemos seguir siempre inseguros, [que nosotros] «corremos el riesgo». Los ingleses, quienes han desarrollado su gobierno en esta dirección, lo llaman «arreglárselas», y aunque un poco tonto, algo que suena estúpido, es la forma más científica de progresar. Decidir la respuesta no es científico. Para progresar, uno debe dejar la puerta

entreabierto a lo desconocido: solo entreabierto. Estamos solo al principio del desarrollo de la raza humana; del desarrollo de la mente humana, de la vida inteligente: tenemos años y años por delante. Tenemos la responsabilidad de no dar hoy todas las respuestas, de no dirigir a todo el mundo en una dirección y decir: «Esta es la solución a todo». Porque entonces estaremos encadenados a los límites de nuestra imaginación actual. Solo seremos capaces de hacer aquellas cosas que hoy pensamos que son las cosas que hay que hacer. Mientras que si dejamos siempre algún resquicio a la duda, algún lugar para la discusión, y procedemos de una forma análoga a las ciencias, entonces esta dificultad no aparecerá. Por consiguiente, creo que, aunque hoy no sea el caso, puede llegar un día, me gustaría confiar en ello, en que seamos completamente conscientes de que el poder del gobierno debería ser limitado; que los gobiernos no deberían tener el poder de decidir la validez de las teorías científicas; que es ridículo que traten de hacerlo; que no van a determinar las diversas descripciones de la historia o de la teoría económica o de la filosofía. Solo de esta forma podrán desarrollarse finalmente las posibilidades reales de la raza humana futura.

Capítulo 5

Hay mucho sitio al fondo

En esta famosa conferencia pronunciada ante la American Physical Society el 29 de diciembre de 1959, en Caltech, Feynman, el «padre de la nanotecnología», expone, décadas por delante de su tiempo, el futuro de la miniaturización: cómo poner toda la Enciclopedia Británica en la cabeza de un alfiler, la drástica reducción de tamaño de los objetos tanto biológicos como inanimados, y los problemas de lubricación en máquinas más pequeñas que el punto que cierra esta frase. Feynman hace su famosa apuesta, desafiando a los jóvenes científicos a construir un motor operativo de un tamaño no mayor de 1/25 centímetros en cualquier dirección.

Contenido:

- §. Una invitación a entrar en un nuevo campo de la física
- §. ¿Cómo escribimos pequeño?
- §. Información a pequeña escala
- §. Mejores microscopios electrónicos
- §. El maravilloso sistema biológico
- §. Miniaturizar el computador
- §. Miniaturización por evaporación
- §. Problemas de lubricación
- §. Un centenar de manos minúsculas
- §. Reordenar los átomos
- §. Átomos en un mundo pequeño
- §. Competición entre institutos

§. Una invitación a entrar en un nuevo campo de la física

Imagino que los físicos experimentales deben mirar con envidia a hombres como Kamerlingh-Onnes²⁶, quien descubrió un campo como el de las bajas temperaturas que parece un pozo sin fondo en el que se puede profundizar cada vez más. Un hombre así es entonces un líder y tiene cierto monopolio temporal en una aventura científica. Percy Bridgman²⁷ abrió otro campo nuevo al diseñar un modo de obtener presiones más altas, y fue capaz de entrar en él y llevarnos hasta el final. La consecución de vacíos cada vez mayores constituyó un desarrollo semejante.

Me gustaría describir un campo en el que se ha hecho poco, pero en el que en teoría puede hacerse muchísimo. Este campo no es exactamente similar a los otros en cuanto que no nos va a decir mucho de física fundamental (en el sentido de «¿qué son las partículas extrañas?»), sino que se parece más a la física del estado sólido en el sentido de que podría decirnos mucho de gran interés sobre fenómenos extraños que ocurren en situaciones complejas. Además, un punto de la mayor importancia es que tendría un enorme número de aplicaciones técnicas.

De lo que quiero hablar es del problema de manipular y controlar cosas a una escala pequeña.

En cuanto menciono esto, la gente me habla de miniaturización, y de cuánto ha progresado hoy. Me hablan de motores eléctricos que

²⁶ Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926), ganador del Premio Nobel de Física en 1913 por sus investigaciones de las propiedades de la materia a bajas temperaturas, que condujeron a la producción del helio líquido. (*N. del e.*)

²⁷ Percy Bridgman (1882-1961) ganó el Premio Nobel de Física en 1946 por su invención de un aparato para producir presiones extremadamente altas, y su trabajo en física de altas presiones. (*N. del e.*)

tienen el tamaño de la uña de un dedo meñique. Y hay un dispositivo en el mercado, me dicen, con el que se puede escribir el Padrenuestro en la cabeza de un alfiler. Pero eso no es nada; ese es el paso más primitivo y vacilante en la dirección que intento discutir. Hay un mundo extraordinariamente pequeño debajo. En el año 2000, cuando miren hacia esta era, se preguntarán maravillados por qué hasta el año 1960 no empezó nadie a moverse seriamente en esta dirección.

¿Por qué no podemos escribir los 24 volúmenes de la Enciclopedia Británica *en la cabeza de un alfiler*?

Veamos lo que esto implicaría. La cabeza del alfiler tiene un diámetro aproximado de un milímetro y medio. Si la ampliamos 25 000 veces, el área de la cabeza del alfiler se transforma en un área equivalente a la de todas las páginas de la *Enciclopedia Británica*. Por consiguiente, todo lo que hay que hacer es reducir 25 000 veces en tamaño toda la *Enciclopedia*. ¿Es eso posible? El poder de resolución del ojo es aproximadamente de dos décimas de milímetro, que es aproximadamente el diámetro de uno de los puntitos de las reproducciones de la *Enciclopedia*. Esto, cuando uno lo reduce 25 000 veces, aún tiene 80 angstroms²⁸ de diámetro, unos 32 átomos uno detrás de otro, en un metal ordinario. En otras palabras, uno de dichos puntos seguiría conteniendo en su área 1000 átomos. Así que el tamaño de cada punto puede ajustarse fácilmente para las necesidades del fotograbado, y no hay problema

²⁸ Un angstrom = una diez mil millonésima de metro. (*N. del e.*)

de espacio en la cabeza de un alfiler para poner la *Enciclopedia Británica*.

Además, si está escrito así, también puede leerse. Imaginemos que está escrito en letras metálicas; es decir, donde está el negro en la *Enciclopedia*, hemos levantado letras de metal que tienen realmente $1/25\ 000$ de su tamaño ordinario. ¿Cómo lo leeríamos?

Si hubiéramos escrito algo de esa forma, podríamos leerlo utilizando técnicas de uso común actualmente. (Sin duda se encontrarán formas mejores cuando lleguen a escribirse realmente, pero para plantear mi argumento de forma conservadora solo consideraré técnicas que conocemos hoy). Presionaríamos el metal contra un material plástico y haríamos un molde del mismo; luego quitaríamos el plástico con mucho cuidado, evaporaríamos sílice en el plástico para obtener una película muy delgada, luego lo ensombreceríamos evaporando oro a cierto ángulo respecto a la sílice de modo que todas las letras pequeñas se destacarían claramente, disolveríamos el plástico de la película de sílice, ¡y entonces lo examinaríamos con un microscopio electrónico!

No hay duda de que si la cosa se redujese 25 000 veces en forma de letras en relieve en el alfiler, sería fácil para nosotros leerlo hoy. Además, no hay duda de que sería fácil hacer copias del máster; solo necesitaríamos presionar de nuevo la misma placa metálica sobre plástico y tendríamos otra copia.

§. ¿Cómo escribimos pequeño?

La siguiente pregunta es: ¿cómo lo escribimos? Hoy no tenemos una técnica estándar para hacerlo. Pero supongamos que no es tan difícil como parece al principio. Podemos invertir las lentes del microscopio electrónico para reducir igual que para ampliar. Iones procedentes de una fuente, enviados a través de las lentes del microscopio colocadas en orden inverso, podrían concentrarse en un haz muy pequeño. Podríamos escribir con ese haz como escribimos en un osciloscopio de rayos catódicos, barriendo líneas, y teniendo un ajuste que determina la cantidad de material que va a depositarse a medida que exploramos las líneas.

Este método podría ser muy lento debido a las limitaciones de carga espacial. Habrá métodos mucho más rápidos. Podríamos hacer primero, quizá mediante un proceso fotográfico, una pantalla que tenga agujeros con la forma de las letras. Entonces haríamos pasar un arco por detrás de los agujeros y extraeríamos iones metálicos a través de los mismos; luego podríamos utilizar otra vez nuestro sistema de lentes y formar una pequeña imagen en forma de iones, que depositaría el metal en la aguja.

Una forma más simple podría ser la siguiente (aunque yo no estoy seguro de que funcione): tomamos luz y, mediante un microscopio óptico que funcione en sentido inverso, la concentramos en una pantalla fotoeléctrica muy pequeña. Entonces salen electrones de la pantalla que está siendo iluminada. Estos electrones se concentran mediante las lentes del microscopio electrónico para incidir directamente sobre la superficie del metal. ¿Grabará el metal un haz semejante si funciona el tiempo suficiente? No lo sé. Si no funciona

para una superficie metálica, sería posible encontrar alguna superficie con la que cubrir la aguja original de modo que, allí donde inciden los electrones, se produzca un cambio que pudiéramos reconocer más tarde.

No hay problema de intensidad en estos dispositivos. Al menos no los que son habituales en amplificación, donde uno tiene que tomar unos pocos electrones y dispersarlos sobre una pantalla cada vez más grande; aquí es precisamente lo contrario. La luz que obtenemos de una página se concentra en un área muy pequeña, de modo que es muy intensa. Los pocos electrones que proceden de la pantalla fotoeléctrica son reducidos a un área minúscula de modo que, una vez más, son muy intensos. ¡Yo no sé por qué no se ha hecho esto todavía!

Eso es por lo que se refiere a la *Enciclopedia Británica* en la cabeza de un alfiler, pero consideremos todos los libros del mundo. La biblioteca del Congreso tiene aproximadamente 9 millones de volúmenes; la biblioteca del Museo Británico tiene 5 millones de volúmenes; hay también 5 millones de volúmenes en la Biblioteca Nacional de Francia. Sin duda hay duplicaciones, de modo que digamos que hay unos 24 millones de volúmenes de interés en el mundo.

¿Qué sucedería si yo imprimo todo esto a la escala que hemos estado discutiendo? ¿Cuánto espacio se necesitaría? Se necesitaría, por supuesto, el área de aproximadamente un millón de cabezas de alfiler porque, en lugar de tener solo los 24 volúmenes de la *Enciclopedia*, ahora tenemos 24 millones de volúmenes. El millón de

cabezas de alfiler pueden colocarse en un cuadrado de mil alfileres de lado, o un área de aproximadamente 3 metros cuadrados. Es decir, la réplica de sílice con el sustrato delgado de plástico con la que hemos hecho las copias, con toda esta información, tiene un área de aproximadamente el tamaño de 35 páginas de la *Enciclopedia*. Esto es aproximadamente la mitad de las páginas que hay en esta revista. Toda la información que toda la humanidad ha registrado en libros puede ser transportada en un panfleto en la mano y no escrita en código, sino en una simple reproducción de las imágenes originales, los grabados, y cualquier otra cosa a una escala pequeña sin pérdida de resolución.

¡Qué diría nuestra bibliotecaria en Caltech, que corre de un edificio a otro, si yo le dijera que dentro de diez años toda la información cuya pista trata de seguir —120.000 volúmenes, apilados desde el suelo hasta el techo, cajones llenos de fichas, almacenes llenos de libros viejos— podrían guardarse solo en una tarjeta de biblioteca! Cuando la Universidad de Brasil, por ejemplo, descubre que su biblioteca se ha quemado, podemos enviarle una copia de todos los libros de nuestra biblioteca dándoles una copia de la placa maestra en unas pocas horas y enviándosela en un sobre no mayor ni más pesado que cualquier otra carta normal por correo aéreo.

Ahora bien, el nombre de esta charla es «Hay *mucho* sitio al fondo», no solo «Hay sitio al fondo». Lo que he demostrado es que hay sitio: que se puede reducir el tamaño de las cosas de una forma práctica. Ahora quiero demostrar que hay *mucho* sitio. No discutiré ahora cómo vamos a hacerlo, sino solo que es posible en principio; en

otras palabras, que es posible según las leyes de la física. No estoy inventando la antigravedad, que puede ser posible algún día solo si las leyes no son las que hoy creemos. Yo les estoy diciendo lo que podría hacerse si las leyes *son* las que pensamos; si no lo estamos haciendo es simplemente porque todavía no hemos llegado a ello.

§. Información a pequeña escala

Supongamos que, en lugar de tratar de reproducir las imágenes y toda la información directamente en su forma actual, escribimos solo el contenido de información en un código de puntos y rayas, o algo similar, para representar las diversas letras. Cada letra representa seis o siete «bits» de información; es decir, se necesitan solo seis o siete puntos o rayas para cada letra. Ahora, en lugar de escribir todo, como he hecho antes, en la *superficie* de la cabeza de un alfiler, voy a utilizar también el interior del material.

Representemos un punto por una pequeña partícula de un metal, la raya siguiente por una pequeña partícula adyacente de otro metal, y así sucesivamente. Supongamos, para ser conservadores, que un bit de información va a necesitar un pequeño cubo de 5 por 5 por 5 átomos; es decir, 125 átomos. Quizá necesitemos un centenar y algún tipo especial de átomos para estar seguros de que la información no se pierde por difusión, o por algún otro proceso.

He estimado cuántas letras hay en la *Encyclopaedia*, he supuesto que cada uno de mis 24 millones de libros es tan grande como un volumen de la *Encyclopaedia*, y he calculado entonces cuántos bits de información hay (10^{15}). Por cada bit permito 100 átomos. Resulta

que toda la información que el hombre ha acumulado cuidadosamente en todos los libros del mundo puede escribirse de esta forma en un cubo de material de 1/8 milímetros de grosor, que es la mota más simple de polvo que puede ser vista por el ojo humano. ¡De modo que hay *mucho* sitio al fondo! ¡No me hablen de microfilm!

Este hecho —que enormes cantidades de información pueden transportarse en un espacio extraordinariamente pequeño— es, por supuesto, bien conocido para los biólogos, y resuelve el misterio que existía antes de que entendiéramos esto claramente: cómo era posible que en la célula más minúscula pudiera estar almacenada toda la información necesaria para la organización de una criatura tan compleja como nosotros. Toda esta información —si tenemos ojos oscuros, o si pensamos siquiera, o que en el embrión la mandíbula debería desarrollarse primero con un agujero lateral de modo que posteriormente un nervio pueda desarrollarse a través del mismo—, toda esta información está contenida en una fracción pequeñísima de la célula en forma de moléculas de ADN de cadena larga en las que aproximadamente se utilizan 50 átomos para un bit de información acerca de la célula.

§. Mejores microscopios electrónicos

Si he escrito en un código, con 5 por 5 por 5 átomos para un bit, la pregunta es: ¿cómo podría leerlo hoy? El microscopio electrónico no es suficientemente bueno; con el máximo cuidado y esfuerzo, solo puede resolver unos 10 angstroms. Me gustaría tratar de

inculcarles, mientras estoy hablando sobre estas cosas a pequeña escala, la importancia que tiene mejorar el microscopio electrónico en un factor cien. No es imposible; no va contra las leyes de la difracción de los electrones. La longitud de onda del electrón en un microscopio semejante es de solo $1/20$ de angstrom. Así que debería ser posible ver los átomos uno por uno. ¿Qué ventajas tendría ver con claridad los átomos de forma individual?

Tenemos amigos en otros campos, en biología, por ejemplo. A menudo nosotros los físicos los miramos y decimos: «¿Sabéis, colegas, por qué estáis haciendo tan pocos progresos?». (En realidad yo no conozco ningún campo donde se estén haciendo progresos más rápidos que los que se hacen hoy en biología). «Deberíais usar más matemáticas, como hacemos nosotros». Ellos podrían contestarnos, pero son educados, de modo que responderé por ellos: «Lo que deberíais hacer para que *nosotros* hagamos progresos más rápidos es construir un microscopio electrónico cien veces mejor».

¿Cuáles son los problemas más centrales y fundamentales hoy en la biología? Hay preguntas como: ¿Cuál es la secuencia de bases en el ADN? ¿Qué sucede cuando hay una mutación? ¿Qué relación hay entre el orden de las bases en el ADN y el orden de los aminoácidos en la proteína? ¿Cuál es la estructura del ARN; es una cadena simple o una cadena doble, y cómo está relacionado en su orden de bases con el ADN? ¿Cuál es la organización de los microsomas? ¿Cómo se sintetizan las proteínas? ¿Dónde va el ARN? ¿Cómo se asienta? ¿Dónde se sitúan las proteínas? ¿Dónde entran los aminoácidos? En la fotosíntesis, ¿dónde está la clorofila; cómo está

dispuesta; dónde están implicados los carotenoides en esto? ¿Cuál es el sistema de conversión de luz en energía química?

Es muy fácil responder a muchas de estas preguntas de biología fundamentales; ¡solo hay que *mirar la cosa*! Uno verá el orden de las bases en las cadenas; verá la estructura del microsoma. Por desgracia, el microscopio actual ve a una escala que es demasiado tosca. Hagamos el microscopio cien veces más potente y muchos problemas de la biología se harán mucho más fáciles. Yo exagero, por supuesto, pero los biólogos nos estarían ciertamente muy agradecidos y preferirían eso a la crítica de que deberían utilizar más matemáticas.

La teoría actual de los procesos químicos está basada en la física teórica. En este sentido, la física proporciona la base de la química. Pero la química tiene también análisis. Si uno tiene una sustancia extraña y quiere saber cuál es, debe seguir un largo y complicado proceso de análisis químico. Hoy se puede analizar casi cualquier cosa, de modo que estoy un poco retrasado con mi idea. Pero si los físicos quisieran, también podrían ir más allá de los químicos en el problema del análisis químico. Sería muy fácil hacer un análisis de cualquier sustancia química complicada; todo lo que habría que hacer sería mirarla y ver dónde están los átomos. El único problema es que el microscopio electrónico es demasiado pobre en un factor cien. (Más tarde, me gustaría plantear la cuestión: ¿pueden los físicos hacer algo acerca del tercer problema de la química, a saber, la síntesis? ¿Hay una forma *física* de sintetizar cualquier sustancia química?).

La razón por la que el microscopio electrónico es tan pobre es que el valor- f de las lentes es solo de $1/1000$; no tenemos una apertura suficientemente grande. Y yo sé que hay teoremas que demuestran que, con lentes de campo estacionario axialmente simétrico, es imposible conseguir un valor- f mayor, y todas esas cosas; y que, por lo tanto, el poder de resolución en la actualidad está en su máximo teórico. Pero en todo teorema hay hipótesis. ¿Por qué tiene que ser simétrico el campo? Propongo esto como un desafío: ¿no hay alguna forma de hacer el microscopio electrónico más potente?

§. El maravilloso sistema biológico

El ejemplo biológico de escribir información a una escala pequeña me ha inspirado para pensar en algo que debería ser posible. La biología no consiste simplemente en escribir información; consiste en *hacer algo* con ella. Un sistema biológico puede ser extraordinariamente pequeño. Muchas de las células son minúsculas, pero son muy activas; fabrican diversas sustancias; se mueven; se agitan; y hacen todo tipo de cosas maravillosas, todo a una escala muy pequeña. Además, almacenan información. Consideremos la posibilidad de que pudiéramos hacer también un objeto muy pequeño que haga lo que queramos, ¡qué podamos fabricar un objeto que maniobre en este nivel!

Puede haber incluso un interés económico en este negocio de hacer las cosas muy pequeñas. Permítanme recordarles algunos de los problemas que presentan los computadores. En los computadores tenemos que almacenar una gran cantidad de información. El tipo

de escritura que mencionaba antes, en la que yo tenía todo como una distribución de metal, es permanente. Mucho más interesante para un computador es una forma de escribir, borrar y escribir algo nuevo. (Esto se debe normalmente a que no queremos malgastar el material sobre el que acabamos de escribir. Pero si pudiésemos escribir en un espacio muy pequeño, no supondría ninguna diferencia; simplemente podría ser desechado después de ser leído. No cuesta mucho el material).

§. Miniaturizar el computador

Yo no sé cómo hacer esto a pequeña escala en la práctica, pero sé que los computadores son muy grandes; ocupan habitaciones enteras. ¿Por qué no podemos hacerlos muy pequeños, hacerlos con cables pequeños, elementos pequeños y, por pequeño, quiero decir *pequeño*? Por ejemplo, los cables deberían tener de 10 a 100 átomos de diámetro, y los circuitos deberían ser de algunos miles de angstroms de sección. Cualquiera que haya analizado la teoría lógica de los computadores ha llegado a la conclusión de que las posibilidades de los computadores son muy interesantes si pudieran hacerse más complicados en varios órdenes de magnitud. Si tuvieran millones de veces los elementos actuales, podrían formar juicios. Tendrían tiempo de calcular cuál es la mejor forma de hacer el cálculo que van a realizar. Podrían seleccionar un método de análisis que, según su experiencia, fuera mejor que el que les habíamos dado. Y en muchos otros aspectos tendrían características cualitativamente nuevas.

Si miro sus caras soy capaz de reconocer inmediatamente las que he visto antes. (En realidad, mis amigos dirán que he elegido aquí un ejemplo poco afortunado para ilustrar este tema. Al menos reconozco que se trata de *hombres* y no de *manzanas*). Pero no hay ninguna máquina que, a esa velocidad, pueda tomar una imagen de un rostro y decir siquiera que es un hombre; y mucho menos que es el mismo hombre que se le mostró antes, a menos que sea exactamente la misma imagen. Si el rostro ha cambiado; si estoy más cerca del rostro; si estoy más lejos del rostro; si la luz cambia... lo reconozco de todas formas. Ahora bien, este pequeño computador que llevo en mi cabeza es capaz de hacer eso fácilmente. Los computadores que construimos no son capaces de hacerlo. El número de elementos que hay dentro de mi cráneo es enormemente mayor que el número de elementos que hay en nuestros «maravillosos» computadores. Pero nuestros computadores mecánicos son demasiado grandes; los elementos en este cráneo son microscópicos. Yo quiero hacer algunos que sean *sub* microscópicos.

Si quisiéramos hacer un computador que tuviera todas estas maravillosas capacidades extra, tendríamos que construirlo, quizá, con un tamaño similar al del Pentágono. Esto tiene varios inconvenientes. En primer lugar, requiere demasiado material; quizá no haya suficiente germanio en el mundo para todos los transistores que habría que colocar dentro de este enorme objeto. Está también el problema de la generación de calor y el consumo de potencia; se

necesitaría recurrir a la TVA²⁹ para poner en marcha el computador. Pero una dificultad incluso más práctica es que el computador estaría limitado en su velocidad. Debido a su gran tamaño, se necesita un tiempo finito para llevar la información de un lugar a otro. La información no puede ir más rápida que la velocidad de la luz, de modo que, en definitiva, cuando nuestros computadores se hagan cada vez más rápidos y cada vez más complicados, tendremos que hacerlos cada vez más pequeños.

Pero hay mucho sitio para hacerlos más pequeños. No hay nada que yo pueda ver en las leyes de la física que diga que los elementos del computador no pueden hacerse enormemente más pequeños de lo que son ahora. De hecho, puede haber ciertas ventajas.

§. Miniaturización por evaporación

¿Cómo podemos hacer un dispositivo semejante? ¿Qué tipo de procesos de fabricación utilizaríamos? Una posibilidad que podría considerar, ya que hemos hablado de escribir colocando átomos en una cierta configuración, sería evaporar el material y, a continuación, evaporar el aislante. Luego, para la capa siguiente, evaporar otra posición de un cable, otro aislante, y así sucesivamente. De este modo, uno simplemente evapora hasta que tiene un bloque de material que contiene los elementos —bobinas y condensadores, transistores y todo lo demás— de dimensiones extraordinariamente finas.

²⁹ TVA = Tennessee Valley Authority. Agencia gubernamental de Estados Unidos encargada de gestionar los recursos hidráulicos del valle del Tennessee, en especial la producción y distribución de energía. Sus estatutos han servido de modelo para organismos similares en otros lugares. (*N. del t.*)

Pero me gustaría considerar, solo por diversión, que existen otras posibilidades. ¿Por qué no podemos fabricar estos pequeños computadores de un modo parecido a como fabricamos los grandes? ¿Por qué no podemos taladrar agujeros, cortar, soldar, estampar, moldear formas diferentes, y todo a un nivel infinitesimal? ¿Cuáles son las limitaciones en cuanto al tamaño mínimo que tiene que tener un objeto antes de que ya no podamos moldearlo? Cuántas veces, cuando ustedes están trabajando en algo frustrantemente minúsculo, como el reloj de pulsera de su mujer, se han dicho: « ¡Si pudiera entrenar a una hormiga para hacer esto!». Lo que me gustaría sugerir es la posibilidad de entrenar a una hormiga para que entrene a una pulga para hacer esto. ¿Cuáles son las posibilidades de máquinas pequeñas pero móviles? Quizá sean o no útiles, pero seguramente sería divertido hacerlas.

Consideremos cualquier máquina —por ejemplo, un automóvil— y preguntémonos por los problemas para hacer una máquina similar infinitesimal. Supongamos que en el diseño concreto del automóvil necesitamos una cierta precisión de las partes; necesitamos una exactitud, supongamos, de $2/10.000$ de centímetro. Si hay una imprecisión mayor en la forma del cilindro y todo lo demás, la cosa no va a funcionar muy bien. Si yo hago el objeto demasiado pequeño, tengo que preocuparme por el tamaño de los átomos; no puedo hacer un círculo de «bolas» por así decir, si el círculo es demasiado pequeño. Así que si yo cometo este error de un $2/10.000$ de centímetro, que corresponde a un error de 10 átomos, resulta que puedo reducir las dimensiones de un automóvil 4000 veces,

aproximadamente, de modo que tiene 1 mm de tamaño. Obviamente, si ustedes rediseñan el automóvil de modo que funcione con una tolerancia mucho mayor, lo que no es en absoluto imposible, entonces podrían hacer un dispositivo mucho más pequeño.

Resulta interesante considerar cuáles son los problemas en máquinas tan pequeñas. En primer lugar, con piezas tensadas al mismo grado, las fuerzas van como el área que estamos reduciendo, de modo que cosas como el peso y la inercia no son importantes relativamente. En otras palabras, la resistencia del material es mucho mayor en proporción. Las tensiones y la expansión del volante debido a la fuerza centrífuga, por ejemplo, estarían en la misma proporción solo si la velocidad de rotación se incrementa en la misma proporción en que decrece el tamaño. Por el contrario, los metales que utilizamos tienen una estructura granular, y esto sería muy molesto a pequeña escala porque el material no es homogéneo. Plásticos y vidrios y cosas de esta naturaleza amorfa son mucho más homogéneos, y por ello tendríamos que fabricar nuestras máquinas con tales materiales.

Hay problemas asociados con los componentes eléctricos del sistema: con los cables de cobre y las piezas magnéticas. Las propiedades magnéticas a escala muy pequeña no son las mismas que a escala muy grande; está implicado el problema de los «dominios». Un imán grande está constituido por millones de dominios, pero a escala pequeña solo puede hacerse con un dominio. El equipamiento eléctrico no puede reescalarsse

simplemente; tiene que ser rediseñado. Pero no puedo ver ninguna razón por la que no pueda rediseñarse para trabajar de nuevo.

§. Problemas de lubricación

La lubricación implica algunas cuestiones interesantes. La viscosidad efectiva del aceite sería cada vez mayor a medida que aumentara la reducción (y si aumentamos la velocidad tanto como podamos). Si no aumentamos tanto la velocidad, y cambiamos el petróleo por queroseno o algún otro fluido, el problema no es tan grave. Pero, de hecho, ¡quizá no tengamos que lubricar en absoluto! Tenemos una gran cantidad de fuerza extra. Dejemos que los engranajes trabajen en seco; no se calentarán porque el calor se disipa muy rápidamente en un dispositivo tan pequeño. Esta rápida pérdida de calor impediría que la gasolina hiciera explosión, de modo que es imposible un motor de combustión interna. Pueden utilizarse otras reacciones químicas que liberan energía en frío. Probablemente un suministro externo de potencia eléctrica sería más conveniente para máquinas tan pequeñas.

¿Qué utilidad tendrían tales máquinas? Quién sabe. Por supuesto, un automóvil pequeño solo sería útil para que lo condujeran las pulgas, y supongo yo que nuestros intereses cristianos no van tan lejos. Sin embargo, sí advertimos la posibilidad de la fabricación de elementos pequeños para computadores en fábricas completamente automáticas, que contengan tornos y otras máquinas herramientas a un nivel muy pequeño. El torno pequeño no tendría que ser exactamente como nuestro torno grande. Dejo a su imaginación la

mejora del diseño para sacar todo el partido de las propiedades de objetos a escala pequeña, y de forma tal que el aspecto completamente automático sería más fácil de conseguir.

Un amigo mío (Albert R. Hibbs)³⁰ sugiere una posibilidad muy interesante para máquinas relativamente pequeñas. Él dice que, aunque es una idea descabellada, sería interesante que en cirugía uno se pudiera tragar al cirujano. Ustedes ponen al cirujano mecánico dentro de un vaso sanguíneo y él entra dentro del corazón y «mira». (Por supuesto, la información tiene que ser extraída). Descubre qué válvula es la defectuosa y toma una pequeña navaja y la extirpa. Otras máquinas pequeñas podrían ser incorporadas de forma permanente para ayuda de algún órgano que funcione inadecuadamente.

Ahora llega la pregunta interesante: ¿Cómo construimos un mecanismo tan minúsculo? Se lo dejo a ustedes. Sin embargo, permítanme sugerir una posibilidad extraña. Ustedes saben que en las plantas de energía atómica hay materiales y máquinas que no se pueden manejar directamente porque se han hecho radiactivos. Para desatornillar tuercas y colocar pernos y todo eso, tienen un conjunto de manos amo y esclavo, de modo que operando un conjunto de palancas aquí, uno controla las «manos» allí, y puede girarlas de esta forma y manejar las cosas de manera bastante delicada.

La mayoría de estos dispositivos están hechos actualmente de forma bastante simple, en cuanto que hay un cable concreto, como una

³⁰ Un estudiante y más tarde colega de Feynman. (N. del e.)[Ambos son coautores del libro *Quantum Mechanics and Path Integrals*, que presentaba un nuevo enfoque de la mecánica cuántica. (N. del t.)]

cuerda de marioneta, que va directamente desde los controles a las «manos». Pero, por supuesto, también se han hecho cosas utilizando servomotores, de modo que la conexión entre una cosa y la otra es eléctrica en lugar de mecánica. Cuando uno gira las palancas, estas mueven un servomotor y cambian las corrientes eléctricas en los cables, lo que recoloca un motor en el otro extremo.

Ahora bien, yo quiero construir exactamente el mismo dispositivo: un sistema amo-esclavo que funcione eléctricamente. Pero quiero que los esclavos estén hechos de forma especialmente cuidadosa por modernos maquinistas a gran escala de modo que sean de un cuarto de la escala de las «manos» que uno maneja normalmente. Así que ustedes tienen un esquema por el que pueden hacer cosas a una escala de un cuarto en cualquier caso, los pequeños servomotores con manos pequeñas juegan con tuercas y tornillos pequeños; taladran pequeños agujeros; son cuatro veces más pequeños. ¡Ajá! Así fabrico un torno de un cuarto de tamaño; fabrico herramientas de un cuarto de tamaño; y hago, a la escala de un cuarto, otro conjunto más de manos ¡de nuevo a un cuarto de tamaño con respecto al anterior! Esto supone un dieciseisavo de tamaño con respecto a mi punto de vista. Y una vez que haya acabado de hacer esto establezco una conexión directa desde mi sistema de escala grande, quizá por medio de transformadores, a los servomotores de un dieciseisavo de tamaño. Así yo puedo ahora manipular las manos de un dieciseisavo de tamaño.

Bien, ustedes ya tienen por dónde empezar. Es un programa bastante difícil, pero es una posibilidad. Podrían decir que se puede

ir mucho más lejos en un paso que pasar solo de uno a cuatro. Por supuesto, todo esto tiene que ser diseñado muy cuidadosamente y no es necesario simplemente hacerlo como si fueran manos. Si piensan en ello con detenimiento, es probable que puedan llegar a un sistema mucho mejor para hacer cosas semejantes.

Si ustedes trabajan con un pantógrafo, incluso hoy, pueden conseguir mucho más que un factor de cuatro en un solo paso. Pero no pueden trabajar directamente con un pantógrafo que haga un pantógrafo más pequeño que a su vez haga un pantógrafo más pequeño, y ello es debido a la holgura de los agujeros y las irregularidades de la construcción. El extremo del pantógrafo oscila con una irregularidad proporcionalmente mayor que la irregularidad con la que ustedes mueven sus manos. Si desciendo a esta escala, encontraría que el extremo del pantógrafo que hay en el extremo del pantógrafo que hay en el extremo del pantógrafo estaría agitándose tanto que no haría nada razonable.

En cada etapa es necesario mejorar la precisión del aparato. Si, por ejemplo, tras haber construido un pequeño torno con un pantógrafo encontramos su tornillo de plomo irregular —más irregular que el tornillo en la escala grande—, podríamos refinar el tornillo contra nueces frágiles que se pueden invertir de la forma usual hacia atrás y delante hasta que este tornillo de plomo sea, en su escala, tan preciso como nuestros tornillos originales en nuestra escala.

Podemos hacer superficies lisas frotando superficies rugosas en triplicado —en tres pares— y las superficies lisas se hacen entonces más lisas que las cosas con las que empezamos. Así pues, no es

imposible mejorar la precisión a una escala pequeña mediante las operaciones correctas. De modo que, cuando construimos este material, es necesario en cada paso mejorar la precisión del equipo trabajando allí un rato, haciendo tornillos de plomo precisos, bloques de Johansen, y todos los demás materiales que utilizamos en una máquina precisa que trabaja en el nivel superior. Tenemos que detenernos en cada nivel y fabricar todo el material necesario para pasar al nivel siguiente; un programa muy largo y muy difícil. Quizá ustedes puedan imaginar una forma mejor que esta para llegar a una escala pequeña con más rapidez.

Pese a todo, al final ustedes solo han conseguido un torno bebé cuatro mil veces más pequeño de lo normal. Pero estábamos pensando en hacer un computador enorme, que íbamos a construir taladrando agujeros con este torno para hacer pequeñas arandelas para el computador. ¿Cuántas arandelas pueden ustedes fabricar en este torno?

§. Un centenar de manos minúsculas

Cuando yo construyo mi primer conjunto de «manos» esclavas a la escala de un cuarto, voy a construir diez conjuntos. Hago diez conjuntos de «manos», y las cableo con mis palancas originales de modo que cada una de ellas haga exactamente la misma cosa y al mismo tiempo, en paralelo. Ahora, cuando estoy construyendo mis nuevos dispositivos, de nuevo de un cuarto de tamaño, hago que cada uno fabrique diez copias, de modo que tendría un centenar de «manos» de $1/16$ de tamaño.

¿Dónde voy a colocar el millón de tornos que voy a tener? Pues no tiene ningún secreto; el volumen es mucho menor que incluso el de un torno a escala completa. Por ejemplo, si construyo mil millones de pequeños tornos, cada uno de ellos de $1/4000$ de la escala de un torno regular, hay muchos materiales y espacio disponible porque en los mil millones de tornos hay menos que un 2 por 100 de los materiales que hay en un torno grande. Ya ven que los materiales no suponen ningún coste. Así que quiero construir mil millones de factorías minúsculas, modelos una de otra, que están fabricando simultáneamente, taladrando agujeros, estampando piezas y así sucesivamente.

Cuando reducimos el tamaño, surgen varios problemas interesantes. No todas las cosas se reducen de escala proporcionalmente. Está el problema de que los materiales se adhieren por las atracciones moleculares (Van der Waals)³¹. Sería algo parecido a esto: una vez que ustedes han hecho una pieza y desenroscan la nuez de un perno, esta no se caerá debido a que la gravedad no es apreciable; incluso sería difícil sacarla del perno. Sería como aquellas películas antiguas en las que aparece un hombre con las manos llenas de melaza que trata de deshacerse de un vaso de agua. Habrá varios problemas de esta naturaleza que tendremos que estar dispuestos a plantear.

§. Reordenar los átomos

³¹ Fuerzas de Van der Waals. Débiles fuerzas atractivas entre átomos y moléculas. Johannes Diderik Van der Waals (1837-1923) recibió el Premio Nobel de Física en 1910 por su trabajo sobre la ecuación de estado para gases y líquidos. (*N. del e.*)

Pero yo no tengo miedo a considerar la pregunta final respecto a si, en última instancia —en un futuro lejano—, podremos disponer los átomos de la forma que queramos; ¡los *propios átomos, hasta el final!* ¿Qué sucedería si pudiésemos ordenar los átomos uno a uno en la forma en que queramos? (Dentro de lo razonable, por supuesto; ustedes no pueden colocarlos de modo que sean químicamente inestables, por ejemplo).

Hasta ahora nos hemos contentado con excavar en el suelo para encontrar minerales. Los calentamos y hacemos cosas a gran escala con ellos, confiamos en obtener una sustancia pura con solo ciertas impurezas, y así sucesivamente. Pero debemos aceptar siempre cierta disposición atómica que nos da la naturaleza. No hemos obtenido nada, digamos, con una disposición de «tablero de ajedrez», con los átomos de impureza dispuestos a 1000 angstroms de distancia, o en alguna otra pauta concreta.

¿Qué podríamos hacer con estructuras estratificadas con las capas precisas? ¿Cuáles serían las propiedades de los materiales si realmente pudiéramos disponer los átomos de la forma que los queremos? Sería muy interesante investigarlos teóricamente. No puedo ver exactamente lo que sucedería, pero apenas puedo dudar que cuando tengamos cierto *control* de la organización de las cosas a una escala pequeña, obtendremos un abanico enormemente mayor de las posibles propiedades de las sustancias, y de cosas diferentes que podamos hacer.

Consideremos, por ejemplo, un fragmento de material en el que construimos pequeñas bobinas y condensadores (o sus análogos de

estado sólido) de 1000 o 10.000 angstroms por circuito, uno justo al lado del otro, sobre un área grande, con pequeñas antenas sobresaliendo en el otro extremo; una serie completa de circuitos. ¿Es posible, por ejemplo, emitir luz de un conjunto entero de antenas, igual que emitimos ondas de radio desde un conjunto estructurado de antenas para transmitir programas de radio a Europa? Lo mismo sería emitir luz en una dirección definida con intensidad muy alta. (Quizá un haz semejante no sea muy útil técnica o económicamente).

He pensado en algunos de los problemas de construir circuitos eléctricos a pequeña escala, y el problema de la resistencia es serio. Si ustedes construyen un circuito correspondiente a pequeña escala, su frecuencia natural aumenta, puesto que la longitud de onda se reduce con la escala; pero la profundidad de la envoltura solo disminuye con la raíz cuadrada de la razón de escala, y por ello los problemas de resistencia adquieren una dificultad creciente. Posiblemente podamos combatir la resistencia mediante el uso de la superconductividad si la frecuencia no es demasiado alta, o con otros trucos.

§. Átomos en un mundo pequeño

Cuando llegamos al mundo muy, muy pequeño —digamos circuitos de siete átomos— tenemos un montón de cosas nuevas que sucederían y que representan oportunidades de diseño completamente nuevas. Los átomos a pequeña escala no se comportan como *nada* a gran escala, pues satisfacen las leyes de la

mecánica cuántica. Así, a medida que descendemos y jugamos con los átomos ahí abajo, estamos trabajando con leyes diferentes y podemos confiar en hacer cosas diferentes. Podemos fabricar de modos diferentes. Podemos utilizar no solo circuitos, sino algún sistema que implique los niveles de energía cuantizados, o las interacciones de los espines cuantizados, etc.

Otra cosa que notaremos es que, si descendemos lo suficiente, todos nuestros dispositivos pueden ser producidos en serie de modo que sean copias absolutamente perfectas unos de otros. No podemos construir dos máquinas grandes de modo que las dimensiones sean exactamente las mismas. Pero si nuestra máquina es de solo 100 átomos de altura, solo tenemos que corregir a una mitad de un 1 por 100 para estar seguros de que la otra máquina tiene exactamente el mismo tamaño; ¡a saber, 100 átomos de algo!

En el nivel atómico, tenemos nuevos tipos de fuerzas y nuevos tipos de posibilidades, nuevos tipos de efectos. Los problemas de la fabricación y reproducción de materiales serán muy diferentes. Como he dicho, me inspiro en fenómenos biológicos en los que las fuerzas químicas se emplean de forma repetitiva para producir todo tipo de efectos extraños (uno de los cuales es el autor). Los principios de la física, por lo que puedo ver, no hablan en contra de la posibilidad de manejar las cosas átomo a átomo. 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.

En última instancia, podemos hacer síntesis química. Un químico viene y nos dice: «Miren, quiero una molécula que tenga los átomos

dispuestos de esta forma; constrúyanme dicha molécula». El químico hace una cosa misteriosa cuando quiere hacer una molécula. Él ve que tiene ese anillo, de modo que mezcla esto y aquello, y lo agita y juguetea con todo. Y, al final de un proceso difícil, normalmente consigue sintetizar lo que quiere. Para cuando yo tenga operativos mis dispositivos, de modo que podamos hacerlo con física, él habrá descubierto cómo sintetizar absolutamente cualquier cosa, así que esto será realmente inútil.

Pero es interesante que, en principio, sea posible (creo yo) para un físico sintetizar cualquier sustancia química que elabore el químico. Den las recetas y el físico lo sintetiza. ¿Cómo? Coloquen los átomos donde dice el químico y de este modo fabrican ustedes la sustancia. Los problemas de la química y la biología pueden reducirse mucho si nuestra capacidad para ver lo que estamos haciendo, y para hacer cosas a nivel atómico, se desarrolla en definitiva, un desarrollo que yo creo inevitable. Ahora bien, ustedes podrían decir: « ¿Quién debería hacer esto y por qué debería hacerlo?». Bien, yo señalo algunas de las aplicaciones económicas, pero sé que la razón de que ustedes lo hicieran podría ser por pura diversión. Pero ¡divirtámonos! Organicemos una competición entre laboratorios. Que un laboratorio construya un motor minúsculo y lo envíe a otro laboratorio, y que este lo devuelva con algo que encaje dentro del eje del primer motor.

§. Competición entre institutos

Solo por diversión, y para que los niños se interesen en este campo, propondría que alguien que tenga algún contacto con los institutos de enseñanza secundaria piense en hacer algún tipo de competición entre institutos. Después de todo, ni siquiera hemos empezado en este campo, e incluso los niños pueden escribir más pequeño que nunca se ha escrito antes. Podrían organizar una competición entre los institutos. El instituto de Los Ángeles podría enviar un alfiler al instituto de Venice en el que se diga: « ¿Va todo bien?». Ellos devolverían el alfiler, y en el punto de la «i» dice: «No va mal».

Quizá esto no les anime a hacerlo, y solo la economía lo hará. Por lo tanto quiero hacer algo; pero no lo puedo hacer en este momento porque no he preparado las bases. Mi intención es ofrecer un premio de 1000 dólares al primer tipo que pueda coger la información que hay en una página de un libro y colocarla en un área $1/25\,000$ veces menor en escala lineal de tal forma que pueda leerse con un microscopio electrónico.

Y quiero ofrecer otro premio —si puedo imaginar una forma de enunciarlo de modo que no entre en una maraña de discusiones sobre definiciones— de otros 1000 dólares para el primer tipo que haga un motor eléctrico rotatorio que pueda ser controlado desde fuera y, sin contar los cables, tenga solo $1/10$ de centímetro cúbico. No creo que tales premios tengan que esperar mucho a los pretendientes.

Finalmente, Feynman tuvo que satisfacer ambos desafíos. Lo que sigue está tomado de Feynman and Computation, editado por

Anthony J. G. Hrey (Perseus, Reading, Ma., 1998), reproducido con permiso. (*N. del e.*)

Él pagó ambos: el primero, menos de un año después, a Bill McLellan, un alumno de Caltech, por un motor en miniatura que satisfacía las especificaciones, pero que supuso cierta decepción para Feynman en cuanto que no requería ningún nuevo avance técnico. Feynman ofreció una versión actualizada de su charla en 1983 en el Jet Propulsory Laboratory. Predijo «que con la tecnología actual podemos fácilmente... construir motores de un cuarentavo de ese tamaño en cada dimensión, 64 000 veces más pequeño que... el motor de McLellan, y podemos fabricar miles de ellos a la vez».

Pasaron otros veintiséis años antes de que él tuviera que pagar el segundo premio, esta vez a un estudiante graduado de Stanford llamado Tom Newman. La escala del reto de Feynman era equivalente a escribir los veinticuatro volúmenes de la *Enciclopedia Británica* en la cabeza de un alfiler: Newman calculó que cada letra tendría una anchura de solo unos cincuenta átomos. Usando litografía de haz electrónico cuando su director de tesis estaba fuera de la ciudad, fue finalmente capaz de escribir la primera página de *Historia de dos ciudades* de Charles Dickens con una reducción de escala de 1/25 000. Se suele reconocer que el artículo de Feynman dio inicio al campo de la nanotecnología, y ahora existen competiciones regulares para un «premio Feynman de nanotecnología».

Capítulo 6

El valor de la ciencia

De entre sus muchos valores, el mayor debe ser la libertad de duda. En Hawái, Feynman aprende una lección de humildad mientras visita un templo budista: «A todo hombre se le da la llave de las puertas del cielo; la misma llave abre las puertas del infierno». Esta es una de las piezas más elocuentes de Feynman, donde reflexiona sobre la relevancia de la ciencia para la experiencia humana y viceversa. También da una lección a sus colegas científicos acerca de su responsabilidad en el futuro de la civilización.

* * * *

De cuando en cuando, la gente me sugiere que los científicos deberían prestar más consideración a los problemas sociales; especialmente que deberían ser más responsables al considerar el impacto de la ciencia en la sociedad. Supongo que esta misma sugerencia se la hacen a muchos otros científicos, y parece que está muy extendida la creencia de que se obtendrían grandes éxitos si los científicos se dedicasen solamente a estos difíciles problemas sociales y no perdieran tanto tiempo engañándose con problemas científicos menos vitales.

Mi impresión es que los científicos pensamos sobre estos problemas de cuando en cuando pero no les dedicamos un esfuerzo continuo, por la sencilla razón de que nosotros sabemos que no tenemos ninguna fórmula mágica para resolver problemas, que los problemas sociales son mucho más difíciles que los científicos y que

normalmente no llegamos a ninguna parte cuando pensamos sobre ellos.

Creo que, cuando considera problemas no científicos, un científico es tan torpe como el vecino de al lado; y cuando habla sobre un tema no científico, suena tan ingenuo como cualquiera que no esté instruido en el tema. Puesto que la cuestión del valor de la ciencia no es un tema científico, esta charla puede servir de ejemplo para demostrar mi tesis.

La primera forma en que la ciencia tiene valor resulta familiar para cualquiera. Se trata de que el conocimiento científico nos permite hacer todo tipo de cosas y construir todo tipo de cosas. Por supuesto, si hacemos cosas buenas no es solo mérito de la ciencia; también es mérito de la elección moral que nos condujo a un buen trabajo. El conocimiento científico es un poder que capacita para hacer cosas buenas o malas, pero no incluye un manual de instrucciones sobre cómo utilizarlo. Semejante poder tiene un valor evidente, incluso si el poder puede ser invalidado por lo que uno hace.

Aprendí una manera de expresar este problema humano común en un viaje a Honolulu. Allí, en un templo budista, el hombre que lo cuidaba explicó algo de la religión budista para los turistas, y luego terminó su charla diciéndoles que él tenía algo que decirles que *nunca* olvidarían, y yo nunca lo he olvidado. Era un proverbio de la religión budista: «A todo hombre se le da la llave de las puertas del cielo; la misma llave abre las puertas del infierno».

¿Cuál es, entonces, el valor de la llave del cielo? Es cierto que si carecemos de instrucciones claras que determinen cuál es la puerta del cielo y cuál es la puerta del infierno, la llave puede ser un objeto peligroso, pero obviamente tiene valor. ¿Cómo podemos entrar en el cielo sin ella?

Además, las instrucciones no tendrían valor sin la llave. Por eso resulta evidente que, pese a que la ciencia podría producir un tremendo horror en el mundo, tiene valor debido a que *puede* producir *algo*.

Otro valor de la ciencia es la diversión o el disfrute intelectual que obtienen algunas personas de leer y aprender y reflexionar sobre ella, y que otras personas obtienen de trabajar en ella. Este es un punto muy real e importante, y algo que no es suficientemente considerado por aquellos que nos dicen que nuestra responsabilidad social está en reflexionar sobre el impacto de la ciencia en la sociedad.

¿Tiene este mero disfrute personal algún valor para la sociedad en conjunto? ¡No! Pero también es una responsabilidad considerar el valor de la propia sociedad. ¿No se trata, en última instancia, de disponer las cosas de modo que la gente pueda disfrutar de ellas? Si es así, el disfrute de la ciencia es tan importante como cualquier otra cosa.

Pero *no* quisiera subestimar el valor de la visión del mundo que es el resultado del esfuerzo científico. Nos hemos visto llevados a imaginar todo tipo de cosas infinitamente más maravillosas que las fantasías de los poetas y los soñadores del pasado. Ello muestra que

la imaginación de la naturaleza es muchísimo mayor que la imaginación del hombre. Por ejemplo, es mucho más notable el hecho de que todos nosotros estemos pegados —la mitad de nosotros boca abajo— por una misteriosa atracción a una bola giratoria que ha estado flotando en el espacio durante miles de millones de años, que ser llevados a lomos de un elefante sustentado en una tortuga que nada en un mar sin fondo.

He pensado sobre estas cosas tantas veces en solitario que espero que me excusen si les recuerdo algunas ideas que estoy seguro que todos ustedes han tenido —o al menos ideas similares— y que nadie pudo siquiera haber tenido en el pasado, porque la gente no tenía entonces la información que tenemos hoy acerca del mundo.

Por ejemplo, estoy en la orilla del mar, solo, y empiezo a pensar. Están las olas que rugen... montañas de moléculas, cada una ocupándose estúpidamente de su propio trabajo... billones por separado... pero formando espuma blanca al unísono.

Época tras época... antes de que cualquier ojo pudiera ver... año tras año... tronando en la costa como ahora. ¿Para quién, para qué...? en un planeta muerto, sin ninguna vida que mantener.

Nunca en reposo... torturado por la energía... desperdiciada prodigiosamente por el sol... derramada en el espacio. Una pulga hace que el mar ruja.

En lo profundo del mar, todas las moléculas repiten las mismas pautas que cualquier otra hasta que se forman nuevas pautas complejas. Ellas construyen otras semejantes a sí mismas... y empieza una nueva danza.

Creciendo en tamaño y complejidad... seres vivos, masas de átomos, ADN, proteínas... en una danza cada vez más complicada.

Desde la cuna a la tierra seca... aquí está de pie... átomos con conciencia... materia con curiosidad.

De pie junto al mar... maravillado ante las maravillas... yo... un universo de átomos... un átomo en el universo

Contenido:

§. La gran aventura

§. La idea notable

§. Educación, para el bien y para el mal

§. Nuestra responsabilidad como científicos

§. La gran aventura

El mismo temor, el mismo respeto y misterio, viene una y otra vez cuando consideramos cualquier problema con profundidad suficiente. Con más conocimiento se hace un misterio más profundo y más maravilloso, que nos seduce para penetrar en él aún más profundamente. Nunca preocupados porque la respuesta pueda mostrarse decepcionante, sino con placer y confianza levantamos cada piedra nueva para encontrar una extrañeza inimaginada que lleva a preguntas y misterios más maravillosos; ¡una gran aventura ciertamente!

Es cierto que pocas personas ajenas a la ciencia tienen este tipo concreto de experiencia religiosa. Nuestros poetas no escriben sobre ello; nuestros artistas no intentan interpretar este hecho notable.

No sé por qué. ¿A nadie le inspira nuestra imagen actual del universo? El valor de la ciencia sigue sin ser cantado por los cantores, así que ustedes se ven reducidos a oír no un canto o un poema, sino una conferencia vespertina sobre ella. Esta no es todavía una edad científica.

Quizá una de las razones es que uno tiene que saber cómo leer la música. Por ejemplo, el artículo científico dice, quizá, algo así: «El contenido en fósforo radiactivo del cerebro de la rata disminuye a la mitad en un periodo de dos semanas». Ahora bien, ¿qué significa eso?

Significa que el fósforo que hay en el cerebro de una rata (y también en el mío, y en el de ustedes) no es el mismo fósforo que había hace dos semanas, sino que todos los átomos que hay en el cerebro están siendo reemplazados, y los que había allí antes se han ido.

De modo que ¿qué es esta mente, qué son estos átomos con consciencia? ¡Patatas de la semana pasada! Eso es lo que ahora puedo *recordar* que sucedía en mi mente hace un año; una mente que ha sido reemplazada hace tiempo.

Esto es lo que se entiende cuando uno descubre cuánto tiempo se necesita para que los átomos del cerebro sean reemplazados por otros átomos, para advertir que lo que yo llamo mi individualidad es solo una pauta o una danza. Los átomos entran en mi cerebro, danza a danza, luego salen; siempre átomos nuevos pero ejecutando siempre la misma danza, recordando cuál era la danza de ayer.

§. La idea notable

Cuando leemos acerca de esto en el periódico, dice: «El científico afirma que este descubrimiento puede tener importancia para la cura del cáncer». El artículo solo está interesado en el uso de la idea, no en la idea misma. Apenas nadie puede entender la importancia de una idea, es así de notable. Solo, posiblemente, algunos niños la captan. Y cuando un niño capta una idea como esa, tenemos un científico. Estas ideas se filtran (a pesar de todo eso que se dice de que la TV reemplaza al pensamiento), y montones de niños adquieren el espíritu, y cuando ellos tienen el espíritu ustedes tienen un científico. Cuando están en nuestras universidades ya es demasiado tarde para que adquieran este espíritu, de modo que debemos intentar explicar estas ideas a los niños.

Me gustaría ahora abordar un tercer valor que tiene la ciencia. Es un poco más indirecto, aunque no mucho. El científico tiene mucha experiencia con la ignorancia, la duda y la incertidumbre, y creo que esta experiencia es de gran importancia. Cuando un científico no conoce la respuesta a un problema, es ignorante. Cuando tiene una intuición sobre cuál es el resultado, él está inseguro. Y cuando está condenadamente seguro de cuál va a ser el resultado, tiene algunas dudas. Hemos descubierto que para progresar tiene una importancia trascendental el reconocer la ignorancia y dejar lugar a la duda. El conocimiento científico es un *corpus* de enunciados de grados de certeza variable: algunos más inseguros, algunos casi seguros, ninguno *absolutamente* cierto.

Ahora bien, nosotros los científicos estamos acostumbrados a esto, y damos por hecho que es perfectamente coherente estar inseguro, que es posible vivir y *no* saber. Pero yo no sé si todo el mundo se da cuenta de que esto es cierto. Nuestra libertad para dudar nació de una lucha contra la autoridad en los primeros días de la ciencia. Fue una lucha muy profunda y muy fuerte. Nos hace preguntarnos —dudar, eso es todo— y no estar seguros. Y creo que es importante que no olvidemos la importancia de esta lucha y con ello perdamos quizá lo que hemos ganado. Aquí hay una responsabilidad hacia la sociedad.

Todos nos entristecemos cuando pensamos en las maravillosas capacidades que parecen tener los seres humanos y las comparamos con sus pequeños logros. Una y otra vez la gente ha pensado que podríamos hacerlo mucho mejor. Quienes vivían en el pasado vieron en la pesadilla de sus tiempos un sueño de futuro. Nosotros, que somos su futuro, vemos que sus sueños, en algunos aspectos superados, han seguido siendo sueños en muchos otros aspectos. Las esperanzas actuales para el futuro son, en buena parte, las mismas que las de ayer.

§. Educación, para el bien y para el mal

En otros tiempos se pensaba que las posibilidades de las personas no se habían desarrollado debido a que la mayoría de estas personas eran ignorantes. Con educación universal, ¿podrían todos los hombres ser Voltaire? El mal puede enseñarse al menos tan

eficazmente como el bien. La educación es una gran fuerza, pero lo es para el bien o para el mal.

Las comunicaciones entre las naciones deben promover el entendimiento: así llegó otro sueño. Pero las máquinas de comunicación pueden ser canalizadas o bloqueadas. Lo que se comunica puede ser verdad o mentira. La comunicación es también una gran fuerza, pero para el bien o para el mal.

Las ciencias aplicadas deberían liberar a los hombres al menos de los problemas materiales. La medicina controla las enfermedades. Y aquí el registro parece ser para bien. Pese a todo hay hombres trabajando pacientemente para crear grandes plagas y venenos. Serán utilizados en las guerras del mañana.

Casi todos desaprueban la guerra. Hoy nuestro sueño es la paz. En la paz, el hombre puede desarrollar mejor las enormes capacidades que parece tener. Pero quizá los hombres del futuro encontrarán que dicha paz puede ser también buena y mala. Quizá los hombres pacíficos se den a la bebida por aburrimiento. Quizá la bebida se convierta entonces en el gran problema que parece apartar al hombre de conseguir todo lo que él piensa que debería sacar de sus capacidades.

Evidentemente, la paz es una gran fuerza, como lo es la sobriedad, como lo son el poder material, la comunicación, la educación, la honestidad y los ideales de muchos soñadores.

Tenemos más fuerzas que controlar que los antiguos. Y quizá lo estemos haciendo un poco mejor que la mayoría de ellos. Pero lo

que deberíamos ser capaces de hacer parece gigantesco si se compara con nuestros confusos logros.

¿A qué se debe esto? ¿Por qué no podemos conquistarnos?

Porque descubrimos que incluso las grandes fuerzas y capacidades no llevan con ellas instrucciones claras sobre cómo utilizarlas. A modo de ejemplo, la gran acumulación de conocimiento acerca del comportamiento del mundo físico solo nos convence de que este comportamiento parece carecer de significado. Las ciencias no enseñan directamente el bien y el mal.

A lo largo de las épocas los hombres han tratado de descifrar el significado de la vida. Han comprendido que si se pudiera dar alguna dirección o significado a nuestras acciones, se liberarían grandes fuerzas humanas. Por eso se han dado muchas respuestas a la pregunta sobre el significado de todas las cosas. Pero las ha habido de todos los tipos diferentes, y los proponentes de una respuesta han mirado con horror las acciones de los creyentes en otra. Horror, porque desde un punto de vista diferente todas las grandes capacidades de la raza estaban siendo dirigidas hacia un callejón sin salida, falso y limitador. De hecho, es gracias a la historia de las enormes monstruosidades creadas por falsas creencias por lo que los filósofos han comprendido las capacidades aparentemente infinitas y maravillosas de los seres humanos. El sueño consiste en encontrar el canal abierto.

¿Cuál es, entonces, el significado de todo? ¿Qué podemos decir para disipar el misterio de la existencia?

Si tenemos en cuenta todas las cosas, no solo lo que sabían los antiguos, sino todo lo que hoy sabemos y que ellos no sabían, entonces creo que debemos admitir francamente que *no sabemos*.

Pero al admitir esto, hemos encontrado probablemente el canal abierto.

Esta no es una idea nueva; esta es la idea de la edad de la razón. Esta es la filosofía que guio a los hombres que construyeron la democracia en la que vivimos. La idea de que nadie sabía realmente cómo dirigir un gobierno condujo a la idea de que deberíamos establecer un sistema por el que nuevas ideas pudieran desarrollarse, intentarse, descartarse, y formar más nuevas ideas; un sistema de ensayo y error. Este método fue un resultado del hecho de que la ciencia ya se estaba mostrando como una aventura exitosa a finales del siglo XVII. Incluso entonces estaba claro para las personas con preocupaciones sociales que la apertura de las posibilidades era una oportunidad, y que la duda y la discusión eran esenciales para avanzar en lo desconocido. Si queremos resolver un problema que nunca antes hemos resuelto, debemos dejar entreabierta la puerta a lo desconocido.

§. Nuestra responsabilidad como científicos

Estamos en los primerísimos comienzos de la raza humana. No es irrazonable que tropecemos con problemas. Hay decenas de miles de años en el futuro. Nuestra responsabilidad es hacer lo que podamos, aprender lo que podamos, mejorar las soluciones y transmitir las. Nuestra responsabilidad es dejar las manos libres a

los hombres del futuro. En la impetuosa juventud de la humanidad podemos cometer grandes errores que puedan bloquear nuestro crecimiento durante mucho tiempo. Esto es lo que haremos si decimos que tenemos ahora las respuestas, tan jóvenes e ignorantes; si eliminamos toda discusión, toda crítica, diciendo: «Eso es, muchachos, ¡el hombre está salvado!», y con esto condenemos al hombre por mucho tiempo a las cadenas de la autoridad, confinado a los límites de nuestra imaginación actual. Así ha ocurrido muchas veces antes.

Nuestra responsabilidad como científicos, sabedores del gran progreso y el gran valor de una filosofía satisfactoria de la ignorancia, del gran progreso que es el fruto de la libertad de pensamiento, está en proclamar el valor de esta libertad, enseñar que la duda no debe ser temida, sino bienvenida y discutida, y exigir esta libertad como nuestro deber para con todas las generaciones venideras.

Capítulo 7

Informe minoritario de Richard P. Feynman en la investigación de la lanzadera espacial Challenger

Cuando la lanzadera espacial Challenger explotó poco después de ser lanzada el 28 de enero de 1986, seis astronautas profesionales y una profesora de enseñanza secundaria encontraron una muerte trágica. La nación quedó destrozada, y la NASA vio quebrantada su autocomplacencia, producto de años de misiones espaciales exitosas, o, al menos, sin víctimas mortales. Se constituyó una comisión, dirigida por el secretario de Estado William P. Rogers y compuesta por políticos, astronautas, militares y un científico, para investigar la causa del accidente y recomendar medidas para impedir que sucediera de nuevo un desastre semejante. Quizá el hecho de que Richard Feynman fuera ese científico haya supuesto que la pregunta de por qué falló la Challenger no haya quedado enterrada en un eterno misterio. Feynman tenía más agallas que la mayoría de los hombres, no temía recorrer todo el país para hablar con los hombres de a pie, los ingenieros que habían reconocido que la propaganda se estaba imponiendo sobre la precaución y la seguridad en el programa de la lanzadera. Su informe, considerado como embarazoso para la NASA, estuvo a punto de ser rechazado por la Comisión, pero Feynman luchó por verlo incluido; fue relegado a un apéndice. Cuando la Comisión convocó una conferencia de prensa en directo para responder a preguntas, Feynman hizo su ahora famoso experimento casero con una de las juntas, o anillos-O, de la lanzadera y un vaso de agua helada. Probó de forma espectacular

que aquellas juntas clave habían fallado debido a que unos gestores ansiosos por impresionar a sus jefes con la puntualidad de sus programas desoyeron la advertencia de los ingenieros que aconsejaban aplazar el lanzamiento. Este es ese informe histórico.

Contenido:

§. Introducción

§. Cohetes de combustible sólido (SRB)

§. Motor de combustible líquido (SSME)

§. Aviónica

§. Conclusiones

§. Introducción

Parece que existen opiniones muy diferentes respecto a la probabilidad de un fallo con pérdida del vehículo y de vidas humanas. Las estimaciones van desde aproximadamente un 1 por 100 hasta un 1 por 100.000. Las cifras más altas proceden de los ingenieros, y las cifras más bajas de la administración. ¿Cuáles son las causas y consecuencias de esta falta de acuerdo? Puesto que un 1 por 100.000 implicaría que se podría lanzar una lanzadera cada día durante trescientos años con la esperanza de perder tan solo una, sería más adecuado preguntar: « ¿Cuál es la causa de esta fantástica fe de la administración en la maquinaria? ».

También hemos encontrado que los criterios de certificación utilizados en los informes de aptitud de vuelo tienden a ser cada vez menos estrictos. El argumento de que el mismo riesgo se corrió

anteriormente sin que hubiera fallos se suele aceptar como argumento en favor de la seguridad de aceptarlo de nuevo. Por esta razón, se aceptan una y otra vez debilidades obvias, a veces sin hacer un intento suficientemente serio para remediarlas, o para retrasar un vuelo debido a su presencia continuada.

Existen varias fuentes de información. Están los criterios de certificación publicados, incluyendo una historia de las modificaciones en forma de exenciones y desviaciones. Además de esto, los registros de los informes de aptitud de vuelo para cada vuelo documentan los argumentos utilizados para aceptar los riesgos del vuelo. Se obtuvo información del testimonio directo y los informes del responsable de seguridad, Louis J. Ullian, respecto a la historia de los éxitos de los cohetes de combustible sólido. Había un estudio adicional debido a él (como presidente del comité de seguridad para el aborto de lanzamiento [LASP]) que trataba de determinar los posibles riesgos de accidentes en intentos de poner en vuelo una fuente de alimentación de plutonio (REG) para futuras misiones planetarias, que producirían contaminación radiactiva. También se dispone del estudio de la NASA sobre la misma cuestión. Para la historia de los motores principales de la lanzadera espacial se mantuvieron entrevistas con la administración y los ingenieros en Marshall, y entrevistas informales con ingenieros en Rocketdyne. También se mantuvo una entrevista informal con un ingeniero mecánico independiente (Caltech) que fue consultor de la NASA sobre motores. Se llevó a cabo una visita a Johnson para recoger información sobre la fiabilidad de la aviónica

(computadores, sensores y efectores). Finalmente existe un informe, «Un examen de las prácticas de certificación potencialmente aplicables a motores de cohetes tripulados reutilizables», preparado en el Jet Propulsion Laboratory por N. Moore *et al.*, en febrero de 1986, por encargo de la Oficina de Vuelos Espaciales en la sede central de la NASA. Trata de los métodos utilizados por la FAA³² y el ejército para certificar sus turbinas de gas y sus motores para cohetes. También estos autores fueron entrevistados de manera informal.

§. Cohetes de combustible sólido (SRB)

Una estimación de la fiabilidad de los cohetes de combustible sólido fue realizada por el responsable de seguridad, estudiando la experiencia de todos los vuelos de cohetes anteriores. De un total de casi 2900 vuelos, 121 fallaron (1 de cada 25). En estos se incluyen, no obstante, los que pueden denominarse errores iniciales, cohetes lanzados en los primeros intentos y en los que se han detectado y corregido errores de diseño. Una cifra más razonable para los cohetes ya experimentados podría ser de 1 cada 50. Con un cuidado especial en la selección e inspección de las piezas, podría lograrse una cifra por debajo de 1 entre 100, aunque un 1 entre 1000 no es probablemente alcanzable con la tecnología actual. (Puesto que hay dos cohetes en la lanzadera, estas tasas de fallo para cohetes deben multiplicarse por dos para obtener las tasas de fallo de la lanzadera

³² FAA = Federal Aviation Agency. Sección del Departamento de Transportes que establece las normas de seguridad de los transportes aéreos. (*N. del t.*)

a partir de las tasas de fallo de los cohetes propulsores de combustible sólido).

Los oficiales de la NASA argumentan que la cifra es mucho más baja. Señalan que las cifras anteriores se refieren a cohetes no tripulados, pero puesto que la lanzadera es un vehículo tripulado, «la probabilidad de éxito de la misión está necesariamente muy próxima a 1,0». No está muy claro lo que quiere decir esta frase. ¿Significa que está próxima a 1 o que debería estar próxima a 1? Su argumento continúa diciendo que: «Históricamente, este grado extraordinariamente alto de éxito ha dado lugar a una diferencia entre las políticas de los programas de vuelos espaciales tripulados y los programas no tripulados; por ejemplo, uso de probabilidad numérica frente a juicio técnico». (Estas citas proceden de *Space Shuttle Data for Planetary Mission RTG Safety Analysis*, páginas 3-1, 3-2, 15 de febrero de 1985, NASA, JSC). Es cierto que si la probabilidad de fallo fuera tan baja como un 1 por 100.000 se necesitaría un desmesurado número de pruebas para determinarla (pues lo único que se obtendría sería una serie de vuelos perfectos de los que no sale una cifra precisa, salvo que la probabilidad es probablemente menor que el número de tales vuelos en la serie). Pero si la probabilidad real no es tan pequeña, los vuelos manifestarían problemas, casi fallos, y posiblemente fallos reales con una estimación razonable. De hecho, en algunas ocasiones la experiencia previa de la NASA ha puesto de manifiesto precisamente estas dificultades, casi accidentes, y accidentes, todos los cuales son advertencias de que la probabilidad de fallo del vuelo no era tan

pequeña. La inconsistencia del argumento para no determinar la fiabilidad a partir de la experiencia histórica, como hizo el responsable de seguridad, está en que la NASA también apela a la historia, cuando empieza diciendo: «Históricamente, este grado extraordinariamente alto de éxito de las misiones...». Finalmente, si vamos a reemplazar la utilización de la probabilidad numérica estándar por un juicio técnico, ¿por qué encontramos una disparidad tan enorme entre la estimación de la administración y el juicio de los ingenieros? Podría parecer que, con algún objetivo, ya fuera para consumo interno o externo, la administración de la NASA exagerara la fiabilidad de su producto hasta extremos fantásticos.

No se reproducirá aquí la historia de la certificación y los informes de aptitud de vuelo. (Véase otro apartado de los informes de la Comisión). Resulta muy evidente el fenómeno de la aceptación de precintos de vuelo que han mostrado erosión y dilatación en vuelos anteriores. El vuelo del *Challenger* es un ejemplo excelente. Hay varias referencias a vuelos que habían tenido lugar antes. La aceptación y éxito de dichos vuelos se toma como evidencia de seguridad. Pero la erosión y la dilatación no son las que el diseño había previsto. Son advertencias de que algo está mal. El equipamiento no está funcionando como se esperaba, y por consiguiente hay un peligro de que pueda funcionar con desviaciones incluso mayores de forma inesperada y no completamente entendida. El hecho de que este peligro no condujera a una catástrofe antes no es garantía de que no vaya a hacerlo la próxima vez, a menos que se haya alcanzado una

completa comprensión del mismo. Cuando se juega a la ruleta rusa, el hecho de que el primer disparo no haya producido daños sirve de poco consuelo para el siguiente. El origen y las consecuencias de la erosión y la dilatación no se entendían. No ocurrieron de la misma forma en todos los vuelos y todas las juntas; a veces eran mayores y a veces eran menores. ¿Por qué no iban a conducir alguna vez a una catástrofe, cuando se dieran ciertas condiciones determinadas?

Pese a estas variantes de un caso a otro, los oficiales se comportaban como si lo entendieran, dándose argumentos aparentemente lógicos unos a otros que con frecuencia se basaban en el «éxito» de vuelos previos. Por ejemplo, para determinar si el lanzamiento del vuelo 51-L³³ era seguro pese a la erosión del anillo en el vuelo 51-C, se hizo notar que la profundidad de erosión era solo de un tercio del radio. En experimentos realizados haciendo cortes en el anillo se había advertido que era necesario un corte con una profundidad de un radio antes de que el anillo fallara. En lugar de preocuparse por la razonable posibilidad de que las variaciones de estas condiciones mal comprendidas pudieran crear esta vez una erosión más profunda, se afirmó que había «un factor de seguridad de tres». Este es un uso extraño del término «factor de seguridad» del ingeniero. Cuando se construye un puente para soportar una cierta carga sin que las vigas se rompan, agrieten o se deformen permanentemente, debe diseñarse de modo que los materiales utilizados soporten realmente tres veces esta carga. Este «factor de seguridad» admite excesos imprevistos de carga, o cargas extra

³³ Este era el vuelo en el que se produjo el accidente. (*N. del t.*)

desconocidas, o una debilidad en los materiales que podrían tener fallos inesperados, etc. Si en estas condiciones se somete el nuevo puente a la carga esperada y aparece una grieta en una viga, esto indica un fallo del diseño. No había factor de seguridad en absoluto; incluso aunque el puente no se venga abajo realmente porque la grieta solo ha llegado a un tercio del grosor de la viga. Los anillos-O de los cohetes propulsores de combustible sólido no estaban diseñados para desgastarse. La erosión era una clave de que algo iba mal. La erosión no era algo a partir de lo cual pudiera inferirse la seguridad.

Sin una comprensión completa, no se podía confiar en que las condiciones del vuelo siguiente no fueran a producir una erosión tres veces más grave que en la ocasión anterior. En cualquier caso, los oficiales se engañaron al pensar que tenían esta comprensión y confianza, pese a las variaciones peculiares de un caso a otro. Se hizo un modelo matemático para calcular la erosión. Era un modelo que no se basaba en los conocimientos físicos, sino en un ajuste a una curva empírica. Más concretamente, se suponía que un chorro de gas caliente incidía sobre el material del anillo-O, y se determinaba la temperatura en el punto de remanso (hasta aquí, con leyes termodinámicas y físicas razonables). Pero para determinar cuánto caucho se erosionaba se suponía que esto dependía solo de dicha temperatura a través de una fórmula sugerida por datos tomados de un material similar. Una representación logarítmica sugería una línea recta, de modo que se supuso que la erosión variaba como la potencia 0,58 de la

temperatura, siendo determinado este 0,58 por ajuste. En cualquier caso, ajustando algunos otros números, se determinó que el modelo daba cuenta de la erosión (hasta una profundidad de un tercio del radio del anillo). ¡No hay nada más erróneo aquí que creerse la respuesta! En todos los lugares aparecen incertidumbres. La intensidad del chorro de gas era impredecible, pues dependía de agujeros formados en la masa. La dilatación mostraba que el anillo podría fallar incluso si no se erosionaba completamente, sino solo parcialmente. Se sabía que la fórmula empírica era imprecisa, pues no pasaba directamente por los mismos puntos que sirvieron para determinarla. Había una nube de puntos bastante por encima, y otra bastante por debajo de la curva ajustada, de modo que era razonable predecir erosiones importantes por esta sola razón. Incertidumbres similares afectaban a las otras constantes que aparecían en la fórmula, etc., etc. Cuando se usa un modelo matemático, debe prestarse una cuidadosa atención a las incertidumbres del modelo.

§. Motor de combustible líquido (SSME)

Durante el vuelo 51-L los tres motores principales de la lanzadera espacial funcionaron perfectamente, incluso si, en el último momento, empezaron a apagarse los motores cuando el suministro de combustible empezó a fallar. Sin embargo, surge la pregunta acerca de si, de haber fallado y haber investigado con tanto detalle como lo hicimos con el cohete propulsor de combustible sólido, habríamos encontrado una similar falta de atención a los fallos y

una fiabilidad en entredicho. En otras palabras, los fallos de organización que contribuyeron al accidente ¿se limitaban al sector del cohete propulsor de combustible sólido o eran una característica más general de la NASA? Con ese fin se investigaron los motores principales de la lanzadera espacial y la aviónica. No se hizo ningún estudio similar del vehículo orbital ni del tanque externo.

El motor es una estructura mucho más complicada que el cohete propulsor de combustible sólido, y en él interviene una ingeniería mucho más detallada. En general, la ingeniería parece ser de alta calidad y aparentemente se presta una considerable atención a las deficiencias y los defectos encontrados en el funcionamiento.

La manera usual de diseñar tales motores (para aviones militares o civiles) puede denominarse el sistema de componentes, o diseño de abajo arriba. En primer lugar, es necesario entender completamente las propiedades y limitaciones de los materiales que se van a utilizar (para aletas de turbina, por ejemplo), y se han iniciado test en bancos experimentales para determinarlos. Con este conocimiento se diseñan y ponen a prueba por separado piezas componentes mayores (tales como engranajes). A medida que se advierten deficiencias y errores de diseño, estos son corregidos y verificados con pruebas adicionales. Puesto que solo se prueban piezas de una en una, estas pruebas y modificaciones no son muy caras. Finalmente se construye el diseño final y el motor completo, con las especificaciones necesarias. Para entonces, hay una buena probabilidad de que la máquina tenga éxito en general, o que cualquier posible fallo sea fácilmente aislado y analizado porque los

modos de fallo, limitaciones de materiales, etc., se entienden muy bien. Hay una buena probabilidad de que las modificaciones para que el motor supere las últimas dificultades no sean muy difíciles de hacer, pues la mayor parte de los problemas graves ya han sido descubiertos y tratados antes en las primeras y menos caras etapas del proceso.

El motor principal de la lanzadera fue tratado de una forma diferente: de arriba abajo, podríamos decir. El motor fue diseñado y ensamblado de una vez con relativamente pocos estudios preliminares y detallados del material y los componentes. En este caso, cuando se encuentran problemas en los engranajes, las aletas de las turbinas, los conductos refrigerantes, etc., es más caro y difícil descubrir las causas y hacer cambios. Por ejemplo, se han encontrado grietas en las aletas de las turbinas de la turbo-bomba de oxígeno a alta presión. ¿Son debidas a fallos en el material, al efecto de la atmósfera de oxígeno sobre las propiedades del material, a las tensiones térmicas de arranque o desconexión, a la vibración y las tensiones de funcionamiento estacionario, o son debidas fundamentalmente a alguna resonancia a ciertas velocidades, etc.? ¿Cuánto tiempo podemos funcionar desde el inicio de una grieta hasta la rotura, y cómo depende esto del nivel de potencia? Usar el motor entero como un banco de prueba para resolver estas cuestiones es extraordinariamente caro. Nadie quiere perder motores enteros para descubrir dónde y cómo ocurren los fallos. Pese a todo, un conocimiento preciso de esta información es

esencial para adquirir confianza en la fiabilidad del motor en uso. Sin una comprensión detallada, no puede llegarse a esta confianza. Una desventaja adicional del método de arriba abajo es que, si se alcanza a comprender un defecto, una simple modificación, tal como una forma nueva para la carcasa de la turbina, puede ser imposible de implementar sin rediseñar completamente el motor.

El motor principal de la lanzadera espacial es una máquina muy notable. Tiene una razón de propulsión a peso mayor que cualquier motor anterior. Está construido en el límite de, o fuera de, cualquier experiencia previa en ingeniería. Por consiguiente, y tal como se esperaba, se han manifestado muchos tipos diferentes de defectos y dificultades. Puesto que, por desgracia, estaba construido al modo de arriba abajo, estos son difíciles de localizar. El objetivo de una vida media de 55 disparos equivalentes (27 000 segundos de operación, bien en una misión de 500 segundos, o en un ensayo) con el que fue diseñado, no ha sido alcanzado. El motor requiere ahora mantenimiento y reemplazamiento muy frecuente de piezas importantes, tales como turbo-bombas, placas metálicas para blindaje, etc. La turbo-bomba de combustible a alta presión tuvo que ser reemplazada cada tres o cuatro misiones equivalentes (aunque eso quizá se haya corregido ahora) y la turbo-bomba de oxígeno a alta presión cada cinco o seis. Esto es como mucho un 10 por 100 de la especificación original. Pero lo que más nos interesa aquí es la determinación de la fiabilidad.

En un total de unos 250.000 segundos de funcionamiento, las máquinas han fallado seriamente quizá 16 veces. La ingeniería

presta mucha atención a estos fallos y trata de remediarlos lo más rápidamente posible. Esto se hace mediante estudios de prueba sobre bancos especiales diseñados experimentalmente para el fallo en cuestión, mediante inspección cuidadosa del motor en busca de claves reveladoras (tales como grietas), y mediante unos estudios y análisis considerables. De esta forma, pese a las dificultades del diseño de arriba abajo, muchos problemas han sido aparentemente resueltos con arduo trabajo.

A continuación se da una lista de algunos de los problemas. Los que están seguidos por un (*) están probablemente resueltos:

- Grietas en las aletas de la turbina en las turbo-bombas de combustible a alta presión (HPFTP). (Quizá han sido resueltas).
- Grietas en las aletas de la turbina en turbo-bombas de oxígeno a alta presión (HPOTP).
- Ruptura de línea en el Sistema de Encendido Ampliado (ASI).*
- Fallo en la válvula de purgado.*
- Erosión en la cámara ASI.*
- Fractura en la placa metálica de la turbina HPFTP.
- Fallo en el conducto refrigerante HPFTP.*
- Fallo en el codo de la salida de la cámara de combustión principal.*
- Fallo en el codo de entrada en la cámara de combustión principal.*
- Torbellino subsíncrono HPOTP.*
- Sistema de corte de seguridad de aceleración de vuelo (fallo parcial en un sistema redundante).*

- Desprendimientos en el engranaje (parcialmente resuelto).
- Una vibración a 4000 hercios que hace inoperantes algunos motores, etc.

Muchos de estos problemas resueltos eran las dificultades iniciales de un nuevo diseño, pues 13 de ellos ocurrieron en los primeros 125.000 segundos y solo tres en los siguientes 125.000 segundos. Naturalmente, nunca se puede estar seguro de que se hayan eliminado todos los problemas y, para algunos de ellos, quizá la corrección no haya abordado la verdadera causa. Así pues, no es irrazonable conjeturar que pueda haber al menos una sorpresa en los próximos 250.000 segundos, con una probabilidad de $1/500$ por motor y por misión. En una misión hay tres motores, pero algunos accidentes estarían posiblemente controlados y solo afectan a un motor. El sistema puede abortar con solo dos motores. Por consiguiente, digamos que las sorpresas desconocidas no nos permiten conjeturar, ni siquiera respecto de sí mismas, que la probabilidad de un fallo en la misión debido al motor principal de la lanzadera espacial es menor que $1/500$. A esto debemos sumar la probabilidad de fallo debido a problemas conocidos pero aún no resueltos (aquellos sin asterisco en la lista anterior). Los discutiremos más abajo. (Los ingenieros en Rocketbyne, el fabricante, estiman la probabilidad total en $1/10.000$. Los ingenieros de Marshall la estiman en $1/300$, mientras que la administración de la NASA, a quien informan estos ingenieros,

afirma que es 1/100.000. Un ingeniero independiente consultado por la NASA piensa que 1 o 2 por 100 es una estimación razonable). La historia de los principios de certificación para estos motores es confusa y difícil de explicar. Inicialmente parecía existir la regla de que, para certificar un tiempo de funcionamiento del motor, cada uno de los motores de un par tomado como muestra debe haber funcionado sin fallos durante un tiempo doble al que se va a certificar (regla de 2x). Al menos esa es la práctica de la FAA, y la NASA parece haberla adoptado, confiando originalmente en que el tiempo certificado fuera de 10 misiones (y, por consiguiente, de 20 misiones para cada muestra). Obviamente, los mejores motores para utilizar serían, por comparación, aquellos con un tiempo de funcionamiento total (vuelo más prueba) máximo: los denominados «líderes de flota». Pero ¿qué pasa si una tercera muestra y otras varias fallan en un corto tiempo? Ciertamente, el hecho de que dos de ellos tuvieran una duración anormalmente alta no nos ofrecería mucha seguridad. El tiempo corto podría ser más representativo de las posibilidades reales y, en la idea de un factor de seguridad de 2, deberíamos actuar la mitad del tiempo de las muestras de corta vida.

Este lento deslizamiento hacia un factor de seguridad cada vez menor puede verse en muchos ejemplos. Tomemos el de las aletas de la turbina HPFTP. En primer lugar, la idea de poner a prueba un motor entero fue abandonada. En cada motor se han reemplazado muchas piezas importantes (como las propias turbo-bombas) a intervalos frecuentes, de modo que la regla debe ser trasladada de

los motores a los componentes. Aceptamos un tiempo de certificación para un HPFTP si cada una de dos muestras aleatorias ha funcionado con éxito durante el doble de ese tiempo (y por supuesto, como cuestión práctica, sin insistir ya en que este tiempo sea tan grande como 10 misiones). Pero ¿qué es «con éxito»? Cuando se trata de ofrecer en la práctica un factor de seguridad mayor que 2, la FAA considera como fallo una grieta en la aleta de una turbina. Un motor puede funcionar durante un cierto tiempo desde el instante en que se inicia una grieta hasta que se ha hecho suficientemente grande para provocar una fractura. (La FAA está considerando nuevas reglas que tomen en cuenta este tiempo de seguridad extra, pero solo si se analiza con mucho cuidado con modelos conocidos dentro de un rango de experiencia conocido y con materiales completamente verificados. Ninguna de estas condiciones se aplica al motor principal de la lanzadera espacial).

Se encontraron grietas en muchas aletas de turbina de HPFTP en la segunda etapa. En un caso se encontraron tres al cabo de 1900 segundos, mientras que en otro caso no se encontró ninguna al cabo de 4200 segundos, aunque normalmente estos ensayos más largos mostraban grietas. Para seguir con esta historia tendremos que darnos cuenta de que la tensión depende mucho del nivel de potencia. El vuelo del *Challenger* iba a producirse, y ya se habían realizado vuelos previos, con los motores funcionando durante la mayor parte del tiempo a un nivel de potencia llamado 104 por 100 del nivel de potencia tasado. A juzgar por algunos datos materiales se supone que, al nivel 104 por 100 de nivel de potencia tasado, el

tiempo para la producción de grietas es aproximadamente el doble que al 109 por 100 o nivel de potencia total (FPL). Estaba previsto realizar futuros vuelos a este nivel debido a que debían llevar cargas más pesadas, y se hicieron muchas pruebas a dicho nivel. Por consiguiente, al dividir el tiempo del 104 por 100 por 2 obtenemos unidades llamadas equivalente de nivel de potencia completa (EFPL). (Obviamente, esto introduce cierta incertidumbre, pero no ha sido estudiada). Las primeras grietas mencionadas más arriba ocurrieron a 1375 EFPL.

Ahora la regla de certificación se convierte en «limitar todas las aletas de la segunda fase a un máximo de 1375 segundos EFPL». Si uno objeta que se ha perdido el factor de seguridad de 2, se le señala que la turbina actuó durante 3800 segundos EFPL sin grietas, y la mitad de esto es 1900, de modo que estamos siendo más conservadores. Nos hemos engañado de tres maneras. En primer lugar, tenemos solo una muestra, y no es la líder de flota, pues en las otras dos muestras de 3800 segundos se detectaron en conjunto 17 aletas con grietas. (Hay 59 aletas en el motor). En segundo lugar, hemos abandonado la regla 2x y hemos sustituido el tiempo doble por un tiempo igual. Y finalmente, 1375 segundos es el tiempo que había transcurrido cuando detectamos una grieta. Podemos decir que no se había detectado ninguna grieta por debajo de 1375, pero la última vez que miramos y no vimos grietas era al cabo de 1100 segundos EFPL. No sabemos en qué momento se formó la grieta entre estos instantes; por ejemplo, pueden haberse formado grietas a 1150 segundos EFPL. (Aproximadamente 2/3 de

los conjuntos de aletas probadas con más de 1375 segundos EFPL tenían grietas. De hecho, algunos experimentos recientes muestran grietas ya a los 1150 segundos). Era importante mantener alto el número, pues el *Challenger* iba a utilizar un motor muy próximo al límite para el instante en que el vuelo terminase.

Finalmente, se afirma que los criterios no se han abandonado, y que el sistema es seguro, abandonando así el convenio de la FAA según el cual no debería haber grietas y considerando como fallo solo una aleta completamente fracturada. Con esta definición, ningún motor ha fallado todavía. La idea es que, puesto que hay un margen de tiempo suficiente para que una grieta crezca hasta fracturarse, podemos garantizar que todo es seguro inspeccionando todas las aletas en busca de grietas. Si se encuentran, las reemplazamos, y si no se encuentra ninguna tenemos tiempo suficiente para una misión segura. De esta forma, el problema de la grieta deja de ser un problema de seguridad de vuelo y se convierte en un mero problema de mantenimiento.

Quizá esto sea realmente cierto. Pero ¿hasta qué punto sabemos que las grietas siempre crecen con lentitud suficiente para que no pueda producirse ninguna fractura en una misión? Tres motores han funcionado durante tiempos largos (aproximadamente 3000 segundos EFPL) con unas pocas aletas agrietadas y sin que se rompan aletas.

Pero quizá se haya encontrado una corrección para este agrietamiento. Cambiando la forma de la aleta, redondeando la

superficie, y cubriéndola con aislante para excluir un choque térmico, las aletas no se han agrietado hasta ahora.

Algo muy similar aparece en la historia de la certificación de la HPOTP, pero no daremos aquí los detalles.

Es evidente, en resumen, que los informes de aptitud de vuelo y las reglas de certificación muestran un agravamiento de algunos de los problemas del motor principal de la lanzadera espacial que guarda una estrecha analogía con el deterioro visto en las reglas para el cohete propulsor de combustible sólido.

§. Aviónica

Por «aviónica» se entiende el sistema cibernético del vehículo orbital tanto como sus sensores de entrada y efectores de salida. En primer lugar, nos restringiremos a los ordenadores propiamente dichos y no nos interesaremos en la fiabilidad de la información de entrada procedente de los sensores de temperatura, presión, etc., o de si la señal de salida del ordenador es o no seguida fielmente por los efectores de disparos de cohetes, controles mecánicos, pantallas de los astronautas, etc.

El programa informático es muy complicado, con más de 250.000 instrucciones. Es responsable, entre muchas otras cosas, del control automático del ascenso completo hasta la órbita, y del descenso hasta bien entrada la atmósfera (por debajo de Mach 1) una vez que se ha presionado un botón que decide el lugar de aterrizaje deseado. Sería posible realizar todo el aterrizaje automáticamente (excepto que la señal de despliegue del tren de

aterrizaje se deja expresamente fuera del control del ordenador y debe ser dada por el piloto, manifiestamente por razones de seguridad), pero semejante aterrizaje completamente automático no es probablemente tan seguro como un aterrizaje controlado por un piloto. Durante el vuelo orbital se utiliza, para el control de las cargas, la presentación de la información a los astronautas y el intercambio de información con la base en tierra. Es evidente que la seguridad del vuelo requiere una precisión garantizada de este complicado sistema de *hardware* y *software* informático.

En resumen, la fiabilidad del *hardware* se garantiza teniendo cuatro sistemas informáticos independientes esencialmente idénticos. Cada sensor posible tiene también múltiples copias, normalmente cuatro, y cada copia alimenta una de las cuatro líneas de ordenador. Si las entradas de los sensores no están de acuerdo, se utiliza como entrada efectiva algún promedio o la selección de la mayoría, según las circunstancias. El algoritmo utilizado por cada uno de los cuatro computadores es exactamente idéntico, de modo que sus entradas (puesto que cada uno de ellos ve una de las copias de los sensores) son las mismas. Por consiguiente, en cada paso los resultados de cada computador deberían ser idénticos. De cuando en cuando se comparan pero, puesto que podrían operar a velocidades ligeramente diferentes, se establece un sistema de parada y espera en instantes especificados antes de hacer cada comparación. Si uno de los computadores no está de acuerdo con los otros, o tarda mucho en tener lista su respuesta, se supone que los tres que coinciden son correctos y el computador discordante se elimina del

sistema. Si ahora falla otro computador, a juzgar por el acuerdo de los otros dos, aquel se excluye del sistema, y el resto del vuelo se cancela y se inicia el descenso hacia el lugar de aterrizaje, controlado por los dos computadores restantes. Se ve que este es un sistema redundante puesto que el fallo de un solo computador no afecta a la misión. Finalmente, y como un aspecto extra en la seguridad, existe un quinto computador independiente, cuya memoria está cargada solo con los programas para ascenso y descenso, y que es capaz de controlar el descenso si hay un fallo de más de dos de los computadores de entre los cuatro principales.

No hay suficiente espacio en la memoria de los computadores principales para todos los programas de ascenso, descenso, y para los programas de la carga en vuelo, de modo que los astronautas tienen que cargar la memoria unas cuatro veces a partir de cintas.

Debido al enorme esfuerzo necesario para reemplazar el *software* de un sistema tan complicado, y para comprobar un nuevo sistema, no se ha hecho ningún cambio en el *hardware* desde que el sistema se estableció hace aproximadamente quince años. El *hardware* actual es obsoleto; por ejemplo, las memorias son del viejo tipo de núcleo de ferrita. Cada vez es más difícil encontrar fabricantes que suministren este tipo de computadores pasados de moda que sean fiables y de alta calidad. Los computadores modernos son mucho más fiables, pueden funcionar con mucha más rapidez y con circuitos más simples, y permiten hacer más cosas; y no se necesitaría cargar la memoria tantas veces pues sus memorias son mucho mayores. El *software* se comprueba con mucho cuidado de

una forma de abajo arriba. Primero se comprueba cada nueva instrucción, y luego se verifican los módulos o secciones de código con una función especial. El alcance se aumenta paso a paso hasta que se incorporan los nuevos cambios en un sistema completo y se pone a prueba. Este *output* completo se considera como producto final, de nueva distribución. Pero de forma totalmente independiente hay un grupo de verificación independiente, que adopta una actitud contraria a la del grupo de desarrollo del *software* y comprueba y verifica el *software* como si fuera el cliente de un producto entregado. Hay otra verificación adicional al usar los nuevos programas en simuladores, etc. Un descubrimiento de un error durante la prueba de verificación se considera muy grave, y su origen se estudia cuidadosamente para evitar tales errores en el futuro. Tales errores inesperados se han encontrado solo seis veces en toda la programación y los cambios de programas (para cargas nuevas o alteradas) que se han hecho. El principio que se sigue es que toda la verificación no es un aspecto de la seguridad del programa, sino que es simplemente un test de dicha seguridad, en una verificación no catastrófica. La seguridad del vuelo debe juzgarse solamente sobre la base de cómo funcionan los programas en las pruebas de verificación. Un fallo aquí genera una preocupación considerable.

Para resumir, la aptitud y el sistema de comprobación de *software* informático son de la máxima calidad. No parece que exista ningún proceso de engaño gradual similar a la degradación de las normas que es tan característica de los sistemas de seguridad del cohete

propulsor de combustible sólido o del motor principal de la lanzadera espacial. Por supuesto, ha habido sugerencias recientes por parte de la administración para reducir estas pruebas complicadas y costosas como innecesarias en este último periodo de la historia de la lanzadera. Hay que resistirse a ello pues esto supone pasar por alto las mutuas influencias sutiles y las fuentes de error generado por cambios incluso menores de una parte del programa por otra. Hay peticiones continuas de cambios cada vez que se sugieren nuevas cargas y nuevas demandas y modificaciones por parte de los usuarios. Los cambios son costosos porque requieren unas pruebas exhaustivas. La forma adecuada de ahorrar dinero es reducir el número de cambios requeridos, y no la calidad de las pruebas para cada uno.

Se podría añadir que este complicado sistema podría mejorarse mucho con técnicas de *hardware* y programación más modernas. Cualquier concurso externo tendría todas las ventajas que supone el empezar de nuevo, y sería oportuno considerar cuidadosamente si esa es o no una buena idea para la NASA.

Finalmente, volviendo a los sensores y efectores de la aviónica, encontramos que la actitud hacia el fallo y la fiabilidad del sistema no es ni mucho menos tan buena como para el sistema informático. Por ejemplo, hubo problemas con ciertos sensores de temperatura que fallaban a veces. Pero dieciocho meses después todavía se estaban utilizando los mismos sensores, aun fallando algunas veces, hasta que un lanzamiento tuvo que ser suspendido porque dos de ellos fallaron al mismo tiempo. Incluso en un vuelo posterior

fue utilizado de nuevo este sensor poco fiable. Una vez más, los sistemas de control de reacción, los chorros del cohete utilizados para reorientación y control en vuelo, siguen siendo poco fiables. Hay una redundancia considerable, pero también una larga historia de fallos, ninguno de los cuales ha sido todavía suficientemente extenso para afectar seriamente a un vuelo. La acción de los chorros se comprueba mediante sensores, y si estos dejan de dispararse los computadores deciden que se dispare otro chorro. Pero el hecho es que no están diseñados para fallar, y el problema debería ser resuelto.

§. Conclusiones

Cuando se quiere mantener un programa razonable de lanzamientos, sucede a veces que la ingeniería no puede desarrollarse a un ritmo suficientemente rápido para mantener las expectativas de los criterios de certificación originalmente conservadores diseñados para garantizar un vehículo muy seguro. En estas situaciones, de forma sutil, y a menudo con argumentos aparentemente lógicos, se alteran los criterios de modo que los vuelos puedan seguir siendo certificados a tiempo. Por consiguiente, se realizan vuelos en condiciones relativamente poco seguras, con una probabilidad de fallo del orden de un 1 por 100 (es difícil ser más preciso).

La administración oficial, por el contrario, afirma creer que la probabilidad de fallo es mil veces menor. Una razón para esto puede ser un intento de garantizar al gobierno de la NASA la perfección y

el éxito, y asegurar la financiación. La otra puede ser que crean sinceramente que es verdad, lo que demuestra una casi increíble falta de comunicación entre ellos mismos y sus ingenieros.

En cualquier caso, esto ha tenido consecuencias muy desafortunadas, la más seria de las cuales es animar a ciudadanos normales a volar en una máquina tan peligrosa, como si esta hubiera alcanzado la seguridad de un avión ordinario. Los astronautas, como los pilotos de pruebas, deberían conocer sus riesgos, y nosotros los admiramos por su valor. ¿Quién puede dudar que McAuliffe³⁴ era igualmente una persona de gran valor, que estaba más próxima a un conocimiento del verdadero riesgo que el que la administración de la NASA nos haría creer?

Hagamos recomendaciones para asegurar que los empleados de la NASA trabajan en un mundo de realidades cuando buscan una comprensión suficientemente buena de las debilidades e imperfecciones tecnológicas para tratar activamente de eliminarlas. Deben vivir en la realidad al comparar los costes y la utilidad de la lanzadera con otros métodos de ir al espacio. Y deben ser realistas al hacer contratos, al estimar los costes y la dificultad de los proyectos. Solo deberían proponerse programas de vuelo realistas, programas que tengan una posibilidad razonable de ser llevados a cabo. Si así planteados el gobierno no los apoyara, entonces así sea. La NASA debe ser franca, honesta e informativa con los ciudadanos a quienes pide apoyo, de modo que estos ciudadanos puedan tomar las decisiones más sabias para el uso de sus recursos limitados.

³⁴ Sharon Christa McAuliffe era la profesora que murió en el accidente. Su misión era realizar experimentos en condiciones de microgravedad con fines educativos. (*N. del t.*)

Para una tecnología exitosa, la realidad debe tener preferencia sobre las relaciones públicas, pues la naturaleza no puede ser engañada.

Capítulo 8

¿Qué es la ciencia?

¿Qué es la ciencia? ¡Es sentido común! ¿O no lo es? En abril de 1966 el maestro de profesores pronunció un discurso ante la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias en el que dio a sus colegas profesores lecciones de cómo enseñar a sus estudiantes a pensar como científicos y a ver el mundo sin prejuicios, con curiosidad y, sobre todo, duda. Esta charla es también un tributo a la enorme influencia que tuvo el padre de Feynman —un viajante de uniformes— sobre la forma de mirar el mundo de Feynman.

Agradezco a Mr. DeRose la oportunidad que me brinda de unirme a ustedes, profesores de ciencias. Yo también soy un profesor de ciencias. Tengo demasiada experiencia en enseñar a estudiantes licenciados en física, y como resultado de dicha experiencia sé que no sé cómo enseñar.

Estoy seguro de que ustedes, que son auténticos profesores que trabajan en el nivel inferior de esta jerarquía de profesores, instructores de profesores y expertos en currículos, también están seguros de que tampoco saben cómo hacerlo; de lo contrario no se habrían molestado en venir a la convención.

El tema « ¿Qué es la ciencia?» no lo escogí yo. Fue Mr. DeRose quien lo propuso. Pero me gustaría decir que, en mi opinión, « ¿Qué es la ciencia?» no es en absoluto equivalente a «cómo enseñar ciencia», y debo llamar su atención sobre esto por dos razones. En primer lugar, por la forma en que me estoy preparando para dar esta

conferencia puede parecer que estoy tratando de decirles cómo enseñar ciencia; pero no va a ser así en absoluto, porque no sé nada sobre niños pequeños. Tengo uno, y por eso sé que no sé. La otra razón es que creo que la mayoría de ustedes (dado que hay tantas charlas y tantos artículos y tantos expertos en este campo) tienen cierta sensación de falta de autoconfianza. En cierto modo, a ustedes siempre les están diciendo que las cosas no van demasiado bien y que deberían aprender a enseñar mejor. Yo no voy a reprenderles por las cosas malas que están ustedes haciendo ni voy a indicarles cómo pueden ser mejoradas; no es esa mi intención. Como cuestión de hecho, los estudiantes que hoy ingresan en Caltech son muy buenos, y encontramos que van mejorando con los años. Ahora bien, yo no sé cómo se ha hecho. Me pregunto si ustedes lo saben. Yo no quiero interferir con el sistema; es muy bueno.

Hace tan solo dos días tuvimos una reunión en la que decidimos que ya no es necesario impartir un curso de mecánica cuántica elemental en los estudios de doctorado. Cuando yo era estudiante, ni siquiera había un curso de mecánica cuántica en el doctorado porque se consideraba un tema demasiado difícil. Cuando empecé a dar clases por primera vez, teníamos uno. Ahora la enseñamos a los estudiantes de licenciatura. Descubrimos ahora que no es necesario tener cursos de mecánica cuántica elemental para licenciados de otras facultades. ¿Por qué estamos apretando? Porque somos capaces de enseñar mejor en la universidad, y eso se debe a que los estudiantes que ingresan están mejor preparados.

¿Qué es la ciencia? Por supuesto, todos ustedes lo saben si la enseñan. Eso es sentido común. ¿Qué puedo decir yo? Si ustedes no lo saben, el manual del profesor que acompaña a todo libro de texto ofrece una explicación completa del tema. Es una especie de destilación distorsionada, descafeinada y tergiversada de palabras de Francis Bacon de hace algunos siglos, palabras que entonces se suponía que eran la filosofía profunda de la ciencia. Pero uno de los mayores científicos experimentales de la época, y que realmente estaba haciendo algo, William Harvey³⁵, dijo que lo que Bacon decía que era la ciencia era la ciencia que haría un lord canciller. Él hablaba de hacer observaciones, pero omitía el factor vital del criterio acerca de qué observar y a qué prestar atención.

Y por eso, la ciencia no es lo que los filósofos han dicho que es, ni, por supuesto, lo que dicen que es los manuales de los profesores. Lo que realmente es, es un problema que yo me planteé a mí mismo una vez que acepté dar esta charla.

Al cabo de algún tiempo recordé un pequeño poema:

*Un ciempiés estaba muy feliz,
hasta que un sapo le dijo en broma:
Dime, ¿qué pata viene detrás de qué otra?».
Esto le hizo dudar a tal extremo
que distraído cayó en una zanja
sin saber cómo andar.*

³⁵ Harvey (1578-1657) descubrió el sistema circulatorio de la sangre. (N. del e.)

He pasado toda mi vida haciendo ciencia y sé lo que hacía, pero ahora me siento incapaz de explicar lo que he venido a contarles — qué pie viene detrás de qué otro— y, además, me preocupa la analogía con el poema y que ya no sea capaz de hacer investigación cuando vuelva a casa.

Varios periodistas han intentado repetidamente conseguir una especie de resumen de esta charla. La preparé hace poco tiempo, así que fue imposible ofrecérselo; pero ahora los veo a todos apresurándose para escribir un titular que dice: «El profesor llamó sapo al presidente de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias».

Dada esta circunstancia de la dificultad del tema y mi antipatía hacia las exposiciones filosóficas, lo presentaré de una forma no muy habitual. Simplemente voy a decirles cómo aprendí yo lo que es la ciencia. Esto es un poco infantil. Yo la aprendí cuando era niño. La he llevado en mi sangre desde el principio. Y me gustaría decirles cómo lo conseguí. Esto suena como si yo estuviera tratando de decirles cómo enseñar, pero no es esa mi intención. Yo voy a decirles lo que es la ciencia tal como yo aprendí lo que es la ciencia. Mi padre me la enseñó. Se cuenta —yo no soy directamente consciente de la conversación— que cuando yo estaba en el vientre de mi madre, mi padre dijo que «si es un niño, será un científico». ¿Cómo lo hizo? Él nunca me dijo que yo tenía que ser un científico. Él no era un científico; era un hombre de negocios, un gerente de ventas de una compañía de uniformes, pero leía acerca de la ciencia y la amaba. Cuando yo era muy joven —es la primera historia que

recuerdo—, cuando todavía comía en una silla alta, mi padre jugaba a un juego conmigo después de cenar. Había comprado todo un lote de viejas baldosas rectangulares del suelo de un baño de alguna casa de Long Island. Las colocábamos en fila, una detrás de otra, y me dejaba empujar la última y observar qué pasaba con el conjunto. Hasta aquí, todo bien.

A continuación, el juego mejoró. Las baldosas eran de colores diferentes. Yo tenía que colocar una blanca, dos azules, una blanca, dos azules, y otra blanca y luego dos azules; tal vez yo quería colocar otra azul, pero tenía que ser una blanca. Ustedes reconocen ya el ingenio engatusador habitual: primero hacer disfrutar con el juego, ¡y luego introducir poco a poco material de valor educativo!

Bien; mi madre, que es una mujer mucho más sensible, empezó a darse cuenta de la insidia de sus esfuerzos y dijo: «Mel, deja al pobre niño que coloque una baldosa azul si quiere hacerlo». Mi padre dijo: «No, yo quiero que preste atención a las pautas. Son las únicas matemáticas que puedo enseñarle a este nivel primitivo». Si yo tuviera que dar una charla sobre ¿qué son las matemáticas?, ya les habría dado la respuesta. Las matemáticas son la búsqueda de pautas. (El hecho es que esta educación tuvo algún efecto. Tuvimos una prueba experimental directa cuando fui al jardín de infancia. En esos días hacíamos entramados. Lo han suprimido; es demasiado difícil para los niños. Acostumbrábamos a entramar papel coloreado en tiras verticales y construir pautas. La profesora del jardín de infancia estaba tan sorprendida que envió una carta especial a casa para informar que este niño era muy poco normal,

porque parecía ser capaz de imaginar por adelantado qué pauta iba a obtener, y construía pautas sorprendentemente complicadas. Así que el juego de las baldosas sí que hizo algo por mí).

Me gustaría presentar otra evidencia de que las matemáticas son solo pautas. Cuando estaba en Cornell, me sentía bastante fascinado por el conjunto de los estudiantes, que para mí consistía en algunas personas razonables diluidas en una gran masa de gente estúpida que estudiaba economía doméstica, etc., incluyendo montones de chicas. Yo solía sentarme en la cafetería con los estudiantes y comía y trataba de oír sus conversaciones para ver si salía alguna palabra inteligente. Pueden ustedes imaginar mi sorpresa cuando descubrí algo tremendo, o así me lo pareció.

Oí una conversación entre dos chicas, y una le estaba explicando a la otra que «si quieres trazar una línea recta, ves, tú tienes que desplazarte cierta cantidad hacia la derecha por cada fila que subes, es decir, si tú te mueves cierta cantidad constante a medida que subes una fila, consigues una línea recta». ¡Un principio profundo de geometría analítica! Seguía. Yo estaba bastante sorprendido. No era consciente de que la mente femenina fuera capaz de entender la geometría analítica.

Ella siguió y dijo: «Supón que tú tienes otra recta que viene del lado contrario y quieres averiguar dónde se van a cortar. Supón que en una recta tú te mueves dos pasos hacia la derecha por cada uno que te mueves hacia arriba, y la otra recta se mueve tres pasos hacia la derecha por cada uno que se mueve hacia arriba, y empiezan a veinte pasos de distancia, etc.». Yo estaba atónito. ¡Ella

descubrió dónde estaba el punto de corte! Resultó que una chica le estaba explicando a la otra la forma de tejer calcetines con diseño de rombos.

Así aprendí una lección: la mente femenina es capaz de entender la geometría analítica. Las personas que durante años han estado insistiendo (frente a cualquier evidencia obvia en sentido contrario) en que el hombre y la mujer son iguales y capaces de pensamiento racional pueden apoyarse en esto. La dificultad puede estar simplemente en que nunca hemos descubierto una forma de comunicar con la mente femenina. Si se hace de la forma correcta, quizá ustedes sean capaces de sacar algo de todo esto.

Ahora seguiré con mi propia experiencia como joven aprendiz en matemáticas.

Otra cosa que me dijo mi padre —y no puedo explicarla por completo, puesto que fue más una sensación que una historia— era que el cociente entre la circunferencia y el diámetro de cualquier círculo era siempre el mismo, fuera cual fuera su tamaño. Eso no me parecía demasiado obvio, pero este cociente tenía alguna propiedad maravillosa. Era un número maravilloso, un número profundo, π . Había un misterio en este número que yo no acababa de entender cuando era joven, pero era algo grande, y el resultado fue que yo buscaba π en todas partes.

Cuando más tarde estaba estudiando en la escuela cómo representar fracciones en forma decimal, y cómo representar $3 \frac{1}{8}$, escribí 3,125; y pensando que reconocía a un amigo escribí que eso

era igual a π , el cociente entre la circunferencia y el diámetro de un círculo. El maestro lo corrigió y puso 3,1416.

Ilustro estas cosas para mostrar una influencia. Lo importante para mí era la idea de que existe un misterio, que hay algo maravilloso acerca de ese número, y no qué valor tenía ese número. Mucho más tarde, cuando estaba haciendo experimentos en el laboratorio — quiero decir en mi propio laboratorio casero—, jugueteando... no, excúsenme, yo no hacía experimentos, nunca los hice; solo jugueteaba. Yo hacía radios y artilugios. Jugueteaba. Poco a poco, con libros y manuales empecé a descubrir que había fórmulas aplicables a la electricidad que relacionaban la corriente y la resistencia, y así sucesivamente. Un día, buscando las fórmulas en algún libro descubrí una fórmula para la frecuencia de un circuito resonante que era $2\pi (LC)^{1/2}$, donde L es la inductancia y C la capacitancia del circuito. Y ahí estaba π , pero ¿dónde estaba el círculo? Ustedes se ríen, pero yo entonces estaba muy serio. π era algo que tenía que ver con círculos, y aquí está π saliendo de un circuito eléctrico, donde [representa] el círculo. ¿Saben ustedes, los que se ríen, de dónde sale π ?

Tengo que amar la cosa. Tengo que buscarla. Tengo que pensar sobre ella. Y entonces me di cuenta, por supuesto, de que las bobinas están hechas en círculos. Aproximadamente medio año más tarde encontré otro libro que daba la inductancia de bobinas redondas y de bobinas cuadradas, y en estas otras fórmulas había otras π . Empecé a pensar de nuevo sobre ello, y me di cuenta de que la π no procedía de las bobinas circulares. Lo entiendo mejor

ahora; pero en el fondo sigo sin saber dónde está ese círculo, de dónde sale esa π . [...]

* * * *

Me gustaría decir una palabra o dos — ¿puedo interrumpir mi pequeña historia?— sobre las palabras y las definiciones, porque es necesario aprender las palabras. Eso no es ciencia; lo que no quiere decir que solo porque no sea ciencia no tengamos que enseñar las palabras. No estamos hablando de qué hay que enseñar; estamos hablando de qué es la ciencia. No es ciencia saber cómo se pasa de grados centígrados a Fahrenheit. Es necesario, pero no es exactamente ciencia. En el mismo sentido, si están discutiendo qué es el arte, ustedes no dirían que el conocimiento del hecho de que un lápiz 3-B es más blando que un lápiz 2-B es arte. Hay una clara diferencia. Eso no significa que un profesor de arte no deba enseñarlo, o que un artista se las arregle muy bien si no lo sabe. (Realmente ustedes pueden descubrirlo en un minuto si hacen la prueba; pero eso es una forma científica de explicarlo en la que quizá no piensen los profesores de arte).

Para hablar a los demás tenemos que conocer palabras, y todo eso está bien. Es una buena idea tratar de ver la diferencia, y es una buena idea saber cuándo estamos enseñando las herramientas de la ciencia, tales como las palabras, y cuándo estamos enseñando la propia ciencia.

Para aclarar aún más mi observación, escogeré cierto libro de ciencia para criticarlo desfavorablemente, lo que no es muy justo

porque estoy seguro que con poco esfuerzo puedo encontrar cosas igualmente desfavorables que decir sobre otros libros.

Hay un libro de ciencia de grado elemental que, en la primera lección del primer curso, empieza a enseñar ciencia de una manera poco afortunada, porque parte de una idea falsa de lo que es la ciencia. Hay una imagen de un perro, un perro de juguete con cuerda: una mano le da cuerda y entonces el perro es capaz de moverse. Debajo de la última imagen dice: « ¿Qué le hace moverse?». Más adelante, hay una imagen de un perro real y la pregunta: « ¿Qué le hace moverse?». Luego hay una imagen de una motocicleta y la pregunta: « ¿Qué le hace moverse?», y así sucesivamente.

Al principio pensé que se estaban preparando para decir de qué ciencia se trataba: física, biología, química. Pero no era así. La respuesta estaba en el manual del profesor; la respuesta que yo estaba tratando de aprender es que «la energía le hace moverse».

Ahora bien, la energía es un concepto muy sutil. Es muy, muy difícil de captar. Lo que quiero decir con ello es que no es fácil entender la energía lo suficientemente bien como para utilizarla de forma adecuada, de modo que uno pueda deducir algo correctamente utilizando la idea de energía. Eso está más allá del primer curso. Igualmente se podría decir que «Dios le hace moverse», o «un espíritu le hace moverse», o «la movilidad le hace moverse». (De hecho, está igualmente bien decir «la energía le hace pararse»).

Mirémoslo de esta forma: eso es solo la definición de energía. Debería invertirse. Cuando algo puede moverse podríamos decir que hay energía en ello, pero no que «lo que le hace moverse es la

energía». Esta es una diferencia muy sutil. Sucede lo mismo con este enunciado sobre la inercia. Quizá pueda hacer la diferencia un poco más clara de esta manera:

Si ustedes preguntan a un niño qué es lo que hace moverse al perro de juguete, si ustedes preguntan a un ser humano corriente qué es lo que hace que se mueva un perro de juguete, eso es en lo que ustedes deberían pensar. La respuesta es que ustedes le dieron cuerda; el muelle trata de desenrollarse y empuja los engranajes. Qué buena manera de empezar un curso de ciencia. Desmonten el juguete; vean cómo funciona. Veán la astucia de los engranajes; vean los trinquetes. Aprendan algo sobre el juguete, cómo está compuesto, el ingenio de la gente que concibe los trinquetes y otras cosas. Eso está bien. La pregunta es acertada. Es la respuesta la que no es muy afortunada, porque lo que estaban tratando de hacer es enseñar una definición de energía. Pero con ello no se ha aprendido nada.

Supongamos que un estudiante dijera: «Yo no creo que sea la energía lo que le hace moverse». ¿Adónde nos llevaría la discusión? Finalmente descubrí una forma de comprobar si uno ha enseñado una idea o si solo ha enseñado una definición. Compruébenlo de esta forma: ustedes dicen: «Sin utilizar la nueva palabra que acaban de aprender, traten de expresar de otra manera lo que acaban de aprender en su propio lenguaje». «Sin utilizar la palabra “energía”, díganme lo que saben ahora sobre el movimiento del perro». Ustedes no pueden hacerlo. De modo que no aprendieron nada salvo la definición. No aprendieron nada sobre ciencia. Quizá todo eso sea

correcto. Quizá ustedes no quieran aprender algo sobre ciencia inmediatamente. Tienen que aprender definiciones. Pero para una primera lección, ¿no es eso posiblemente destructivo? Creo que, como lección número uno, aprender una fórmula mística para responder a preguntas es muy malo. El libro contiene algunas otras: «la gravedad le hace caer»; «las suelas de sus zapatos se gastan debido a la fricción». El cuero de los zapatos se gasta debido a que se frota contra la acera y los pequeños cortes y protuberancias de la acera agarran fragmentos y los arrancan. Decir simplemente que es a causa de la fricción es lamentable, porque no es ciencia.

Mi padre trabajaba un poco con la energía y utilizaba el término una vez que yo ya tenía alguna idea sobre ello. Yo sé lo que hubiera hecho él, porque de hecho eso mismo es lo que él hacía (aunque no con el mismo ejemplo del perro de juguete). Si quisiera dar la misma lección, diría: «Se mueve porque el Sol brilla». Y yo diría: «No. ¿Qué tiene eso que ver con el brillo del Sol? Se movió porque yo le di cuerda».

— ¿Y por qué, amigo mío, puedes tú moverte para dar cuerda a este muelle?

—Yo como.

— ¿Qué comes tú, amigo mío?

—Yo como plantas.

— ¿Y cómo crecen las plantas?

—Crecen porque el Sol brilla.

Y lo mismo sucede con el perro. ¿Qué hay de la gasolina? Es energía acumulada del Sol que es captada por las plantas y conservada en

el suelo. Cualquier otro ejemplo termina en el Sol. Y, así, la misma idea acerca del mundo que trata de exponer nuestro libro de texto queda reformulada de una forma muy excitante. Todas las cosas que vemos moverse se mueven porque el Sol brilla. Explica la relación entre una fuente de energía y otra, y puede ser negada por el niño. Este podría decir: «No creo que se deba a que el Sol brilla», y ustedes pueden iniciar así un debate. De modo que hay una diferencia. (Más tarde yo podría desafiarle con las mareas, y con lo que hace que la Tierra gire, y entrar de nuevo en contacto con el misterio).

Este es simplemente un ejemplo de la diferencia entre definiciones (que son necesarias) y ciencia. La única objeción en este caso concreto era que se trataba de la primera lección. Ciertamente debe aparecer más adelante, al explicar qué es la energía, pero no en una pregunta tan simple como « ¿Qué hace que un perro se mueva?». A un niño se le debería dar una respuesta de niño. «Abrámoslo; mirémoslo».

Durante los paseos por el bosque con mi padre yo aprendí mucho. En el caso de los pájaros, por ejemplo; en lugar de nombrarlos, mi padre diría: «Mira, fíjate que el pájaro está siempre picoteando en sus plumas. Picotea mucho en sus plumas. ¿Por qué crees tú que picotea en sus plumas?».

Yo conjeturaba que era porque las plumas estaban alborotadas y el pájaro estaba tratando de ordenarlas. Decía: «Muy bien, ¿cuándo se alborotarán las plumas, o cómo se alborotarán?».

«Cuando vuela. Cuando camina, está bien; pero cuando vuela alborota las plumas». Entonces él decía: «Tú conjeturarías que cuando el pájaro acaba de posarse tendría que picotear más en sus plumas que cuando las hubiera ordenado y hubiera estado caminando un rato por el suelo. Muy bien; veamos».

De modo que mirábamos, y observábamos, y resultaba, por lo que yo podía ver, que el pájaro picoteaba igual y con la misma frecuencia independientemente de cuánto tiempo hubiera estado andando por el suelo, y no solo directamente después del vuelo.

Así que mi conjetura era errónea, y yo no podía conjeturar la razón correcta. Mi padre me reveló la razón.

Se trata de que los pájaros tienen piojos. Hay un poco de escama que sale de la pluma —me enseñó mi padre—, materia que puede comerse, y el piojo se la come. Hay un poco de cera que rezuma entre las articulaciones de la pata, y hay un bichillo que vive allí y que puede comer cera. Ahora el bichillo tiene una fuente tan abundante de alimento que no lo digiere demasiado bien, de modo que el extremo de su trasero produce un líquido que tiene demasiado azúcar, y en dicho azúcar vive una minúscula criatura, etc.

Los hechos no son exactos. El espíritu sí que es exacto. En primer lugar aprendí sobre parasitismo, un animal en otro, y en otro, en otro...

En segundo lugar, él continuaba diciendo que dondequiera que existe cualquier fuente de algo que pueda servir de alimento para que siga la vida, siempre hay alguna forma de vida que encuentra

un modo de utilizar dicha fuente; y que cada trozo de material residual es comido por algo.

La moraleja de esto es que el resultado de la observación, incluso si yo era incapaz de llegar a la conclusión final, era una maravillosa pieza de oro, con un maravilloso resultado. Era algo maravilloso.

Supongamos que se me pidiera que observara, que hiciera una lista, que escribiera, que hiciera esto, que mirara..., y, cuando escribiera mi lista, esta pasaba a ser una más entre otras ciento treinta listas en un cuaderno. Yo aprendería que el resultado de la observación es relativamente inútil, que no se sigue mucho de ello.

Creo que es muy importante —al menos lo fue para mí— que, si van ustedes a enseñar a la gente a hacer observaciones, muestren que algo maravilloso puede salir de ellas. Aprendí entonces de qué trataba la ciencia. Era paciencia. Si ustedes mirasen, y observasen, y prestasen atención, obtendrían una gran recompensa de ello (aunque posiblemente no en todas las ocasiones). Como resultado, cuando me hice un hombre más maduro trabajaba esforzadamente en ciertos problemas, hora tras hora y durante años —a veces muchos años, a veces menos tiempo— *fracasando* en muchos de ellos, y tirando mucho material a la papelera. Pero de cuando en cuando aparecía el oro de ese nuevo conocimiento que yo había aprendido a esperar cuando era niño, el resultado de la observación. Pues nunca se me enseñó que la observación no valía la pena.

Dicho sea de paso, en el bosque aprendimos otras cosas. Seguíamos paseando y veíamos todas las cosas habituales, y hablábamos de muchas cosas: del crecimiento de las plantas, de la lucha de los

árboles en busca de luz, de cómo trataban de subir tan alto como podían y de cómo podían resolver el problema de subir agua a una altura mayor que 10 o 12 metros, de las pequeñas plantas en el suelo que buscaban los débiles rayos de luz que llegaban hasta allí, de todo lo que crecía, y así sucesivamente.

Al día siguiente de haber visto todo esto, mi padre me llevó de nuevo al bosque y dijo: «En todo este tiempo que hemos estado mirando el bosque, solo hemos visto la mitad de lo que sucede, exactamente la mitad».

Yo le pregunté: « ¿Qué quieres decir?».

Él me respondió: «Hemos estado mirando cómo crecen todas estas cosas, pero por cada cantidad de crecimiento debe haber la misma cantidad de descomposición; de lo contrario los materiales quedarían consumidos para siempre. Aquí habría tirados árboles muertos que habrían consumido toda la materia del aire, y del suelo, y esta no volvería al suelo ni al aire, y nada más podría crecer porque no habría material disponible. Por cada fragmento de crecimiento debe haber exactamente la misma cantidad de descomposición».

Siguieron muchas caminatas por el bosque durante las que rompíamos viejas ramas, veíamos bichos divertidos y hongos que crecían; él no podía mostrarme bacterias, pero veíamos sus efectos, y así sucesivamente. Yo veía el bosque como un proceso de reciclaje constante de materiales.

Había muchas cosas de este tipo, muchas descripciones de cosas, expresadas de una forma singular. A menudo empezaba a contar

algo parecido a esto: «Supón que viene un hombre de Marte y se pone a observar el mundo». Es una forma muy buena de considerar el mundo. Por ejemplo, cuando yo estaba jugando con mis trenes eléctricos, él me decía que hay una gran rueda movida por agua que está conectada por hilos de cobre, que se extienden y extienden y extienden en todas direcciones; y luego hay pequeñas ruedas, y todas estas pequeñas ruedas giran cuando gira la gran rueda. La única relación entre ellas es por medio de cobre y hierro, nada más, no hay partes móviles. Tú haces girar aquí una rueda, y giran todas las ruedas pequeñas que hay por todas partes, y tu tren es una de ellas. Era un mundo maravilloso del que me hablaba mi padre. [...]

* * * *

Lo que la ciencia es, pienso yo, quizá sea algo parecido a esto: hubo en este planeta una evolución de la vida hasta la fase en que habían evolucionado animales, que son inteligentes. No quiero decir simplemente seres humanos, sino simplemente animales que juegan y pueden aprender algo por experiencia (como los gatos). Pero en esta fase cada animal tendría que aprender de su propia experiencia. Ellos se desarrollaban poco a poco, hasta que algún animal pudo aprender de la experiencia más rápidamente, y pudo incluso aprender mediante observación de la experiencia de otro; o uno podría mostrar algo al otro, o veía lo que hacía el otro. Así que se dio la oportunidad de que todos pudiesen aprenderlo, pero la transmisión era ineficaz y morían, y quizá el que aprendió murió, también, antes de que pudiese transmitírselo a los otros.

La pregunta es: ¿es posible aprender lo que alguien aprendió por accidente y hacerlo a un ritmo más rápido que el ritmo con que se olvida lo aprendido, bien sea debido a la mala memoria o debido a la muerte de los aprendices o inventores?

Así que quizá llegó un instante en el que, para algunas especies, el ritmo de incremento del aprendizaje alcanzó un punto tal que repentinamente sucedió algo completamente nuevo; las cosas podían ser aprendidas por un animal, transmitidas a otro y a otro, con tanta rapidez que no había pérdidas para la raza. Así se hizo posible una acumulación de conocimiento de la raza.

Esto se ha denominado enlace temporal. No sé quién lo llamó así por primera vez. En cualquier caso, tenemos aquí algunos ejemplos de estos animales, aquí sentados tratando de enlazar una experiencia con otra, cada uno tratando de aprender del otro.

Este fenómeno de tener una memoria de la raza, de tener un conocimiento acumulado transmisible de una generación a otra, era nuevo en el mundo. Pero llevaba dentro una enfermedad. Era posible transmitir ideas erróneas. Era posible transmitir ideas que no eran provechosas para la raza. La raza tiene ideas, pero no son necesariamente provechosas.

Así que llegó un momento en que las ideas, aunque acumuladas muy lentamente, no eran solo acumulaciones de cosas prácticas y útiles, sino grandes acumulaciones de todo tipo de prejuicios y de creencias extrañas y singulares.

Entonces se descubrió una forma de evitar la enfermedad. Esta consiste en poner en duda que lo que se que está transmitido desde

el pasado es realmente verdadero, y tratar de encontrar *ab initio*, de nuevo a partir de la experiencia, cuál es la situación, antes que confiar en la experiencia del pasado tal como se ha transmitido. Y eso es la ciencia: el resultado del descubrimiento de que vale la pena volver a comprobar por nueva experiencia directa, y no confiar necesariamente en la experiencia del pasado. Así lo veo. Esta es mi mejor definición.

Me gustaría recordarles todas las cosas que ustedes conocen muy bien para darles un poco de entusiasmo. En religión, se enseñan lecciones morales, pero no se enseñan solo una vez: ustedes son influidos una y otra vez, yo pienso que es necesario influir una y otra vez, y recordar el valor de la ciencia para los niños, para los adultos y para cualquier otra persona, en varios aspectos. No solo para que se conviertan en mejores ciudadanos, más capaces de controlar la naturaleza y todo eso. Hay otras cosas.

Está el valor de la visión del mundo creada por la ciencia. Está la belleza y la maravilla del mundo que se descubre a través de los resultados de estas nuevas experiencias. Es decir, las maravillas del contenido que acabo de recordarles: que las cosas se mueven porque el Sol brilla, lo que es una idea profunda, muy extraña y maravillosa. (Pese a todo, no todas las cosas se mueven porque el Sol brilla. La Tierra gira independientemente de que el Sol brille, y las reacciones nucleares produjeron recientemente energía en la Tierra, una nueva fuente de energía. Probablemente los volcanes están en general [impulsados] por una fuente diferente del brillo del Sol).

El mundo se ve de forma muy diferente después de aprender ciencia. Por ejemplo, los árboles están hechos de aire, básicamente. Cuando se queman, vuelven al aire, y en él calor llameante se libera el calor llameante del Sol que estaba ligado para convertir el aire en árboles, y en las cenizas está el pequeño remanente de la parte que no procede del aire, y que venía en su lugar de la tierra sólida.

Estas son cosas bellas, y el contenido de la ciencia está maravillosamente lleno de ellas. Son muy inspiradoras, y pueden utilizarse para inspirar a otros.

Otra de las cualidades de la ciencia es que enseña el valor del pensamiento racional, así como la importancia de la libertad de pensamiento; los resultados positivos vienen de poner en duda que las lecciones sean todas verdaderas. En la enseñanza en especial ustedes deben distinguir la propia ciencia de las formas o los procedimientos que se suelen utilizar en el desarrollo de la ciencia. Es fácil decir: «Nosotros escribimos, experimentamos y observamos, y hacemos esto o aquello». Pueden copiar esa forma exactamente. Pero las grandes religiones se diluyen por seguir la forma sin recordar el contenido directo de las enseñanzas de los grandes líderes. Del mismo modo, es posible seguir las formas y llamar a eso ciencia, pero es pseudociencia. De esta manera todos sufrimos el tipo de tiranía que hoy se da en las grandes instituciones que han caído bajo la influencia de consejeros pseudocientíficos.

Por ejemplo, tenemos muchos estudios sobre didáctica en los que la gente hace observaciones y se hacen listas y estadísticas, pero esto no se convierte luego en ciencia establecida, en conocimiento

establecido. Son simplemente una forma imitativa de la ciencia. Es parecido a lo que sucede con los habitantes de las islas de los Mares del Sur, que construyen aeropuertos, torres de radio, todo ello hecho de madera, esperando así que llegue un gran avión. Incluso construyen aviones de madera de la misma forma que los que ven en los aeropuertos de los extranjeros que viven a su alrededor, pero, de forma extraña, esos aviones no vuelan. El resultado de esta imitación pseudocientífica es producir expertos, lo que son muchos de ustedes: expertos. Ustedes, profesores que están realmente enseñando a los niños en el nivel inferior, quizá puedan dudar de los expertos de cuando en cuando. Aprendan de la ciencia que ustedes deben dudar de los expertos. Como cuestión de hecho, yo puedo definir la ciencia también de otro modo: ciencia es la creencia en la ignorancia de los expertos.

Cuando alguien dice que la ciencia enseña tal y tal cosa, está utilizando la palabra incorrectamente. La ciencia no lo enseña; es la experiencia la que lo enseña. Si ellos le dicen que la ciencia ha demostrado tal y tal cosa, ustedes podrían preguntar: « ¿Cómo lo demuestra la ciencia —cómo lo descubrieron los científicos—... cómo, qué, dónde?». La ciencia no lo ha demostrado, sino que es este experimento, este efecto, el que lo ha demostrado. Y, una vez oídos los experimentos (pero debemos oír *toda* la evidencia), usted tiene tanto derecho como cualquier otro a juzgar si se ha llegado a una conclusión reutilizable.

En un campo que es tan complicado que la auténtica ciencia no es aún capaz de llegar a ninguna parte, tenemos que confiar en una

especie de sabiduría pasada de moda, una especie de sencillez definitiva. Estoy tratando de inspirar al profesor en el nivel inferior para que tenga alguna esperanza y alguna autoconfianza en el sentido común y en la inteligencia natural. Los expertos que les están guiando quizá estén equivocados.

Probablemente he arruinado el sistema, y los estudiantes que están ingresando en Caltech ya no serán tan buenos. Creo que vivimos en una era acientífica en la que casi todo el embate de las comunicaciones y los programas de televisión, los libros y demás cosas son acientíficos. Esto no significa que sean malos, sino que son acientíficos. Como resultado, hay mucha tiranía intelectual en nombre de la ciencia. Finalmente, un hombre no puede vivir más allá de la tumba. Cada generación que descubre algo a partir de su experiencia debe transmitirlo, pero debe transmitirlo con un delicado equilibrio entre respeto y falta de respeto, de modo que la raza (ahora que es consciente de la enfermedad a la que está sometida) no imponga sus errores de forma demasiado rígida en su juventud, sino que en efecto transmita la sabiduría acumulada, más la sabiduría que quizá no sea sabiduría.

Es necesario enseñar a aceptar y a rechazar el pasado con una especie de equilibrio que requiere una habilidad considerable. La ciencia es la única de todas las disciplinas que contiene dentro de sí misma la lección del peligro de la creencia en la infalibilidad de los maestros de la generación precedente.

Sigamos así. Gracias.

Capítulo 9

El hombre más inteligente del mundo

He aquí la maravillosa entrevista con Feynman para la revista Omni en 1979. Este es Feynman hablando de lo que más conoce y ama — la física— y lo que menos ama, la filosofía. («Los filósofos deberían aprender a reírse de sí mismos»). Aquí discute Feynman el trabajo que le valió el Premio Nobel, la electrodinámica cuántica (QED); luego pasa a la cosmología, los quarks y esos molestos infinitos que fastidian tantas ecuaciones.

«Pienso que la teoría es simplemente un modo de barrer las dificultades debajo de la alfombra —dijo Richard Feynman—. Por supuesto, no estoy seguro de ello». Suena al tipo de crítica, ritualmente mesurada, que surge de la audiencia cuando en una reunión científica se ha presentado un artículo polémico. Pero Feynman estaba en el podio, pronunciando el discurso de un ganador del Premio Nobel. La teoría que estaba cuestionando, la electrodinámica cuántica, ha sido calificada recientemente como «la más precisa nunca concebida»; sus predicciones son habitualmente verificadas con una precisión de una parte por millón. Cuando Feynman, Julian Schwinger y Sin-Itiro Tomonaga la desarrollaron, independientemente, en los años cuarenta, sus colegas la saludaron como «la gran limpieza»: una solución a antiguos problemas y una rigurosa fusión de las dos grandes ideas del siglo en física, la relatividad y la mecánica cuántica.

A lo largo de su carrera, Feynman ha combinado la brillantez teórica y el escepticismo irreverente. En 1942, después de recibir su doctorado en Princeton con John Wheeler, participó en el Proyecto Manhattan. En Los Álamos era un genio de veinticinco años, que no se intimidaba ante los titanes de la física que le rodeaban (Niels Bohr, Enrico Fermi, Hans Bethe) ni por la urgencia y alto secreto del proyecto. El personal de seguridad estaba desconcertado por su facilidad para abrir cajas fuertes; a veces escuchando los minúsculos movimientos del mecanismo del candado, a veces conjeturando qué constante física había utilizado el usuario de la caja como combinación. (Feynman no ha cambiado desde entonces; muchos de sus estudiantes en Caltech han aprendido, además de su física, habilidades para desvalijar cajas).

Después de la guerra, Feynman trabajó en la Universidad de Cornell. Allí, como cuenta en esta entrevista, Bethe fue el catalizador de sus ideas sobre la solución del «problema de los infinitos». Los niveles exactos de energía de los electrones en los átomos de hidrógeno, y las fuerzas entre los electrones (que se mueven a tal velocidad que había que tener en cuenta los efectos relativistas), habían sido ya objeto de trabajos pioneros durante tres décadas. Todo electrón, afirmaba la teoría, estaba rodeado por «partículas virtuales» transitorias conjuradas del vacío por la masa-energía del primero; a su vez, estas partículas conjuraban a otras, y el resultado era una cascada matemática que predecía una carga infinita para cada electrón. Tomonaga había sugerido en 1943 una forma de evitar el problema, y sus ideas se hicieron conocidas

precisamente cuando Feynman en Cornell y Schwinger en Harvard estaban dando el mismo paso crucial. Los tres compartieron el Premio Nobel de Física en 1965. Para entonces, las herramientas matemáticas de Feynman, las «integrales de Feynman», y los diagramas que había ideado para describir las interacciones entre partículas eran parte del equipamiento de cualquier físico teórico. El matemático Stanislaw Ulam, otro veterano de Los Álamos, dice de los diagramas de Feynman que son «una notación que impulsa las ideas en direcciones que pueden mostrarse útiles o incluso novedosas y decisivas». La idea de partículas que viajan hacia atrás en el tiempo, por ejemplo, es un producto de dicha notación.

En 1950 Feynman se trasladó a Caltech, en Pasadena. Todavía conserva el inconfundible acento de un neoyorquino trasplantado, pero el sur de California parece el hábitat adecuado para él: entre las «historias de Feynman» que cuentan sus colegas, su afición por Las Vegas y la vida nocturna en general ocupa un lugar importante. «Mi mujer no podía creer que yo hubiera aceptado realmente una invitación para dar una charla donde tuviera que llevar un esmoquin —dice—. Cambié de opinión un par de veces». En el prefacio a *The Feynman's Lectures of Physics*, ampliamente utilizado como libro de texto desde que fueron recogidas y publicadas en 1963, él aparece con una sonrisa maniaca, tocando un tambor de conga. (Se dice que en los bongos puede dar diez golpes con una mano mientras da once con la otra; inténtenlo y quizá decidan que la electrodinámica cuántica es más fácil).

Entre los otros logros de Feynman está su contribución a la comprensión de las transiciones de fase en el helio super enfriado, y su trabajo con su colega de Caltech Murray Gell-Mann³⁶ sobre la teoría de la desintegración beta de los núcleos atómicos. Ambos temas están aún lejos de la solución final, señala él; de hecho, no duda en calificar a la propia electrodinámica cuántica de «estafa» que deja sin responder cuestiones lógicas importantes. ¿Qué tipo de persona puede hacer un trabajo de este calibre al tiempo que alimenta las dudas más penetrantes? Sigán leyendo y descúbralo.

Para alguien que mire la física de altas energías desde fuera, su objetivo parece estar en encontrar los constituyentes últimos de la materia. Parece una búsqueda que podemos remontar hasta el átomo de los griegos, la partícula «indivisible». Pero con los grandes aceleradores, ustedes obtienen fragmentos que son más masivos que las partículas de partida, y quizá quarks que nunca pueden ser separados. ¿Qué supone eso para la búsqueda?

Yo no pienso que esa sea siempre la búsqueda. Los físicos están tratando de descubrir *cómo se comporta la naturaleza*; quizá hablan descuidadamente acerca de cierta «partícula última» porque así es como se considera la naturaleza en un momento dado, pero... Supongamos que la gente está explorando un nuevo continente, ¿de acuerdo? Ven agua que corre por el suelo, ya han visto eso antes y

³⁶] Gell-Mann (n. 1929) ganó el Premio Nobel de Física en 1969 por sus contribuciones y descubrimientos concernientes a la clasificación de las partículas elementales y sus interacciones. En 1954, Gell-Man y G. Zweig introdujeron el concepto de quarks. (*N. del e.*)

lo llaman «ríos». Así que dicen que están explorando para encontrar las cabeceras, van río arriba, y seguro que ahí están, todo va muy bien. Pero, miren, cuando han remontado suficientemente lejos descubren que el sistema entero es diferente: hay un gran lago, o fuentes, o ríos que corren en círculo. Usted podría decir: « ¡Ajá! Han fallado», pero no es nada de eso. La razón *real* de lo que estaban haciendo era explorar el terreno. Si resultó que no había fuentes, ellos podrían sentirse ligeramente embarazados por su forma descuidada de explicarse, pero nada más. Mientras parezca que la forma en que las cosas están construidas es a base de ruedas dentro de ruedas, entonces uno está buscando la rueda más interna. Pero podría no ser así, ¡en cuyo caso uno está buscando cualquier maldita cosa que uno encuentre!

Pero seguramente ustedes deben tener alguna idea de lo que van a encontrar; ¿tiene que haber cordilleras y valles y cosas así...?

Sí, pero ¿qué pasa si cuando uno llega allí son todo nubes? Uno puede esperar algunas cosas, puede elaborar teoremas sobre la topología de las divisorias del terreno, pero ¿qué pasa si uno encuentra una especie de bruma, tal vez, con cosas que se concentran a partir de ella, sin que haya forma de distinguir la tierra del aire? ¡Toda la idea de partida se ha esfumado! Este es el tipo de cosas excitantes que suceden de vez en cuando. Uno es presuntuoso si dice: «Vamos a encontrar la partícula final, o las leyes del campo unificado» o «el» algo. Si sale algo sorprendente, el

científico disfruta aún más. ¿Piensa usted que él va a decir: « ¡Oh!, no es como yo esperaba, no hay partícula final, no quiero explorarlo»? No, él va a decir: « ¿Qué demonios es eso, entonces?».

¿Ha visto usted que eso suceda?

No supone ninguna diferencia: yo tengo lo que tengo. Uno tampoco puede decir que *siempre* vaya a haber sorpresas; hace algunos años yo era muy escéptico acerca de las teorías gauge³⁷, en parte porque esperaba que las interacciones nucleares fuertes fueran más diferentes de la electrodinámica de lo que ahora parece que son. Yo estaba esperando bruma, y ahora parece que hay cordilleras y valles después de todo.

¿Van a hacerse las teorías físicas más abstractas y matemáticas? ¿Podría darse hoy el caso de un teórico como Faraday a comienzos del siglo XIX, sin mucha formación matemática pero con una poderosísima intuición física?

Diría que hay muchísimas probabilidades en contra. Por una parte, uno necesita las matemáticas simplemente para entender lo que se ha hecho hasta ahora. Aparte de eso, el comportamiento de los sistemas subnucleares es tan extraño comparado con aquellos para cuyo manejo ha evolucionado el cerebro que el análisis *tiene* que ser muy abstracto: para entender el hielo, uno tiene que entender cosas que en sí mismas son muy diferentes del hielo. Los modelos de Faraday eran mecánicos —muelles y cables y bandas tensas en el

³⁷ Teorías en las que los potenciales de interacción pueden neutralizarse multiplicando las funciones de onda que describen a las partículas por una fase local apropiada. (*N. del t.*)

espacio— y sus imágenes estaban tomadas de la geometría básica. Creo que hemos entendido todo lo que podemos desde ese punto de vista; lo que hemos encontrado en este siglo es bastante diferente, bastante oscuro, y hacer más progresos exigirá muchas matemáticas.

¿Limita eso el número de personas que pueden contribuir, o siquiera entender lo que se está haciendo?

Quizá algún otro desarrollará una manera de pensar sobre los problemas de modo que podamos entenderlos más fácilmente. Quizá se enseñen cada vez más pronto. Sabe usted, no es cierto que lo que se denominan matemáticas «abstrusas» sean tan difíciles. Tomemos algo como la programación de un ordenador con la lógica cuidadosa necesaria para ello, el tipo de pensamiento que papá y mamá decían que es solo para profesores. Bien, ahora eso forma parte de un montón de actividades cotidianas, es un modo de vivir; sus hijos están interesados y pegados a un ordenador ¡y están haciendo las cosas más locas y maravillosas!

...¡con anuncios de escuelas de programación en cualquier caja de cerillas!

Cierto. Yo no creo en la idea de que haya unas pocas personas especiales capaces de entender las matemáticas, y que el resto del mundo es normal. Las matemáticas son un descubrimiento humano, y no son más complicadas de lo que los seres humanos pueden entender. Hace tiempo yo tenía un libro de cálculo que

decía: «Lo que un loco puede hacer, puede hacerlo otro». Lo que hemos sido capaces de establecer acerca de la naturaleza puede parecer abstracto y amenazador para alguien que no lo ha estudiado, pero eran locos los que lo hicieron, y en la próxima generación todos los locos lo entenderán.

Hay una tendencia a la pomposidad en todo esto, para hacerlo todo profundo. Mi hijo está siguiendo un curso de filosofía y ayer por la noche estábamos considerando algo de Spinoza... ¡y había el razonamiento más pueril! Estaban todos esos atributos y sustancias, todas estas elucubraciones sin sentido, y nos echamos a reír. Ahora bien, ¿cómo pudimos hacer eso? Aquí está este gran filósofo holandés, y nosotros nos reímos de él. ¡Es porque no tenía ninguna excusa! ¡En esa misma época vivía Newton, Harvey estaba estudiando la circulación de la sangre, había gente con métodos de análisis mediante los que se estaba avanzando! Uno puede tomar cada una de las proposiciones de Spinoza y sus proposiciones contrarias, y mirar el mundo... y no puede decir cuáles son las correctas. Ciertamente, la gente sentía admiración porque él había tenido el valor de abordar estas grandes cuestiones, pero no sirve de nada tener el valor si no se llega a ninguna parte con la cuestión.

En sus lecciones publicadas, los comentarios de los filósofos sobre la ciencia no quedan muy bien parados...

No es la filosofía lo que me molesta, es la pomposidad. Si al menos ellos se hubieran *reído* de sí mismos. Si simplemente hubieran

dicho «yo pienso que es así, pero Von Leipzig pensaba que era asá, y él también dio en la diana». Si hubieran explicado que esta es su mejor conjetura... Pero lo hicieron muy pocos; en su lugar, ellos aceptan sin titubeos la posibilidad de que quizá no haya ninguna partícula fundamental última, y dicen que uno debería dejar de trabajar y sopesarlo con gran profundidad. «No has pensado con profundidad suficiente, déjame primero definir el mundo para ti». Bien, ¡yo voy a investigarlo sin definirlo!

¿Cómo sabe usted qué problema tiene el tamaño adecuado para atacar?

Cuando yo estaba en el instituto tenía esta idea de que uno podía tomar la importancia del problema y multiplicarla por la probabilidad de resolverlo. Usted sabe cómo es un muchacho con mentalidad técnica, le gusta la idea de optimizarlo todo..., en cualquier caso, si uno puede conseguir la combinación correcta de esos factores, no se pasa la vida sin llegar a ninguna parte con un problema, o resolver montones de pequeños problemas que otros podrían hacer igual.

Tomemos el problema que valió el Premio Nobel para usted, Schwinger y Tomonaga. Tres enfoques diferentes: ¿Estaba este problema especialmente maduro para su solución?

Bien, la electrodinámica cuántica había sido inventada a finales de los años veinte por Dirac y otros, inmediatamente después de la propia mecánica cuántica. Ellos la hicieron esencialmente correcta,

pero cuando uno iba a calcular respuestas tropezaba con ecuaciones complicadas que eran muy difíciles de resolver. Uno podía tener una aproximación de primer orden, pero cuando trataba de refinarla con correcciones empezaban a surgir estas cantidades infinitas. Todo el mundo sabía eso durante veinte años; estaba en la contraportada de todos los libros de teoría cuántica.

Entonces tuvimos los resultados de los experimentos de Lamb³⁸ y Rutherford³⁹ sobre los desplazamientos de los niveles de energía del electrón en el átomo de hidrógeno. Hasta entonces, la predicción grosera había sido suficientemente buena, pero ahora uno tenía un número muy preciso: 1060 megaciclos o lo que fuera. Y todo el mundo dijo ¡caray!, este problema tiene que ser resuelto..., ellos sabían que la teoría tenía problemas, pero ahora estaba esta cifra muy precisa.

Así que Hans Bethe tomó esta cifra e hizo algunas estimaciones de cómo se podrían evitar los infinitos restando este efecto de ese otro, de modo que las cantidades que tendieran a infinito se cortasen, y probablemente se detuvieran en este orden de magnitud; y él llegó a algo en torno a los 1000 megaciclos. Recuerdo que él había invitado a un grupo de gente a una fiesta en su casa, en Cornell, pero había recibido una llamada para alguna consulta y tuvo que salir de la ciudad. Llamó durante la fiesta y me dijo que había calculado esto

³⁸ Willis Lamb (n. 1913), ganador del Premio Nobel de Física en 1955 (compartido con Polykarp Kusch) por sus descubrimientos concernientes a la estructura fina del espectro del hidrógeno. (*N. del e.*)

³⁹ Robert R. Rutherford, colaborador de Lamb en los experimentos que sirvieron de base a la moderna electrodinámica cuántica. (*N. del t.*)

en el tren. Cuando volvió dio un seminario sobre ello, y demostró cómo este procedimiento de corte evitaba los infinitos, pero era todavía muy *ad hoc* y confuso. Dijo que sería bueno que alguien pudiera mostrar la forma de limpiarlo. Al día siguiente fui a hablar con él y le dije: « ¡Oh!, eso es fácil, yo puedo hacerlo». Ven, yo había empezado a tener ideas sobre esto cuando estaba en el MIT. Incluso había cocinado entonces una respuesta; por supuesto, falsa. Ven, aquí es donde entramos Schwinger, Tomonaga y yo, para desarrollar una forma de convertir este tipo de procedimientos en análisis sólido; técnicamente, para mantener la invariancia relativista en todo el proceso. Tomonaga había sugerido ya cómo podía hacerse, y en esta misma época Schwinger estaba desarrollando su propia vía.

Así que fui a Bethe con mi forma de hacerlo. Lo divertido era que yo no sabía cómo resolver el problema práctico más sencillo en esta área; debería haberlo aprendido mucho antes, pero había estado ocupado jugando con mi propia teoría, de modo que yo no sabía cómo averiguar si mis ideas funcionaban. Lo hicimos juntos en la pizarra, y salía mal. Incluso peor que antes. Fui a casa y pensé una y otra vez, y decidí que tenía que aprender a resolver ejemplos. Así lo hice, y volví a Bethe y lo intentamos, y funcionó. Nunca hemos sido capaces de descubrir lo que fue mal la primera vez..., algún error estúpido.

¿Cuánto le dedicó a ello?

No mucho, quizá un mes. Me hizo bien, porque revisé lo que había hecho y me convencí de que tenía que funcionar, y que estos diagramas que había inventado para mantener las cosas derechas eran realmente correctos.

¿Se dio usted cuenta en ese momento que iban a ser denominados «diagramas de Feynman», que iban a figurar en los libros?

No, no; recuerdo un instante. Yo estaba en pijama, trabajando en el suelo con papeles a mi alrededor, con estos diagramas de apariencia divertida con manchas y líneas que salen de ellas. Me dije, ¿no sería divertido que estos diagramas fueran realmente útiles, y otras personas empezasen a utilizarlos, y *Physical Review* tuviese que imprimir estas tontas figuras? Por supuesto, no podía preverlo; en primer lugar, no tenía ni idea de cuántas de estas figuras iba a ver en *Physical Review*; y en segundo lugar, nunca se me ocurrió que, si los utilizaba todo el mundo, ya no resultarían divertidos...

En este punto la entrevista se aplazó para ir al despacho del doctor Feynman, donde la grabadora se negó a ponerse en marcha de nuevo. El cable, el interruptor, el botón de «grabar», todo estaba en orden; entonces Feynman sugirió sacar el cassette y volverlo a meter]. Así. Vea, solo tiene que conocer el mundo. Los físicos conocen el mundo.

¿Sacarla y volverla a poner?

Correcto. Hay siempre alguna suciedad, algún infinito, o algo.

Sigamos. En sus lecciones, dice usted que nuestras teorías físicas funcionan unificando varias clases de fenómenos, y entonces se presentan los rayos X o los mesones o similares. «Hay siempre muchos cabos sueltos en todas direcciones». ¿Cuáles son algunos de los cabos sueltos que ve usted hoy en la física?

Bien, están las masas de las partículas: las teorías gauge dan bellas pautas para las interacciones, pero no para las masas, y necesitamos entender este conjunto irregular de números. En la interacción nuclear fuerte tenemos esta teoría de quarks y gluones coloreados⁴⁰, establecida de forma muy precisa y completa, pero con pocas predicciones duras. Es técnicamente muy difícil tener un test preciso de la teoría, y eso es un desafío. Siento apasionadamente que ese es un cabo suelto; aunque no hay evidencia en conflicto con la teoría, no es probable que hagamos muchos progresos hasta que podamos comparar predicciones duras con números duros.

¿Qué pasa con la cosmología? ¿Qué hay de la sugerencia de Dirac de que las constantes fundamentales cambian con el tiempo, o la idea de que las leyes físicas eran diferentes en el momento del Big Bang?

Eso abriría un montón de cuestiones. Hasta ahora, la física ha tratado de encontrar leyes y constantes sin preguntar de dónde

⁴⁰ «Color» es en realidad un nombre que dan los físicos a cierta propiedad de quarks y gluones, no porque tengan algún color real sino a falta de un nombre mejor para una nueva propiedad de las partículas elementales. (*N. del e.*)

proceden, pero quizá nos estemos aproximando al punto donde nos veamos obligados a considerar la historia.

¿Tiene usted alguna conjetura sobre eso?

No.

¿Ninguna en absoluto? ¿Ninguna inclinación en ningún sentido?

Realmente, no. Así es como soy respecto a casi todo. Antes, usted no me preguntó si yo pensaba que existe una partícula fundamental, o si todo es borroso; yo le hubiera dicho que no tengo la más mínima idea. Ahora, para trabajar duro en algo, uno tiene que llegar a creer que la respuesta está *allí*, de modo que hay que cavar duro allí, ¿correcto? Así que uno se predispone o adopta un prejuicio temporalmente, pero en el fondo de su cabeza, se está riendo continuamente. Olvide lo que ha oído sobre ciencia sin prejuicios. Aquí, en una entrevista, hablando del Big Bang yo no tengo ningún prejuicio..., pero cuando estoy trabajando, tengo un montón de ellos.

¿Prejuicios a favor de... qué? ¿Simetría, simplicidad...?

A favor del humor del día. Un día estaré convencido de que hay cierto tipo de simetría en la que cree todo el mundo. Al día siguiente trataré de descubrir las consecuencias de que no la haya, y todo el mundo estará loco salvo yo. Pero algo que es normal entre los

buenos científicos es que, mientras están haciendo lo que estén haciendo, no están tan seguros de sí mismos como habitualmente lo están otros. Pueden vivir con una duda continua, pensar «quizá sea así» y actuar sobre eso, sabiendo todo el tiempo que es solo «quizá». Muchas personas encuentran eso difícil; piensan que significa desapego o frialdad. ¡No es frialdad! Es una comprensión mucho más profunda y cálida, y significa que uno puede estar cavando en alguna parte donde está temporalmente convencido de que encontrará la respuesta, y alguien llega y dice: « ¿Has visto lo que están sacando allí?», y uno mira y dice: «¡Vaya; estoy en el lugar equivocado!». Sucede continuamente.

Hay otra cosa que parece suceder con mucha frecuencia en la física moderna: el descubrimiento de aplicaciones para tipos de matemáticas que previamente eran «puras», tales como el álgebra matricial o la teoría de grupos. ¿Son ahora los físicos más receptivos de lo que solían ser? ¿Hay menos retraso en el tiempo?

Nunca hubo retraso. Tomemos los cuaternios de Hamilton⁴¹; los físicos se desprendieron de la mayor parte de este potentísimo sistema matemático y mantuvieron solo una parte, la parte matemáticamente casi trivial, que se convirtió en el análisis vectorial. Pero cuando se necesitó toda la potencia de los cuaternios,

⁴¹ Sir William Rowan Hamilton (1805-1865), matemático irlandés que inventó los cuaternios, una construcción alternativa al análisis vectorial y tensorial. (*N. del e.*)

para la mecánica cuántica, Pauli⁴²reinventó el sistema en el acto en una nueva forma. Ahora, usted puede mirar atrás y decir que las matrices y los operadores de espín de Pauli no son otra cosa que cuaternios de Hamilton..., pero incluso si los físicos hubieran mantenido el sistema en su mente durante noventa años, no hubiera supuesto más que unas pocas semanas de diferencia.

Digamos que usted tiene una enfermedad, la granulomatosis de Werner o la que sea, y la consulta en un libro de referencia en medicina. Podría encontrar muy bien que ahora sabe más sobre ella que su doctor, aunque él se ha pasado mucho tiempo en una escuela de medicina... ¿ve usted? Es mucho más fácil aprender algo sobre un tema especial y restringido que sobre todo un campo. Los matemáticos están explorando en todas direcciones, y es más rápido para un físico captar lo que necesita que tratar de estar al tanto de todo lo que concebiblemente pudiera ser útil. El problema que mencionaba antes, las dificultades con las ecuaciones en la teoría de quarks, ese es el problema de los físicos, y vamos a resolverlo, y quizá cuando lo resolvamos estaremos haciendo matemáticas. Algo maravilloso, y algo que no comprendo es el hecho de que los matemáticos habían investigado grupos y cosas así antes de que apareciesen en física, pero con respecto a la velocidad del progreso en física, no creo que sea tan importante.

⁴² Wolfgang Pauli (1900-1958), ganador del Premio Nobel de Física en 1945 por su descubrimiento del principio de exclusión.(*N. del e.*)

Una cosa más de sus lecciones: usted dice allí que «la próxima gran era del despertar del intelecto humano puede muy bien producir un método de entender el contenido *cualitativo* de las ecuaciones». ¿Qué quiere decir con esto?

En ese pasaje estaba hablando de la ecuación de Schrödinger⁴³. Uno puede obtener de dicha ecuación átomos ligados en moléculas, valencias químicas, etc., pero cuando uno mira la ecuación no puede ver nada de la riqueza de los fenómenos que conoce el químico; o la idea de que los quarks están permanentemente ligados de modo que uno no puede tener un quark libre; quizá se pueda y quizá no se pueda, pero la cuestión es que cuando uno mira las ecuaciones que supuestamente describen el comportamiento de los quarks, uno no puede ver la forma en que se comporta el agua; no puede ver la turbulencia.

Lo que deja a la gente que se pregunta acerca de la turbulencia —los meteorólogos, los oceanógrafos, los geólogos y los diseñadores de aviones— completamente confundidos, ¿no es cierto?

Absolutamente. Y pudiera ser que sea una de esas personas completamente confundidas y frustradas quien lo descubra, y en ese momento estará haciendo física. Con la turbulencia ya no se trata simplemente de que la teoría física solo sea capaz de manejar casos sencillos: es que no podemos manejar ninguno. No tenemos ninguna buena teoría fundamental en absoluto.

⁴³ Erwin Schrödinger (1887-1961), ganador (con P. A. M. Dirac) del Premio Nobel de Física en 1933 por el descubrimiento de nuevas formulaciones de la teoría atómica. (*N. del e.*)

Quizá sea la forma en que están escritos los libros de texto, pero pocas personas fuera de la ciencia parecen saber que hay problemas físicos complicados y muy reales que están descartados en lo que se refiere a la teoría.

Esa es una educación muy mala. La lección que uno aprende cuando se hace mayor en física es que lo que podemos hacer es una fracción muy pequeña de lo que hay. Nuestras teorías son realmente muy limitadas.

¿Hay mucha variación de un físico a otro en su habilidad para ver las consecuencias cualitativas de una ecuación?

¡Oh, sí!, pero nadie es muy bueno en eso. Dirac decía que *entender* un problema físico significa ser capaz de ver la respuesta sin resolver ecuaciones. Quizá exageraba; quizá resolver ecuaciones es la experiencia que uno necesita para obtener una comprensión. Pero hasta que uno lo comprenda, está simplemente resolviendo ecuaciones.

Como profesor, ¿qué puede hacer usted para estimular esa habilidad?

No lo sé. No tengo manera de juzgar hasta qué grado consigo hacerme entender por mis estudiantes.

¿Rastrearé algún día un historiador de la ciencia las carreras de sus estudiantes como han hecho otros con los estudiantes de Rutherford, Niels Bohr o Fermi?

Lo dudo. Siempre estoy decepcionado con mis estudiantes. Yo no soy un profesor que sepa lo que está haciendo.

Pero usted puede señalar influencias en sentido opuesto, digamos, la influencia que en usted tuvieron Hans Bethe o John Wheeler...

Por supuesto. Pero yo no sé qué efecto pueda estar teniendo. Quizá sea solo mi carácter: no lo sé. No soy psicólogo ni sociólogo, no sé cómo entender a la gente, incluido yo mismo. Usted pregunta, ¿cómo puede enseñar este tipo, cómo puede estar motivado si no sabe lo que está haciendo? Como cuestión de hecho, yo adoro enseñar. Me gusta pensar en formas nuevas de mirar las cosas cuando las explico, de hacerlas más claras, pero quizá no las esté haciendo más claras. Probablemente lo que estoy haciendo es divertirme.

He aprendido a vivir sin saber. No tengo que estar seguro de que estoy teniendo éxito y, como dije antes acerca de la ciencia, pienso que mi vida es más plena porque soy consciente de que no sé lo que estoy haciendo. ¡Estoy encantado con la anchura del mundo!

Cuando volvíamos al despacho, usted se detuvo para discutir una lección sobre visión de los colores que va a impartir. Eso está muy lejos de la física fundamental, ¿no es cierto? ¿No diría un fisiólogo que usted entra en un «coto reservado»?

¿Fisiología? ¿Tiene que ser fisiología? Mire, deme un poco de tiempo e impartiré una lección sobre cualquier cosa de fisiología. Estaré encantado de estudiarla y descubrir todo sobre ella, porque puedo garantizarle que sería muy interesante. Yo no sé nada, pero sé que *todo es interesante* si se profundiza en ello lo suficiente.

Mi hijo también es así, aunque sus intereses son mucho más amplios que los míos a su edad. Él está interesado en la magia, en la programación de ordenadores, en la historia de la Iglesia primitiva, en topología... ¡Oh!, él va a vivir una época ajetreada, ¡hay tantas cosas interesantes! Nos gusta sentarnos y hablar sobre lo diferentes que podrían ser las cosas de lo que esperamos; tomemos los aterrizajes de las *Vikingo* en Marte, por ejemplo, estamos tratando de pensar cuántas formas de vida podría haber que *no se pudiesen* descubrir con ese equipo. Sí, se parece mucho a mí, de modo que he transmitido esa idea de que todo es interesante al menos a otra persona.

Por supuesto, no sé si eso es bueno o no... ¿Ve usted?

Capítulo 10

Ciencia tipo «cultos cargo»:

Algunos comentarios sobre ciencia, pseudociencia y aprender a no engañarse

Discurso de la ceremonia de graduación en Caltech en 1974

¿Qué tienen que ver los brujos, la ESP, los habitantes de las islas de los Mares del Sur, los cuernos de rinoceronte y el aceite Wesson con la ceremonia de graduación en una facultad?

Todos ellos son ejemplos que utiliza el astuto Feynman para convencer a los nuevos graduados de que la honestidad en la ciencia es más gratificante que todo el prestigio y todos los éxitos momentáneos del mundo. En este discurso a los estudiantes de Caltech en 1974, Feynman da una lección de integridad científica frente a la presión de los pares y las inflexibles agencias de financiación.

Durante la Edad Media hubo todo tipo de ideas descabelladas, tales como que un trozo de cuerno de rinoceronte aumentaba la potencia sexual. (Otra idea descabellada de la Edad Media son estos sombreros que hoy llevamos, que en mi caso es demasiado holgado). Luego se descubrió un método para seleccionar las ideas, que consistía en tratar de ver si una funcionaba y, si no funcionaba, eliminarla. Este método llegó a organizarse, por supuesto, en ciencia. Y se desarrolló muy bien, de modo que ahora estamos en la

edad científica. De hecho, es una edad tan científica que nos resulta difícil entender cómo pudieron existir alguna vez los brujos, cuando nada de lo que ellos proponían funcionó nunca, o muy poco. Pero incluso hoy encuentro a muchas personas que antes o después me hablan de ovnis, o de astrología, o de alguna forma de misticismo, conciencia expandida, nuevos tipos de conciencia, ESP y todo eso. Y he llegado a la conclusión de que *no* es un mundo científico.

La mayoría de la gente cree en cosas tan fantásticas que he decidido investigar por qué lo hace. Y lo que se ha calificado como mi curiosidad por la investigación me ha creado una dificultad pues descubrí tanta basura de la que hablar que no puedo decirlo todo en esta charla. Estoy abrumado. Primero empecé a investigar varias ideas del misticismo y las experiencias místicas. Me metí en tanques de aislamiento (son lugares oscuros y relajados, y flotas en sales de Epsom) y tuve muchas horas de alucinaciones, así que sé algo sobre ello. Luego fui a Esalen, que es un semillero de ideas de este tipo (es un lugar maravilloso; deberían visitarlo). Entonces quedé abrumado. Yo no me daba cuenta de todo lo que había.

Por ejemplo, estaba sentado en una sala de baños y había otro tipo y una chica en la sala. Él dice a la chica: «Estoy aprendiendo a dar masajes y me pregunto si podría practicar contigo». Ella dice que bien, de modo que se sube a una mesa y él empieza con su pie, trabajando en su dedo gordo y presionándolo. Entonces se vuelve a la que aparentemente es su instructora y dice: «Siento una especie de hendidura. ¿Es la pituitaria?». Y ella responde: «No, no es así como yo la siento». Yo digo: «Estás a mil kilómetros de la pituitaria,

hombre». Y ambos me miran —yo me había descubierto, ya ven— y ella concluye: «Es reflexología». De modo que cerré los ojos y aparenté estar meditando.

Este es solo un ejemplo del tipo de cosas que me abruma. También estudié la percepción extrasensorial y los fenómenos PSI, y la última manía era Uri Geller, un hombre que se supone que es capaz de doblar llaves frotándolas con sus dedos. Así que fui a la habitación de su hotel, por invitación suya, para asistir a una demostración de lectura de pensamiento y doblado de llaves. No hizo ninguna lectura acertada de mi mente; nadie puede leer mi mente, supongo. Y mi hijo sostuvo una llave y Geller la frotó, y no sucedió nada. Entonces él nos dijo que funcionaba mejor bajo el agua, así que pueden imaginarse a todos nosotros en el cuarto de baño con el grifo abierto y la llave bajo el agua, y a él frotando la llave con sus dedos. No sucedió nada. Así que fui incapaz de investigar ese fenómeno.

Pero entonces empecé a pensar, ¿qué otra cosa hay que creamos nosotros? (Y entonces pensé en los brujos, y en lo fácil que hubiera sido ponerles a prueba señalando que nada funcionaba realmente). Así que descubrí cosas que creen *más* personas incluso, tales como que tenemos alguna idea de cómo educar. Hay grandes escuelas de métodos de lectura y métodos para aprender matemáticas, y todo eso, pero, si ustedes se fijan, verán que los niveles de lectura siguen bajando —o apenas suben—, pese al hecho de que continuamente utilizamos a estas mismas personas para mejorar los métodos. *Hay* un remedio de brujo que no funciona. Debería estudiarse, ¿cómo saben ellos que su método debería funcionar? Otro ejemplo es la

forma de tratar a los criminales. Obviamente no hemos hecho ningún progreso —mucho teoría, pero ningún progreso— para disminuir el número de crímenes con el método que utilizamos para tratar a los criminales.

Pese a todo se dice que estas cosas son científicas. Las estudiamos. Y pienso que las personas normales con ideas de sentido común están intimidadas por esta pseudociencia. Una profesora que tiene alguna buena idea de cómo enseñar a leer a sus hijos se ve obligada por el sistema escolar a hacerlo de otra forma, o es incluso engañada por el sistema escolar que le hace pensar que su método no es necesariamente bueno. O una madre de hijos malos, después de imponerles una u otra disciplina, se siente culpable para el resto de su vida porque no hizo «lo correcto» según los expertos.

Por eso deberíamos examinar realmente las teorías que no funcionan, y la ciencia que no es ciencia.

Traté de encontrar un principio para descubrir más cosas de este tipo, y di con el sistema siguiente. Cada vez que se encuentren en una conversación en una fiesta en la que no se sintieran incómodos si la anfitriona llegara y dijera: «¿Por qué están ustedes hablando del trabajo?», o su mujer llegara y dijera: «¿Por qué estás coqueteando otra vez?», entonces pueden ustedes estar seguros de que están hablando de algo de lo que nadie sabe nada.

Utilizando este método descubrí algunos otros temas que había olvidado, entre ellos la eficacia de diversas formas de psicoterapia. Así que empecé a investigar en la biblioteca, y otros sitios, y tengo tanto que contarles que no puedo decírselo todo. Tendré que

limitarme a unas pocas cosas. Me centraré en las cosas en las que creen más personas. Quizá el año que viene dé una serie de charlas sobre todos estos temas. Necesitaré mucho tiempo.

Creo que los estudios sobre educación y psicología que he mencionado son ejemplos de lo que me gustaría llamar ciencia tipo «cultos cargo». En los Mares del Sur hay un pueblo que practica los «cultos cargo». Durante la guerra veían aterrizar aviones con montones de mercancías, y ahora quieren que ocurra lo mismo. Así que se las han arreglado para construir cosas como pistas de aterrizaje, hacer hogueras a los lados de la pista, construir una cabaña de madera para que se siente un hombre dentro, con dos piezas de madera en su cabeza como si fueran auriculares y varas de bambú que sobresalen como antenas —él es el controlador— y esperan que aterricen los aviones. Lo están haciendo todo bien. La forma es perfecta. Todo parece exactamente como era antes. Pero no funciona. No aterriza ningún avión. Por eso llamo a estas cosas ciencia tipo «cultos cargo», porque ellos siguen todos los preceptos y formas aparentes de la investigación científica, pero les falta algo esencial, porque los aviones no aterrizan.

Ahora me corresponde a mí, por supuesto, decirles lo que les falta. Pero sería igual de difícil explicar a los isleños de los Mares del Sur cómo tienen que disponer las cosas para obtener alguna riqueza con su sistema. No es algo sencillo como decirles cómo mejorar la forma de los auriculares. Pero noto que hay *un* aspecto que está ausente en general en la ciencia tipo «cultos cargo». Se trata de la idea que todos esperamos que ustedes hayan aprendido al estudiar ciencia

en la escuela; nunca decimos explícitamente cuál es esta, sino que simplemente esperamos que ustedes la capten en todos los ejemplos de investigación científica. Es interesante, por consiguiente, exponerla ahora y hablar de ella explícitamente. Es una especie de integridad científica, un principio de pensamiento científico que corresponde a un tipo de honestidad absoluta, a la mayor transparencia posible. Por ejemplo, si ustedes están haciendo un experimento, deberían informar de todo lo que piensan que podría invalidarlo y no solo de lo que piensan que está bien; hablar de otras causas que pudieran explicar sus resultados; y de cosas que ustedes piensen que han eliminado mediante otro experimento, y de cómo funcionaron, y asegurar que otros colegas puedan decir que han sido eliminadas.

Hay que dar los detalles que pudieran arrojar dudas sobre su interpretación, si ustedes los conocen. Si saben que algo es completamente erróneo, o posiblemente erróneo, deben explicarlo del mejor modo posible. Si construyen una teoría, por ejemplo, y la anuncian, o la hacen pública, entonces también deben señalar todos los hechos que no concuerdan con ella, tanto como los que concuerdan con ella. Hay también un problema más sutil. Cuando ustedes hayan reunido un montón de ideas para construir una teoría elaborada, deben asegurarse que las cosas que encajan en ella no son solo las cosas que les dieron la idea para la teoría, sino que la teoría acabada explica otras cosas además de aquellas.

En resumen, la idea es tratar de dar *toda* la información que sirva a los demás para juzgar el valor de su contribución, y no solo la información que lleva a juzgar en una u otra dirección concreta.

La forma más fácil de explicar esta idea consiste en contrastarla, por ejemplo, con la publicidad. Ayer por la noche oí que el aceite Wesson no empapa la comida. Bien, eso es verdad. No es deshonesto, pero de lo que estoy hablando no es solo de no ser deshonesto; se trata de una cuestión de integridad científica, que es otro nivel. Lo que debería añadirse a esa frase publicitaria es que *ningún* aceite empapa la comida, si se utiliza a cierta temperatura. Si se utilizaran a otra temperatura, *todos* lo harían, incluido el aceite Wesson. Así que es la implicación que se ha transmitido, y no el hecho, lo que es verdad, y la diferencia es lo que tenemos que tratar.

Hemos aprendido de la experiencia que la verdad se impondrá. Otros experimentadores repetirán su experimento y descubrirán si ustedes estaban equivocados o acertados. Los fenómenos de la naturaleza estarán de acuerdo o en desacuerdo con su teoría. Y aunque ustedes puedan alcanzar cierta fama y excitación momentánea, no se ganarán una buena reputación como científicos si no han tratado de ser muy cuidadosos en este tipo de trabajo. Y es este tipo de integridad, este tipo de cuidado para no engañarse, lo que está casi completamente ausente en buena parte de la investigación de la ciencia tipo «cultos cargo».

Buena parte de su dificultad es, por supuesto, la dificultad del tema y la inaplicabilidad del método científico al tema. De todas formas,

habría que comentar que esta no es la única dificultad. El problema es *por qué* los aviones no aterrizan; pero no aterrizan.

La experiencia nos ha enseñado mucho acerca de cómo manejar algunas de las formas de engañarnos. Un ejemplo, Millikan midió la carga de un electrón en un experimento con gotas de aceite que caían y obtuvo una respuesta que ahora sabemos que no era completamente correcta. Se desviaba un poco porque él utilizaba un valor incorrecto para la viscosidad del aire. Es interesante examinar la historia de las medidas de la carga del electrón después de Millikan. Si ustedes las representan en función del tiempo, encuentran que una es un poco mayor que la de Millikan, y la siguiente es un poco mayor que la anterior, y la siguiente un poco mayor aún, aunque finalmente se estabilizan en un número que es más alto.

¿Por qué no descubrieron enseguida que el nuevo número era más alto? Es algo —esta historia— de lo que los científicos están avergonzados, porque es evidente que la gente hacía cosas como esta: cuando descubrían un número que estaba muy por encima del de Millikan, pensaban que algo debía estar mal, y buscaban y encontraban una razón por la que algo debería estar mal. Cuando obtenían un número más próximo al valor de Millikan, ya no buscaban con tanto interés. Y así eliminaban los números que estaban demasiado lejos, y hacían otras cosas parecidas. Ahora hemos sabido estos trucos, y ahora no tenemos este tipo de enfermedad.

Pero esta larga historia de aprender a no engañarnos —de tener una integridad científica absoluta— es, lamento decirlo, algo que no hemos incluido específicamente en ninguna asignatura concreta que yo conozca. Simplemente esperamos que ustedes la hayan captado por ósmosis.

El primer principio es que ustedes no deben engañarse, y ustedes son las personas más fáciles de engañar. Así que tienen que tener mucho cuidado con eso. Una vez que ustedes no se engañen a sí mismos, es fácil no engañar a otros científicos. Después de eso solo tienen que ser honestos de un modo convencional.

Me gustaría añadir algo que no es esencial para el científico, aunque es algo que yo creo, y es que ustedes no deberían engañar al profano cuando están hablando como científicos. No trato de decirles lo que tienen que hacer cuando engañan a su mujer, o engañan a su novia, o a quien sea, cuando ustedes no tratan de ser científicos sino que solo tratan de ser seres humanos corrientes. Dejaremos esos problemas para ustedes y para sus rabinos. Yo estoy hablando de un tipo extra y específico de integridad que no solo es no mentir, sino hacer lo imposible por demostrar que quizá estén equivocados: eso es lo que deberían hacer cuando actúan como científicos. Y esta es nuestra responsabilidad como científicos, por supuesto para con otros científicos, y yo pienso que también para con los profanos.

Por ejemplo, me quedé un poco sorprendido cuando estaba hablando con un amigo que iba a hablar por la radio. Él trabaja en cosmología y astronomía, y se preguntaba cómo iba a explicar

cuáles eran las aplicaciones de su trabajo. «Bien —dije yo—, no hay ninguna». Y él dijo: «Sí, pero entonces no obtendremos más apoyo para este tipo de investigación». Pienso que esto es deshonesto. Si ustedes se están representando a sí mismos como científicos, entonces deberían explicar al profano lo que están haciendo; y si no quieren apoyarle en estas circunstancias, esa es su decisión.

Un ejemplo de este principio es este: si ustedes están dispuestos a poner a prueba una teoría, o si quieren explicar alguna idea, deberían siempre decidir publicarla cualquiera que fuese el resultado. Si solo publicamos resultados de un cierto tipo, podemos hacer que el argumento parezca bueno. Debemos publicar *ambos* tipos de resultados. Por ejemplo —tomemos otra vez la publicidad—, supongamos que ciertos cigarrillos tienen alguna propiedad especial, como puede ser un bajo contenido en nicotina. La compañía difunde ampliamente que esto significa que es bueno para ustedes; pero ellos no dicen, por ejemplo, que hay una proporción diferente de alquitrán, o que sucede alguna otra cosa con el cigarrillo. En otras palabras, la probabilidad de publicación depende de la respuesta. Eso no debería hacerse.

Yo afirmo que esto es también importante cuando se trata de dar algún tipo de asesoramiento. Supongamos que un senador les pide consejo acerca de si en este estado debería hacerse una perforación, y ustedes deciden que sería mejor hacerla en otro estado. Si ustedes no publican tal resultado, creo que no están dando un consejo científico. Están siendo utilizados. Si su respuesta resulta ir en la dirección del gobierno o de los políticos, ellos pueden utilizarla como

un argumento a su favor; si resulta contraria, ellos no la harán pública. Eso no es dar consejo científico.

Otros errores son más característicos de una ciencia pobre. Cuando yo estaba en Cornell solía hablar con la gente del departamento de psicología. Una de las estudiantes me dijo que quería hacer un experimento que era algo parecido a esto: no lo recuerdo en detalle, pero otros habían descubierto que en determinadas circunstancias X, las ratas hacían algo A. Ella tenía curiosidad por saber si, cuando las circunstancias cambiaban a Y, las ratas seguirían haciendo A. Así que su propuesta era hacer el experimento en las circunstancias Y, y ver si seguían haciendo A.

Yo le expliqué que primero era necesario repetir en su laboratorio el experimento de los otros —hacerlo en las circunstancias X para ver si ella también podía obtener el resultado A— y luego cambiar a Y, y ver si A cambiaba. Entonces sabría si las diferencias en los resultados se debían a circunstancias que ella podía controlar.

Ella estaba encantada con esta nueva idea, y fue a decírselo a su profesor. Y la respuesta de este fue: «No, tú no puedes hacer eso porque ese experimento ya se ha hecho y estarías perdiendo el tiempo». Eso se había hecho en 1935 o así, y entonces parece que la política general era tratar de no repetir experimentos en psicología, y cambiar solo las condiciones para ver lo que sucede.

Actualmente hay cierto peligro de que suceda lo mismo, incluso en el famoso campo de la física. Me quedé sorprendido al oír hablar de un experimento realizado en el gran acelerador del National Accelerator Laboratory, en el que una persona utilizaba deuterio.

Para comparar los resultados obtenidos con hidrógeno pesado con lo que podría suceder con hidrógeno ligero, él tuvo que utilizar datos de un experimento hecho por otro investigador y realizado en un aparato diferente. Cuando le preguntaron por qué, dijo que no podría conseguir tiempo dentro del programa para hacer el experimento con hidrógeno ligero en su propio aparato, pues hay muy poco tiempo disponible en estas instalaciones tan costosas y no iba a obtener ningún resultado nuevo. De este modo, quienes gestionan los programas en NAL están tan ansiosos de nuevos resultados, y conseguir así más dinero para mantener la cosa en marcha con fines mediáticos, que están destruyendo, posiblemente, el valor de los propios experimentos, que es el objetivo principal. Suele ser difícil para esos investigadores completar su trabajo tal como exige su integridad científica.

No obstante, no todos los experimentos en psicología son de este tipo. Por ejemplo, ha habido muchos experimentos con ratas corriendo por todo tipo de laberintos, y cosas similares, con resultados poco claros. Pero en 1937 un hombre llamado Young hizo uno muy interesante. Tenía un pasillo largo con puertas en un lado por donde entraban las ratas, y puertas en el otro lado donde estaba la comida. Él quería ver si podía adiestrar a las ratas para que entraran en la tercera puerta independientemente del lugar donde él las colocase inicialmente. Las ratas iban inmediatamente a la puerta donde había estado la comida la vez anterior.

La pregunta era: puesto que el pasillo estaba tan bien construido y era tan uniforme, ¿cómo sabían las ratas que esta era la misma

puerta que antes? Obviamente había algo en la puerta que la hacía diferente de las otras puertas. Así que pintó las puertas con mucho cuidado, haciendo que las texturas de las puertas fueran exactamente iguales. Pero las ratas todavía podían distinguir. Entonces él pensó que quizá las ratas estaban oliendo la comida, así que utilizó sustancias químicas para cambiar el olor en cada prueba. Aún podían distinguir. Luego se dio cuenta de que las ratas podrían distinguir viendo las luces y la disposición del laboratorio, como cualquier persona con sentido común. Así que cubrió el pasillo, pero las ratas seguían distinguiendo.

Finalmente descubrió que las ratas podían distinguir por el sonido que hacía el suelo cuando la rata corría por él. Y solo pudo determinarlo al cubrir el pasillo de arena. Así que examinó una tras otra todas las claves posibles y finalmente pudo engañar a las ratas para que aprendieran a entrar en la tercera puerta. Si él relajaba cualquiera de estas condiciones, las ratas eran capaces de distinguir.

Ahora, desde el punto de vista científico, este experimento merece un 10. Este es el experimento que hace razonables los experimentos con ratas que corren, porque descubre las claves que están utilizando realmente las ratas, y no las que uno piensa que están utilizando. Y ese es el experimento que dice exactamente qué condiciones hay que establecer para ser cuidadoso y controlar todo en este experimento con ratas.

Indagué en la historia posterior de esta investigación. El siguiente experimento, y el que siguió a este, nunca mencionaban al señor

Young. Nunca utilizaban ninguno de sus criterios de poner arena en el pasillo o tener mucho cuidado. Solo ponían ratas a correr al mismo viejo estilo de antes, y no prestaban atención a los grandes descubrimientos del señor Young ni se citaban sus artículos porque no descubrió nada acerca de las ratas. De hecho, él descubrió todas las cosas que hay que hacer para descubrir algo sobre las ratas. Pero no prestar atención a experimentos como este es una característica de la ciencia tipo «cultos cargo».

Otro ejemplo son los experimentos ESP del señor Rhine⁴⁴ y otras personas. Conforme diversas personas han ido expresando sus críticas —y ellos mismos han hecho críticas de sus propios experimentos— ellos mejoran las técnicas de modo que los efectos son cada vez menores, y menores, y menores, hasta que poco a poco desaparecen. Todos los parapsicólogos están buscando un experimento que pueda repetirse estadísticamente, que se pueda hacer otra vez y obtener el mismo resultado, de forma regular. Ellos ponen a correr a un millón de ratas —no, esta vez son personas—, hacen un montón de cosas y obtienen cierto efecto estadístico. La próxima vez que lo intentan ya no lo obtienen. Y ahora aparece un hombre que dice que es una exigencia irrelevante esperar un experimento repetible. ¿Es esto ciencia? Este hombre habla también de una nueva institución, en una charla en la que se estaba despidiendo como director del Instituto de Parapsicología. Y, al decir a la gente qué cosas había que hacer a continuación, afirma que una de las cosas que tienen que hacer es asegurarse de que solo

⁴⁴ Joseph Banks Rhine, fundador del Laboratorio de Parapsicología en la Universidad de Duke en Carolina del Norte. (N. del t.)

adiestren a estudiantes que hayan demostrado su capacidad para obtener resultados EPS en una medida aceptable, y no gastar su tiempo en aquellos estudiantes ambiciosos e interesados que solo obtienen resultados por azar. Es muy peligroso tener una política semejante en la enseñanza: enseñar a los estudiantes cómo obtener ciertos resultados, en lugar de cómo hacer un experimento con integridad científica.

Así que yo les deseo —no tengo más tiempo, así que solo tengo un deseo para ustedes— que la buena suerte les lleve a alguna parte donde sean libres para mantener el tipo de integridad que he descrito, y donde no se vean forzados a perder la integridad por una necesidad de mantener su posición en la organización, o de apoyo financiero, o algo similar. Quizá ustedes tengan esa libertad. Puedo darles también un último consejo: no digan nunca que van a dar una charla a menos que sepan claramente de qué van a hablar y más o menos qué es lo que van a decir.

Capítulo 11

Tan sencillo como uno, dos, tres

Una llamativa historia de Feynman, estudiante precoz que experimenta —consigo mismo, con sus calcetines, su máquina de escribir y sus compañeros estudiantes— para resolver los misterios del recuento y del tiempo.

Cuando yo era un niño que crecía en Far Rockaway, tenía un amigo que se llamaba Bernie Walker. Los dos teníamos «laboratorios» en casa, y hacíamos «experimentos» diversos. Una vez estábamos discutiendo algo —debíamos tener once o doce años por entonces— y yo dije: «Pero pensar no es otra cosa que hablar para tu interior».

— ¿Sí? —dijo Bernie—. ¿Conoces la forma endiablada del cigüeñal de un automóvil?

—Sí. ¿Qué pasa con ella?

—Bien. Ahora, dime ¿cómo la describes cuando te estás hablando a ti mismo?

Así aprendí de Bernie que los pensamientos pueden ser visuales tanto como verbales.

Más tarde, en la universidad, empecé a interesarme por los sueños. Me preguntaba cómo era posible que las cosas pareciesen tan reales, igual que si la luz estuviera incidiendo en la retina del ojo, aunque los ojos están cerrados: ¿están siendo estimuladas de alguna otra forma las células nerviosas de la retina —por el propio cerebro, quizá—, o tiene el cerebro algún «departamento de juicio» que rebosa mientras se sueña? La psicología nunca me dio

respuestas satisfactorias a tales preguntas, aunque me interesé por el funcionamiento del cerebro. En su lugar, había todas esas cosas sobre la interpretación de los sueños y todo eso.

Cuando estaba en la facultad en Princeton, un tonto artículo de psicología suscitó muchas discusiones. El autor había decidido que lo que controlaba la «sensación del tiempo» en el cerebro es una reacción química en la que interviene el hierro. Yo pensé: «¿Cómo demonios se le pudo ocurrir eso?».

Pues así es como lo hizo: su mujer tenía una fiebre crónica muy variable. Entonces él tuvo la idea de poner a prueba la sensación del tiempo que ella experimentaba. Hizo que ella contara segundos mentalmente (sin mirar el reloj), y comprobó cuánto tiempo tardaba en contar hasta sesenta. Tuvo a la pobre mujer contando durante todo el día: cuando su fiebre subía, él comprobó que ella contaba más rápido; cuando la fiebre bajaba, contaba más despacio. Así que, concluyó él, lo que gobernaba la «sensación de tiempo» en el cerebro debía funcionar a más velocidad cuando ella tenía fiebre que cuando no tenía fiebre.

Siendo un tipo «científico», el psicólogo sabía que el ritmo de una reacción química varía con la temperatura del entorno de acuerdo con una fórmula que depende de la energía de la reacción. Midió las diferencias en la velocidad de recuento de su mujer y determinó cómo variaba esta velocidad con la temperatura corporal. Luego trató de encontrar una reacción química cuya velocidad variara con la temperatura de una forma similar a la velocidad de recuento de su mujer. Encontró que las reacciones con hierro eran las que mejor

encajaban en la pauta. Y de este modo dedujo que la sensación de tiempo de su mujer estaba gobernada por una reacción química en su cuerpo en la que intervenía el hierro.

Bien, a mí todo esto me parecía un montón de disparates; había muchas cosas que podían ser erróneas en su larga cadena de razonamientos. Pero *era* una pregunta interesante: ¿*Qué es* lo que determina la sensación del tiempo? Cuando tratas de contar a un ritmo uniforme, ¿de qué depende ese ritmo? ¿Y qué puedes hacer tú para cambiarlo?

Decidí investigar. Empecé a contar segundos —por supuesto, sin mirar el reloj— hasta 60, a un ritmo pausado y constante: 1, 2, 3, 4, 5... Cuando llegué a 60 solo habían pasado 48 segundos, pero eso no me preocupó. El problema no era contar exactamente un minuto, sino contar a un ritmo estándar. La próxima vez que conté hasta 60, habían pasado 49 segundos. La próxima vez, 48. Luego 47, 48, 49, 48, 49... Así que descubrí que podía contar a un ritmo bastante regular.

Ahora bien, si yo me sentaba simplemente, sin contar, y esperaba hasta que pensaba que había pasado un minuto, eso sí era muy irregular: había grandes variaciones. Así que descubrí que es muy pobre estimar un minuto por pura conjetura. Pero contando, yo podía ser muy preciso.

Ahora que sabía que podía contar a un ritmo regular, la siguiente pregunta era: ¿qué afecta al ritmo?

Quizá tenga algo que ver con el ritmo cardíaco. Así que empecé a subir y bajar las escaleras, arriba y abajo, para que mi corazón

latiera muy deprisa. Luego entré en mi habitación, me tumbé en la cama y conté hasta 60.

También probé a subir y bajar las escaleras y contar para mí mientras estaba subiendo y bajando.

Los otros muchachos me veían subir y bajar las escaleras, y se reían. « ¿Qué estás haciendo?».

Yo no podía responderles —lo que hizo que me diera cuenta de que no podía hablar mientras estaba contando mentalmente— y seguía subiendo y bajando las escaleras, como un idiota.

(Los muchachos de la facultad solían mirarme como a un idiota. En otra ocasión, por ejemplo, un muchacho entró en mi habitación —yo había olvidado cerrar la puerta durante el «experimento»— y me encontró en una silla con mi pesado abrigo de piel de carnero, asomado a la ventana abierta de par en par en pleno invierno, sosteniendo un cazo en una mano y removiéndolo con la otra. «¡No me molestes! ¡No me molestes!», dije. Yo estaba removiendo gelatina y observándola atentamente: me había picado la curiosidad por saber si la gelatina se coagularía con el frío si la mantenías en movimiento constante).

En cualquier caso, después de tratar todas las combinaciones de subir y bajar las escaleras y tumbarme en la cama, ¡sorpresa! El ritmo cardíaco no tenía efecto. Y puesto que yo me acaloraba mucho subiendo y bajando las escaleras, imaginé que la temperatura tampoco tenía nada que ver con ello (aunque debía haber sabido que la temperatura no aumenta realmente cuando uno hace

ejercicio). De hecho, no pude encontrar nada que afectara a mi ritmo de recuento.

Subir y bajar escaleras acabó por hacerse muy aburrido, así que empecé a contar mientras hacía cosas que tenía que hacer de todas formas. Por ejemplo, cuando iba a la lavandería, tenía que rellenar un formulario diciendo cuántas camisas tenía, cuántos pantalones, etc. Descubrí que podía escribir «3» delante de «pantalones» o «4» delante de «camisas», pero no podía contar mis calcetines: había demasiados. Estoy utilizando ya mi «máquina de contar»... 36, 37, 38... y aquí están todos estos calcetines delante de mí... 39, 40, 41... ¿Cómo cuento los calcetines?

Descubrí que podía disponerlos en formas geométricas, como un cuadrado, por ejemplo: un par de calcetines en esta esquina, un par en esa, un par aquí, y un par allí; ocho calcetines.

Continué con este juego de contar por pautas, y descubrí que podía contar las líneas de un artículo de periódico agrupando las líneas en pautas de 3, 3, 3 y 1 para dar 10; luego 3 de esas pautas, 3 de esas pautas, 3 de esas pautas y 1 de aquellas pautas hacían 100. Seguí así hasta el final del periódico. Una vez que había acabado de contar hasta 60, sabía en qué parte de la pauta estaba y podía decir: «He llegado a 60, y hay 113 líneas». Descubrí que incluso podía *leer* los artículos mientras contaba hasta 60, ¡y no afectaba al ritmo! De hecho, podía hacer cualquier cosa mientras contaba para mí, excepto hablar en voz alta, por supuesto.

¿Qué pasa con escribir a máquina copiando palabras de un libro? Descubrí que podía hacerlo también, pero aquí mi ritmo cambió. Yo

estaba excitado: ¡finalmente había encontrado algo que parecía afectar a mi ritmo de recuento! Lo investigué más a fondo.

Yo seguía, escribiendo a máquina las palabras sencillas a gran velocidad, contando para mí mismo 19, 20, 21, escribiendo a máquina, contando 27, 28, 29, escribiendo a máquina, hasta... ¿Qué demonios es esta palabra? Oh, sí... y entonces sigo contando 30, 31, 32, y así sucesivamente. Cuando llegué a 60, estaba retrasado.

Tras alguna introspección y más observación me di cuenta de lo que debía haber sucedido: yo interrumpía mi recuento cuando llegaba a una palabra difícil que «necesitara más cerebro», por así decir. Mi ritmo de recuento no se frenaba: lo que sucedía, más bien, era que el propio recuento se interrumpía momentáneamente de vez en cuando. Contar hasta 60 había llegado a ser algo tan automático que al principio ni siquiera noté las interrupciones.

A la mañana siguiente, durante el desayuno, informé de los resultados de todos estos experimentos a los otros muchachos que estaban en la mesa. Les dije todas las cosas que yo podía hacer mientras contaba mentalmente, y dije que lo único que no podía hacer en absoluto mientras contaba mentalmente era hablar.

Uno de los muchachos, un colega llamado John Tukey, dijo: «Yo no creo que puedas leer, y no veo por qué no puedes hablar. Te apuesto a que yo puedo hablar mientras cuento mentalmente, y te apuesto a que tú no puedes leer».

Así que yo hice una demostración: ellos me dieron un libro y yo leí durante un rato, mientras contaba para mí. Cuando llegué a 60

dije: «¡Ahora!»: habían pasado 48 segundos, mi tiempo normal. Luego les conté lo que había leído.

Tukey estaba asombrado. Después de ponerle a prueba varias veces para ver cuál era su tiempo normal, él empezó a hablar: «María tenía un corderito; yo puedo decir lo que quiera, no hay ninguna diferencia; no sé qué es lo que te molesta»... bla, bla, bla, y finalmente: «¡Ya está!». ¡Clavó su tiempo! ¡Yo no podía creerlo!

Hablamos un rato sobre ello y descubrimos algo. Resulta que Tukey estaba contando de una forma diferente: él visualizaba una cinta que iba pasando con números. Decía: «María tenía un corderito», y él *observaba*. Bien, ahora estaba claro: él está «mirando» su cinta que pasa, de modo que no puede leer, y yo estoy «hablando» para mí cuando estoy contando, de modo que no puedo hablar.

Tras este descubrimiento, traté de imaginar una forma de leer en voz alta mientras contaba, algo que ninguno de los dos podíamos hacer. Yo imaginaba que tendría que utilizar una parte de mi cerebro que no interfiriera con los departamentos de la visión o el habla, así que decidí utilizar mis dedos puesto que eso implicaba el sentido del tacto.

Pronto conseguí contar con mis dedos y leer en voz alta. Pero yo quería que todo el proceso fuera mental, y no descansase en ninguna actividad física. Así que traté de imaginar la sensación de mis dedos moviéndose mientras yo estaba leyendo en voz alta.

Nunca lo conseguí. Imaginé que era porque no había practicado lo suficiente, pero podría ser imposible: nunca encontré a nadie que pudiera hacerlo.

Con este experimento Tukey y yo descubrimos que lo que pasa por las cabezas de distintas personas cuando *piensan* que están haciendo lo mismo —algo tan simple como *contar*— es diferente para distintas personas. Y descubrimos que hay una forma externa y objetiva de comprobar cómo trabaja el cerebro: no hay que preguntar a una persona cómo cuenta y fiarse de sus propias observaciones; en lugar de ello, hay que observar lo que la persona puede hacer y no puede hacer mientras cuenta. El test es absoluto. No hay forma de batirlo, no hay forma de falsearlo.

Resulta natural explicar una idea en términos de lo que uno ya tiene en su cabeza. Los conceptos se apilan uno encima de otro: esta idea se enseña en términos de esa otra, y esa se enseña en términos de otra, que procede de contar, ¡y eso puede ser muy diferente para personas diferentes!

A menudo pienso sobre esto, especialmente cuando estoy enseñando alguna técnica esotérica tal como la integración de funciones de Bessel. Cuando veo las ecuaciones, veo las letras en colores; no sé por qué. Mientras estoy hablando, veo imágenes vagas de funciones de Bessel del libro de Jahnke y Emde⁴⁵, donde flotan *js* de color marrón claro, *ns* ligeramente de color violeta, y *xs* marrón oscuro. Y me pregunto qué demonios debe parecerle a los estudiantes.

⁴⁵ Las *Tables of Functions with Formulae and Curves* de E. Jahnke y F. Emde fueron durante mucho tiempo el libro de referencia obligado para visualizar la representación gráfica de muchas funciones de interés. (*N. del t.*)

Capítulo 12

Richard Feynman construye un universo

En una entrevista hasta ahora inédita, realizada bajo los auspicios de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia, Feynman recuerda su vida en la ciencia: su aterradora primera conferencia ante una audiencia repleta de premios Nobel; la invitación a trabajar en la primera bomba atómica y su reacción a ello; la ciencia tipo «cultos cargo»; y esa extemporánea llamada de madrugada de un periodista que le informaba de que acababa de ganar el Premio Nobel. Respuesta de Feynman: «Podría usted habérmelo dicho por la mañana».

Mel Feynman era un viajante de una empresa de uniformes en la ciudad de Nueva York. El 11 de mayo de 1918 recibió con alegría el nacimiento de su hijo Richard. Cuarenta y siete años después, Richard Feynman recibía el Premio Nobel de Física. En muchos aspectos, Mel Feynman tuvo mucho que ver con dicho logro, como relata Richard Feynman.

Bueno, antes de que yo naciera, él [mi padre] le dijo a mi madre que «este niño va a ser un científico». No se pueden decir ahora cosas así ante los movimientos de liberación de las mujeres, pero esas son las cosas que se decían aquellos días. Pero él nunca me dijo que yo tenía que ser científico... Me enseñó a apreciar las cosas que iba conociendo. Nunca hubo ninguna presión. Más adelante, cuando yo había crecido, él me llevaba a dar paseos por el bosque y me

mostraba los animales y los pájaros y todo eso... me hablaba de las estrellas y de los átomos y todo lo demás. Me decía lo que pasaba con ellos y qué los hacía tan interesantes. Tenía una actitud hacia el mundo y una manera de mirarlo que yo encontraba profundamente científica para un hombre que no tenía una formación científica directa.

Richard Feynman es ahora profesor de física en el Instituto de Tecnología de California en Pasadena, donde ha permanecido desde 1950. Dedicar parte de su tiempo a la enseñanza y otra parte a teorizar sobre los minúsculos fragmentos de materia con los que está construido nuestro universo. A lo largo de su carrera, su imaginación a veces poética le ha llevado a muchas áreas exóticas: las matemáticas implicadas en la construcción de una bomba atómica, la genética de un virus simple y las propiedades del helio a temperaturas extremadamente bajas. El trabajo que le valió el Premio Nobel por el desarrollo de la teoría de la electrodinámica cuántica ayudó a resolver muchos problemas físicos de un modo más directo y más eficiente que lo que había sido posible hasta entonces. Pero, una vez más, lo que puso en marcha esa larga cadena de logros fueron largos paseos por el bosque con su padre.

Él tenía su modo de mirar las cosas. Solía decir: «Supongamos que fuéramos marcianos que veníamos a la Tierra y mirábamos a estas extrañas criaturas que hacen cosas; ¿qué pensaríamos? Por ejemplo —decía—, supongamos que nosotros no dormíamos nunca: somos

marcianos y tenemos una conciencia que trabaja continuamente. Y entonces nos encontramos con estas criaturas que paran durante ocho horas todos los días, cierran sus ojos y se quedan más o menos inertes. Tendríamos una pregunta interesante que hacerles. Les diríamos: “¿Qué se siente durante todo este tiempo? ¿Qué pasa con sus ideas? Ustedes están funcionando muy bien, están pensando con claridad y... ¿qué sucede entonces?, ¿se para todo repentinamente o se va haciendo todo cada vez más lento hasta que llega a pararse? ¿Cómo exactamente desconectan ustedes sus pensamientos?”. Más tarde reflexioné mucho sobre ello, y cuando estaba en la universidad hice experimentos para tratar de descubrir la respuesta a qué es lo que sucede con los pensamientos de uno cuando se duerme.

Inicialmente, el doctor Feynman tenía intención de ser ingeniero eléctrico, utilizar la física para hacer cosas útiles para él y el mundo que le rodeaba. No tardó mucho en darse cuenta de que lo que más le interesaba realmente era aquello que hace que las cosas funcionen, los principios teóricos y matemáticos que subyacen a la actuación del propio universo. Su mente se convirtió en su laboratorio.

Cuando yo era joven, lo que llamo el laboratorio era tan solo un lugar para jugar, hacer radios, artilugios, fotocélulas y cualquier otra cosa. Me quedé muy sorprendido cuando descubrí a qué le llaman laboratorio en una universidad. Es un lugar donde se supone que uno mide algo de forma muy seria. Yo nunca medí una

maldita cosa en mi laboratorio. Solo jugueteaba y hacía cosas. Este era el tipo de laboratorio que tenía cuando era joven y pensaba de esa manera. Pensaba que ese era el camino que yo iba a seguir. Pues bien, en ese laboratorio tenía que resolver ciertos problemas. Solía reparar radios. Por ejemplo, tenía que coger una resistencia para ponerla en serie con un voltímetro de modo que este operase con diferentes escalas. Cosas así. De modo que empecé a descubrir estas fórmulas, las fórmulas de la electricidad, y un amigo mío tenía un libro con fórmulas sobre electricidad y con las relaciones entre las resistencias. Tenía cosas como: la potencia es el producto de la intensidad de corriente por el voltaje; el voltaje dividido por intensidad de corriente es la resistencia; había seis o siete fórmulas. A mí me parecía que todas estaban relacionadas, que no eran realmente independientes, sino que unas podían derivarse de otras. Y así, empecé a tantear y, a partir del álgebra que había aprendido en la escuela, entendí la forma de hacerlo. Me di cuenta de que las matemáticas eran importantes en este asunto.

Así que cada vez me interesé más por el asunto de las matemáticas asociadas a la física. Además, las matemáticas por sí mismas tenían un gran atractivo para mí. Las amé toda mi vida. [...]

Después de graduarse en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, Richard Feynman se trasladó a la Universidad de Princeton, aproximadamente 700 kilómetros al suroeste, donde finalmente obtendría su doctorado. Fue allí, a la edad de veinticuatro

años, cuando dio su primer seminario formal. Fue una conferencia llena de acontecimientos.

Cuando era licenciado trabajaba como ayudante de investigación con el profesor Wheeler⁴⁶, y juntos habíamos elaborado una nueva teoría sobre cómo actuaba la luz, cómo tenía lugar la interacción entre átomos en diferentes lugares; en aquella época era una teoría aparentemente interesante. Así que el profesor Wigner, que era quien organizaba los seminarios, sugirió que diéramos un seminario sobre ello, y el profesor Wheeler dijo que puesto que yo era joven y no había dado ningún seminario antes, sería una buena oportunidad para aprender a hacerlo. Así que esta fue la primera charla técnica que di.

Empecé a prepararlo. Entonces vino Wigner y me dijo que pensaba que el trabajo era suficientemente importante y por ello había invitado especialmente al seminario al profesor Pauli, que era un gran profesor de física que procedía de Zurich, al profesor Von Neumann, el mayor matemático del mundo; a Henri Norris Russell, el famoso astrónomo, y a Albert Einstein, que vivía allí cerca. Me debí quedar absolutamente pálido o algo similar porque él me dijo: «Ahora no te pongas nervioso, no te preocupes por ello. Antes de nada, si el profesor Russell se queda dormido, no te sientas mal, porque él siempre se queda dormido en las conferencias. Cuando el profesor Pauli mueva la cabeza mientras tú hablas, no te animes, porque él siempre mueve la cabeza, tiene parálisis», y así

⁴⁶ John Archibald Wheeler (n. 1911), físico, más conocido entre el público por haber acuñado el término «agujero negro». (N. del e.)

sucesivamente. Esto me tranquilizó un poco, pero seguía preocupado. Así que el profesor Wheeler me prometió que él respondería a todas las preguntas y que todo lo que yo tenía que hacer sería dar la conferencia.

Recuerdo mi entrada... ustedes pueden imaginarse esa primera vez, era como atravesar un fuego. Había escrito todas las ecuaciones en la pizarra por adelantado, así que toda la pizarra estaba llena de ecuaciones. A la gente no le gustan tantas ecuaciones, prefieren entender las ideas. Y recuerdo que entonces me levanté para hablar y allí estaban estos grandes hombres entre la audiencia: era aterrador. Aún puedo ver mis propias manos cuando sacaba los artículos del sobre en donde los llevaba. Temblaban. Pero en cuanto cogí el papel y empecé a hablar me sucedió algo que siempre me ha sucedido desde entonces y que es maravilloso. Si estoy hablando de física, amo el tema, solo pienso en física, no me preocupa dónde estoy; no me preocupo por nada. Y todo fue muy fácil. Simplemente expliqué todo el asunto lo mejor que pude. No pensé en quién había allí. Solo pensaba en el problema que estaba explicando. Y al final, cuando llegara el tiempo de las preguntas, yo no tenía nada por lo que preocuparme porque el profesor Wheeler iba a responderlas. El profesor Pauli se puso de pie, estaba sentado junto al profesor Einstein. Dijo: «Yo no creo que esta teoría pueda ser correcta debido a esto y aquello y esta otra cosa y así sucesivamente, ¿no está usted de acuerdo, profesor Einstein?». Einstein dijo: «No-o-o-o», y ese fue el no más bonito que he oído nunca.

Fue en Princeton donde Richard Feynman supo que incluso si él viviera toda su vida en el mundo de las matemáticas y la física teórica, había otro mundo ahí fuera que insistiría en hacerle demandas muy prácticas. En aquellos años el mundo estaba en guerra, y Estados Unidos acababa de empezar a trabajar en la bomba atómica.

Precisamente en aquella época, Bob Wilson entró en mi habitación para hablarme de un proyecto que estaba empezando y que tenía que ver con producir uranio para bombas atómicas. Dijo que había una reunión a las tres y que era un secreto, pero él sabía que cuando yo supiese cuál era el secreto tendría que ir con él, de modo que no había peligro en decírmelo. Dije: «Cometes un error al contarme el secreto. No voy a ir contigo. Me vuelvo a hacer mi trabajo, a trabajar en mi tesis». Él salió de la habitación diciendo: «Vamos a tener una reunión a las tres». Eso [sucedió] por la mañana. Empecé a caminar por el piso y a pensar en las consecuencias que tendría que la bomba estuviese en manos de los alemanes y todo eso, y decidí que era muy excitante y muy importante hacerlo. Así que fui a la reunión de las tres y dejé de trabajar en mi doctorado.

El problema consistía en que había que separar los isótopos del uranio para construir una bomba. El uranio se presenta básicamente en dos isótopos, y el U235 era el reactivo y queríamos separarlos. Wilson había ideado un esquema para hacer la separación —formar un haz de iones y agrupar los iones— basado

en que la velocidad de los dos isótopos a una misma energía es ligeramente diferente. Así que si uno crea pequeños montones y los hace descender por un largo tubo, uno de los isótopos se adelanta al otro y pueden separarse de este modo. Ese era el plan que él tenía. Yo era un teórico en aquella época. Lo que yo tenía que hacer inicialmente era descubrir si el dispositivo tal como estaba diseñado iba a funcionar; ¿podría hacerse siquiera? Había un montón de preguntas sobre las limitaciones del espacio de carga y todo eso, pero yo deduje que podía hacerse.

Aunque Feynman dedujo que el método de Wilson para separar isótopos de uranio era teóricamente posible, finalmente se utilizó otro método para producir uranio²³⁵ para la bomba atómica. De todas formas, había aún mucho sitio para Richard Feynman y su teorización de alto nivel en el laboratorio principal en Los Álamos, Nuevo México, encargado de desarrollar la bomba. Tras la guerra, se unió al grupo del Laboratorio de Estudios Nucleares en la Universidad de Cornell. Hoy tiene sentimientos encontrados acerca del trabajo que desarrolló para hacer posible la bomba atómica. ¿Había hecho lo correcto o lo equivocado?

No, yo no creo que estuviese equivocado en el momento en que tomé la decisión. Pensé sobre ello y creí correctamente que era muy peligroso que los nazis lo consiguieran. Sin embargo, hubo, creo yo, un error en mi pensamiento, pues una vez que los alemanes fueron derrotados —eso fue mucho después, tres o cuatro años después—

seguíamos trabajando muy duro. Yo no me detuve; ni siquiera consideré que ya no existía el motivo original para hacerlo. Y eso es algo que aprendí: que si tienes alguna razón muy fuerte para hacer algo y empiezas a trabajar en ello, debes reconsiderarlo todo de vez en cuando y ver si siguen existiendo los motivos originales. En aquella época tomé la decisión, creo que era correcta, pero quizá haya sido erróneo continuar sin volver a plantearlo. No sé qué hubiera sucedido si lo hubiera reconsiderado. Quizá hubiera decidido seguir de todas formas, no lo sé. Pero la cuestión de no replantearlo cuando las condiciones originales que me hicieron tomar la decisión original habían cambiado, eso es un error.

Después de cinco años estimulantes en Cornell, el doctor Feynman, como muchos otros hombres del este antes y después de él, fue atraído por California y por los igualmente estimulantes ambientes del Instituto de Tecnología de California. Y había otras razones.

En primer lugar, el clima no es bueno en Ithaca. En segundo lugar, me gusta ir a los clubs nocturnos y cosas así.

Bob Bacher me invitó a ir allí a dar una serie de conferencias sobre un trabajo que yo había desarrollado en Cornell. Así que di la conferencia y él me dijo: «¿Quieres que te preste mi automóvil?». Me encantó la idea y cogí su automóvil, y todas las noches me daba una vuelta por Hollywood y Sunset Strip. Pasé unos días muy buenos: esa mezcla de buen clima y un horizonte más amplio que el disponible en una pequeña ciudad al norte del estado de Nueva

York es lo que me convenció finalmente para venir aquí. No fue muy duro. No fue un error. Era otra decisión que no fue un error.

En la facultad del Instituto de Tecnología de California, el doctor Feynman ejerce como Richard Chace Tolman Profesor de Física Teórica. En 1954 recibió el Premio Albert Einstein, y en 1962 la Comisión de Energía Atómica le concedió el Premio E. O. Lawrence por «contribuciones especialmente meritorias al desarrollo, uso y control de la energía atómica». Finalmente, en 1965, recibió el premio científico más importante de todos, el Premio Nobel. Lo compartió con Sin-Itiro Tomonaga de Japón y Julian Schwinger de Harvard. Para el doctor Feynman, el Premio Nobel supuso un rudo despertar.

Sonó el teléfono, el tipo dijo [que era] de alguna emisora de radio. Yo estaba muy molesto porque me hubieran despertado. Esa fue mi reacción natural. Ya saben, uno está medio dormido y fastidiado. Así que el tipo dice: «Nos gustaría informarle de que ha ganado el Premio Nobel». Y yo pienso para mí —vean, aún estoy fastidiado— que eso no estaba registrado. Así que dije: «Podría habérmelo dicho por la mañana». Y él dice: «Pensaba que le gustaría saberlo». Bien, dije que estaba dormido y colgué el teléfono. Mi mujer preguntó: «¿Quién era?», y yo le anuncié: «He ganado el Premio Nobel». «Sigue, me estás tomando el pelo». A menudo he tratado de engañarla pero nunca lo consigo. Cada vez que trato de engañarla ella me descubre, pero esta vez estaba equivocada. Pensaba que yo estaba bromeando. Pensaba que era algún estudiante borracho o algo parecido. Así que

no me creyó. Pero cuando diez minutos más tarde llegó la segunda llamada telefónica procedente de un periódico, le dije al tipo: «Sí, ya lo he oído, déjeme en paz». Luego descolgué el auricular y pensé que iba a volverme a dormir y que a las ocho colgaría de nuevo el auricular. No pude volverme a dormir, y mi mujer tampoco. Me levanté y me puse a andar, y finalmente colgué el auricular y empecé a contestar las llamadas.

Poco tiempo después, iba en taxi a algún lugar y el taxista empieza a hablar y yo hablo con él y le cuento mis problemas con las preguntas que me hacen estos tipos y que yo no sé cómo explicarme. Dice él: «Oí una entrevista que le hicieron a usted, le vi en televisión. Un tipo le preguntó: “¿Querría explicar en dos minutos lo que hizo para ganar el premio?”. Y usted trató de hacerlo y era una locura. ¿Sabe lo que yo hubiera dicho? “Diablos, hombre, si yo pudiera decírselo en dos minutos no hubiera merecido el Premio Nobel”». Así que esa es la respuesta que yo doy desde entonces. Cuando alguien me pregunta, le digo siempre: si yo pudiera explicarlo fácilmente, no hubiera merecido el Premio Nobel. Realmente no es muy limpio, pero es una respuesta divertida.

Como se ha mencionado antes, el doctor Feynman recibió el Premio Nobel por sus contribuciones al desarrollo de una teoría que iba a definir el campo recién emergente de la electrodinámica cuántica. Es, como dice el doctor Feynman, «La teoría de todo lo demás». No se aplica a la energía nuclear o a la fuerza de la gravedad, sino que se

aplica a la interacción de los electrones con las partículas de la luz llamadas fotones. Subyace a la forma en que fluye la electricidad, al fenómeno del magnetismo, y a la forma en que se producen los rayos X e interaccionan con otras formas de materia. El adjetivo «cuántica» en electrodinámica cuántica remite a una teoría de mediados de los años veinte que establece que los electrones que rodean al núcleo de todo átomo están limitados a ciertos estados cuánticos o niveles de energía. Solo pueden estar en dichos niveles y en ningún lugar intermedio. Los niveles cuantizados de energía se determinan por la intensidad de la luz que absorbe el átomo, entre otras cosas.

Una de las mayores y más importantes herramientas de la física teórica es la papelera. Uno tiene que saber cuándo tiene que dejarlo, ¿no? De hecho, yo aprendí casi todo lo que sé sobre electricidad, magnetismo y mecánica cuántica y todo lo demás al intentar desarrollar esta teoría. Y por lo que obtuve en definitiva el Premio Nobel fue porque, en 1947, la teoría habitual para la gente, la teoría ordinaria que yo estaba tratando de corregir y cambiar, se veía en dificultades; por eso es por lo que yo trataba de corregirla. Pero Bethe había descubierto que si uno hace justamente las cosas correctas, si desprecia algunas cosas y no desprecia otras, si hace lo correcto, puede obtener respuestas correctas que se pueden comparar con los experimentos; y él me hizo algunas sugerencias. Por entonces yo sabía bastante de electrodinámica porque había estado ensayando esta teoría loca y la había escrito en 655 formas diferentes; y por eso yo sabía cómo hacer lo que él quería, cómo controlar y organizar este cálculo de una manera muy uniforme y

conveniente, y cómo obtener métodos potentes para hacerlo. En otras palabras, utilicé el material, la maquinaria que había desarrollado para mi propia teoría, y lo apliqué a la vieja teoría — ahora suena bastante obvio, pero no pensé en ello durante años— y descubrí que era extraordinariamente potente para esa época y pude hacer cosas con la vieja teoría de un modo mucho más rápido que lo que cualquiera había hecho antes.

Además de muchas otras cosas, la teoría de la electrodinámica cuántica del doctor Feynman proporciona nuevas ideas para entender las fuerzas que mantienen unida a la materia. También añade algo más a lo que sabemos de las propiedades de las partículas infinitamente pequeñas y de corta vida a partir de las que está compuesta cualquier otra cosa en el universo. A medida que los físicos han penetrado cada vez más en la estructura de la materia, han descubierto que lo que en tiempos parecía muy simple puede ser muy complejo, y que lo que en tiempos parecía muy complejo puede ser muy simple. Sus herramientas son los colisionadores de átomos de alta energía que pueden romper las partículas atómicas en fragmentos cada vez más pequeños.

Para empezar, miremos la materia y vemos muchos fenómenos diferentes: vientos y olas, y la luna y todo este tipo de cosas. Y tratamos de reorganizarlo. ¿Es el movimiento del viento similar al movimiento de las olas, y así sucesivamente? Poco a poco descubrimos que muchas, muchísimas cosas son similares. No hay una variedad tan grande como creíamos. Tenemos todos los

fenómenos y tenemos los principios subyacentes, y uno de los principios más útiles parecía ser la idea de que las cosas están hechas de otras cosas. Descubrimos, por ejemplo, que toda la materia estaba hecha de átomos, y así se entienden muchas cosas a medida que se entienden las propiedades de los átomos. Al principio se supone que los átomos son simples, pero resulta que para explicar todas las variedades y todos los fenómenos de la materia, los átomos tienen que ser más complicados, y que hay 92 tipos de átomos. De hecho, hay muchos más, porque los hay con pesos diferentes. El problema siguiente era comprender la variedad de las propiedades de los átomos. Y descubrimos que podemos comprenderla si hacemos que los propios átomos estén hechos de constituyentes: en este caso concreto, un núcleo en torno al cual giran electrones. Y que los diferentes átomos consisten solo en números diferentes de electrones. Es un sistema bellamente unificador que funciona.

Todos los diferentes átomos son tan solo el mismo objeto con un número diferente de electrones. Sin embargo, los núcleos difieren. Y así empezamos a estudiar los núcleos. Hubo una gran variedad en cuanto empezamos a realizar experimentos haciendo chocar núcleos... Rutherford y todo eso. Esto fue a partir de 1914, y al principio parecía que eran complicados. Pero luego se advirtió que podían entenderse si también están compuestos de constituyentes. Están hechos de protones y neutrones que interaccionan mediante cierta fuerza que los mantiene unidos. Para entender los núcleos

tenemos que entender dicha fuerza un poco mejor. Dicho sea de paso, en el caso de los átomos había también una fuerza: es una fuerza eléctrica y la entendemos. Así que además de los electrones estaba también la fuerza eléctrica, que representamos mediante fotones de luz. La luz y la fuerza eléctrica están integradas en algo llamado fotones, de modo que el mundo exterior, por así decir, el mundo fuera del núcleo consiste en electrones y fotones. Y la teoría del comportamiento de los electrones es la electrodinámica cuántica, y por trabajar en ella es por lo que obtuve el Premio Nobel. Pero ahora entramos en los núcleos y descubrimos que podrían estar formados por protones y neutrones, pero está esta extraña fuerza. Tratar de entender esta fuerza es el siguiente problema. Yukawa sugirió que podría haber otras partículas, y por eso hicimos experimentos haciendo chocar protones y neutrones de alta energía; y realmente salieron cosas nuevas, igual que se producen fotones cuando se hacen chocar electrones de energía suficientemente alta. Así que tenemos estas cosas nuevas que salen. Eran mesones. Parecía entonces que Yukawa tenía razón. Continuamos haciendo experimentos. Y lo que sucedió entonces fue que obtuvimos una tremenda variedad de partículas; no solo un tipo de fotón, ya ven, sino que hicimos chocar fotones y neutrones y obtuvimos más de 400 tipos de partículas diferentes: partículas lambda, partículas sigma... Todas diferentes. Y mesones π y mesones K, y así sucesivamente. Bueno, también obtuvimos muones, dicho sea de paso, pero estos no tienen aparentemente nada que ver con los neutrones y los protones. Al menos no más que los electrones. Se

trata de una extraña pieza extra que no entendemos para qué sirve. Es simplemente como un electrón, pero más pesado. De modo que tenemos electrones y muones que no interaccionan fuertemente con estas otras cosas. A estas otras cosas las llamamos partículas con interacción fuerte, o hadrones. Incluyen a protones y neutrones y todas las cosas que uno obtiene inmediatamente cuando los hace chocar con mucha fuerza. Así que el problema ahora es tratar de representar las propiedades de todas estas partículas de alguna forma organizada. Ese es un gran juego y todos estamos trabajando en ello. Se denomina física de altas energías o física de partículas fundamentales. Se suele llamar física de partículas fundamentales, pero nadie puede creer que 400 constituyentes diferentes sean fundamentales. Otra posibilidad es que ellas mismas estén formadas por algunos constituyentes más profundos; esa parece ser una posibilidad razonable. Por eso se ha inventado una teoría, la teoría de los quarks, según la cual algunas de estas cosas como el protón, por ejemplo, o el neutrón, están formados por tres objetos llamados quarks.

Nadie ha visto todavía un quark; y es mala suerte, porque podrían representar el bloque constituyente fundamental para todos los demás átomos y moléculas complicados que constituyen el universo. El nombre fue escogido, sin que hubiera ninguna razón especial para ello, por un colega del doctor Feynman, Murray Gell-Man, hace algunos años. Para sorpresa del doctor Gell-Man, el novelista irlandés James Joyce ya había anticipado ese nombre treinta años antes en

su libro Finnegan's Wake. La frase clave era «tres quarks por Muster Mark». Esto suponía una coincidencia incluso mayor puesto que, como explicaba el doctor Feynman, los quarks que constituyen las partículas del universo parecen darse en grupos de tres. En la búsqueda de los quarks, los físicos hacen chocar protones y neutrones a energías muy altas con la esperanza de que se dividirán en sus quarks constituyentes.

Muy cierto, y una de las cosas que está retrasando la teoría de los quarks es que obviamente es complicada, porque si las cosas estuvieran hechas de quarks, si hacemos chocar dos protones, deberíamos producir a veces tres quarks. Resulta que en este modelo de quarks del que estamos hablando, los quarks llevan cargas eléctricas muy peculiares. Todas las partículas que conocemos en el mundo tienen cargas enteras. Normalmente una carga eléctrica positiva, una negativa o una carga nula. Pero la teoría de quarks dice que los quarks llevan cargas como menos un tercio o más dos tercios de una carga eléctrica normal. Y si existiera una partícula semejante, se pondría fácilmente de manifiesto porque el número de burbujas que formaría en una cámara de burbujas cuando deja una traza sería mucho [menor]. Supongamos que tuviera una carga de un tercio; entonces excitaría una novena parte —un tercio al cuadrado— de átomos a lo largo de su camino, así que habría una novena parte de átomos en su camino respecto a los que habría en el caso de una partícula ordinaria. Y eso sería evidente; si uno ve una traza débilmente dibujada es que hay algo raro. Y se ha buscado y buscado una traza semejante, y todavía no

se ha encontrado. Así que este es uno de los problemas graves. Ahí está la excitación. ¿Estamos en el camino correcto o estamos dando vueltas en la más completa oscuridad cuando la respuesta está en otra parte?, ¿o la estamos husmeando de cerca y simplemente no la hemos alcanzado todavía? Y cuando la alcancemos, entenderemos de golpe por qué el experimento parecía diferente.

¿Y qué pasa si estos experimentos a alta energía con colisionadores de átomos y cámaras de burbujas muestran que el mundo está hecho de quarks? ¿Seremos capaces de verlos alguna vez de un modo práctico?

Bien, en cuanto al problema de entender los hadrones y los muones y demás, yo no puedo ver por el momento ninguna aplicación práctica en absoluto, o prácticamente ninguna. En el pasado muchas personas decían que no podían ver ninguna aplicación y más adelante se encontraron aplicaciones. Con estos antecedentes, muchas personas prometerían que cualquier cosa está abocada a ser útil. Sin embargo, para ser honesto... Quiero decir que parece ridículo; decir que nunca saldrá nada útil es obviamente una tontería. Así que voy a hacer una tontería y voy a decir que estas malditas cosas nunca tendrán ninguna aplicación, hasta donde puedo prever. Soy demasiado estúpido para verla. ¿Correcto? Entonces, ¿por qué hacerlo? Las aplicaciones no lo son todo en el mundo. También es interesante comprender de qué está hecho el mundo. Es el mismo interés, la misma curiosidad del hombre que le lleva a construir telescopios. ¿Qué utilidad tiene descubrir la edad

del Universo? O ¿qué son esos cuásares que están explotando a grandes distancias? Lo que quiero decir es, ¿qué utilidad tiene toda esa astronomía? No tiene ninguna. De todas formas, es interesante. Es el mismo tipo de exploración de nuestro mundo que yo estoy siguiendo, y es la curiosidad lo que yo estoy satisfaciendo. Si la curiosidad humana representa una necesidad, entonces el intento de satisfacer esta curiosidad es práctico en ese sentido. Así es como yo lo consideraría por el momento. Yo no haría ninguna promesa de que vaya a ser práctico en un sentido económico.

En cuanto a la propia ciencia y a lo que significa para todos nosotros, el doctor Feynman dice que es reactio a filosofar sobre el tema. De todas formas, eso no le impide lanzar algunas ideas interesantes y provocativas acerca de lo que él cree que es y que no es la ciencia.

Bien, diré que es lo mismo que fue siempre desde el día en que empezó. Es la búsqueda de comprensión de algún tema o alguna cosa basada en el principio de que lo que sucede en la naturaleza es verdadero, y esta es el juez de la validez de cualquier teoría sobre ella. Supongamos que Lysenko dice que si uno corta las colas de las ratas durante 500 generaciones, las ratas que nacen luego no tendrán cola. (Yo no sé si él dice eso o no. Digamos que es el señor Jones el que lo dice). Entonces, si uno lo intenta y no funciona, sabemos que no es cierto. Ese principio, la separación de lo verdadero de lo falso mediante el experimento o la experiencia, ese

principio y el cuerpo de conocimiento resultante que es coherente con dicho principio, eso es la ciencia.

Para la ciencia necesitamos también, además del experimento, muchos intentos de generalización por parte del intelecto humano. De modo que no es meramente una colección de todas aquellas cosas que resultan ser ciertas en los experimentos. No es solo una colección de hechos acerca de lo que sucede cuando uno corta colas [de ratas] porque eso sería demasiado para poder guardarlo en nuestras cabezas. Hemos encontrado un gran número de generalizaciones. Por ejemplo, si es cierto para ratas y gatos, decimos que es cierto para los mamíferos. Luego descubrimos que es cierto para otros animales; luego descubrimos que es cierto para las plantas, y finalmente se convierte en una propiedad de la vida hasta cierto nivel y que no heredamos como un carácter adquirido. No es exactamente, absolutamente cierto. Más tarde encontramos experimentos que muestran que las células pueden transmitir información a través de las mitocondrias o alguna otra cosa, de modo que introducimos modificaciones a medida que avanzamos. Pero los principios deben ser lo más amplios posible, deben ser lo más generales posible y seguir estando en completo acuerdo con el experimento: ese es el reto.

Ya ven ustedes, el problema de obtener hechos a partir de la experiencia... suena muy, muy simple. Solo hay que probar y ver. Pero el hombre tiene un carácter débil y resulta que probar y ver es

mucho más difícil de lo que ustedes piensan. Tomemos, por ejemplo, la educación. Cierta persona llega y ve la forma en que la gente enseña matemáticas. Y dice: «Yo tengo una idea mejor. Haré un computador de juguete y les enseñaré con él». Así que lo intenta con un grupo de niños, él no ha conseguido muchos niños, quizá alguien le deja un aula para intentarlo. A él le gusta lo que hace. Está entusiasmado. Entiende muy bien de qué va el asunto. Los chicos saben que es algo nuevo, así que todos están entusiasmados. Aprenden muy, muy bien, y aprenden la aritmética ordinaria mejor que los otros chicos. Así que uno hace un test: ellos aprenden aritmética. Entonces esto se registra como un hecho: que la enseñanza de la aritmética puede mejorarse con este método. Pero no es un hecho, porque una de las condiciones del experimento era que el mismo hombre que lo ideó era el que estaba impartiendo la enseñanza. Lo que realmente quisiéramos saber es lo siguiente: si simplemente se describe este método en un libro a un profesor medio (y uno tiene que tener profesores medios; hay profesores por todo el mundo y debe haber muchos que están en la media), que entonces toma este libro y trata de enseñar con el método descrito, ¿será mejor o no? En otras palabras, lo que sucede es que uno tiene todo tipo de afirmaciones de hechos sobre educación, sobre sociología, incluso psicología..., todo tipo de cosas que son, yo diría, pseudociencia. Se han hecho estadísticas que según dicen estaban hechas con mucho cuidado. Se han hecho experimentos que no son realmente experimentos controlados. [Los resultados] no son realmente repetibles en experimentos controlados. Y se publica todo

este material. Porque la ciencia que se hace con cuidado ha tenido éxito; y se piensa que, haciendo algo parecido, se obtiene algún honor. Yo tengo un ejemplo.

En las islas Solomon, como mucha gente sabe, los nativos no entendían los aviones que llegaban durante la guerra y traían todo tipo de cosas para los soldados. Así que ahora tienen cultos dedicados a los aviones. Construyen pistas de aterrizaje artificiales y encienden hogueras a lo largo de las pistas para imitar las balizas, y un pobre nativo se sienta en una caja de madera que él ha construido, con auriculares de madera y varillas de bambú que representan antenas, y mueve su cabeza atrás y adelante, y hay antenas de radar hechas de madera y todo tipo de cosas con la esperanza de atraer a los aviones para que les dejen cosas. Están imitando la acción. Es lo mismo que hacían los otros tipos. Pues bien, una condenada buena parte de nuestra actividad moderna en muchos, muchísimos campos, es ciencia de este tipo. Un remedo de la aviación. Esa sí es una ciencia. Pero la ciencia de la educación, por ejemplo, no es ciencia en absoluto. Es un montón de trabajo. Requiere un montón de trabajo tallar esas cosas, esos aviones de madera. Pero eso no quiere decir que realmente estén descubriendo algo. La criminología, la reforma penitenciaria —entender por qué la gente comete crímenes; considerar el mundo—, las entendemos cada vez más con nuestra moderna comprensión de estas cosas. Más sobre educación, más sobre crimen; las puntuaciones en los test están bajando y hay más gente en la cárcel; los jóvenes cometen

crímenes, simplemente no lo entendemos. Simplemente no está funcionando, no se descubre nada sobre estas cosas con el tipo de imitación del método científico que están utilizando ahora. Por otra parte, yo no sé si funcionaría el método científico en estos campos si supiéramos cómo hacerlo. Es particularmente débil en este aspecto. Quizá haya algún otro método, por ejemplo, tener en cuenta las ideas del pasado y la experiencia acumulada por la gente durante mucho tiempo. El no prestar atención al pasado solo es una buena idea cuando uno dispone de otra fuente de información independiente y ha decidido seguirla. Pero uno tiene que pensar bien a quién va a seguir si pretende [ignorar] la sabiduría de las personas que han considerado esto y reflexionado sobre ello, y han llegado de forma no científica a una conclusión. Ellos tienen tanto derecho a tener razón como el que uno tiene en los tiempos modernos; a llegar igualmente de forma no científica a una conclusión.

Bien, ¿cómo va eso? ¿Lo estoy haciendo bien como filósofo?

En esta edición del Futuro de la Ciencia —una serie de entrevistas grabadas con laureados Nobel— han oído ustedes al doctor Richard Feynman del Instituto de Tecnología de California. La serie ha sido preparada bajo los auspicios de la Asociación Americana para el Avance de la Ciencia.

Capítulo 13

La relación entre ciencia y religión

En una especie de experimento mental, Feynman adopta los diferentes puntos de vista presentes en un panel imaginario que representara el pensamiento de científicos y espiritualistas, y discute los puntos de acuerdo y de desacuerdo entre ciencia y religión, anticipando en dos décadas el vivo debate actual entre estas dos vías esencialmente diferentes de búsqueda de la verdad. Entre otras cuestiones se pregunta si los ateos pueden tener una moral basada en lo que la ciencia les dice, de la misma forma que los espiritualistas pueden tener una moral basada en su creencia en Dios, un tema inusualmente filosófico para el pragmático Feynman.

En esta época de especialización, los hombres que dominan un campo son a menudo incompetentes para discutir otro. Por esta razón, cada vez son menos frecuentes los debates públicos sobre las relaciones entre aspectos diversos de la actividad humana. Cuando pensamos en los grandes debates del pasado sobre estos temas nos sentimos celosos de aquellos tiempos, pues nos hubiera gustado vivir la emoción de dichas discusiones. Los viejos problemas, tales como el de la relación entre ciencia y religión, siguen con nosotros y creo que presentan los mismos dilemas difíciles de siempre, aunque no se suelen discutir públicamente debido a las limitaciones que conlleva la especialización.

Pero yo llevo mucho tiempo interesado en este problema y me gustaría discutirlo. En vista de mi evidente falta de conocimiento y

comprensión de la religión (una carencia que se irá haciendo cada vez más patente conforme avancemos), voy a ordenar la discusión de este modo: supondré que no es solo un hombre sino un grupo de hombres quienes están discutiendo el problema, que el grupo consta de especialistas en muchos campos —las diversas ciencias, las diversas religiones, etc.— y que vamos a analizar el problema desde varios ángulos, como en un panel. Cada uno va a ofrecer su punto de vista, que podrá ser moldeado y modificado por la discusión posterior. Además, imagino que alguien ha sido elegido por sorteo para ser el primero en presentar sus ideas, y yo he sido el elegido.

Empezaría planteando un problema al panel: un hombre joven, educado en una familia religiosa, estudia una ciencia y, como resultado, empieza a tener dudas —y quizá más tarde deja de creer— en el Dios de su padre. Este no es un caso aislado; sucede una y otra vez. Aunque no tengo estadísticas, creo que muchos científicos —de hecho, creo que mucho más de la mitad de los científicos— dejan de creer realmente en el Dios de sus padres; es decir, no creen en un Dios en el sentido convencional.

Ahora bien, puesto que la creencia en Dios es un aspecto fundamental de la religión, este problema que he seleccionado nos lleva directamente al problema de la relación entre ciencia y religión. ¿Por qué llega este joven a dejar de creer?

La primera respuesta que podríamos oír es muy simple: ya lo ven, ha aprendido de los científicos y (como acabo de señalar) todos ellos son ateos de corazón, de modo que el mal se propaga de uno a otro.

Pero si alguien puede llegar a sostener esta opinión, creo que sabe menos de ciencia que yo de religión.

Otra respuesta posible diría que un conocimiento limitado es peligroso: este joven ha aprendido un poco y piensa que lo sabe todo, pero pronto se le pasará esta sofisticación de principiante y se dará cuenta de que el mundo es más complejo, y empezará a entender de nuevo que debe haber un Dios.

Yo no creo que necesariamente se le pase. Hay muchos científicos que se calificarían a sí mismos de maduros y que siguen sin creer en Dios. De hecho, y como me gustaría explicar más adelante, la respuesta no es que el joven piensa que lo sabe todo: es exactamente lo contrario.

Una tercera respuesta que se podría obtener es que en realidad este joven no entiende la ciencia correctamente. Yo no creo que la ciencia pueda refutar la existencia de Dios; pienso que eso es imposible. Y si es imposible ¿no significa esto que es compatible la creencia en la ciencia con la creencia en un Dios, un Dios ordinario de la religión? Sí, es compatible. A pesar de que he dicho que más de la mitad de los científicos no creen en Dios, hay muchos científicos que *sí* creen en la ciencia y en Dios de un modo perfectamente compatible. Pero esta compatibilidad, aunque posible, no es fácil de alcanzar, y me gustaría discutir dos cosas: por qué no es fácil de alcanzar y si vale la pena intentar alcanzarla.

Por supuesto, cuando digo «creer en Dios» sigue habiendo un misterio: ¿qué es Dios? Lo que yo entiendo por ello es un tipo de Dios personal, característico de las religiones occidentales, a quien

se reza y quien tiene algo que ver con la creación del universo y la guía moral.

Para el estudiante que aprende ciencia hay dos fuentes de dificultad al tratar de conciliar ciencia y religión. La primera fuente de dificultad es esta: que en la ciencia es imperativo dudar; para avanzar en la ciencia es absolutamente necesaria la incertidumbre como una parte fundamental de tu naturaleza interior. Para avanzar en el conocimiento debemos seguir siendo humildes y admitir que no sabemos. Nada es cierto o está probado más allá de toda duda. Uno investiga por curiosidad, porque hay algo *desconocido*, no porque conozca la respuesta. Y a medida que uno obtiene más información en las ciencias, no es que esté descubriendo la verdad, sino que está descubriendo que esto o aquello es más o menos probable.

Es decir, si investigamos más, descubrimos que los enunciados de la ciencia no tratan de lo que es cierto y lo que no es cierto, sino que son enunciados acerca de lo que se conoce con diferentes grados de certeza: «Es mucho más probable que tal y cual cosa sea cierta que no sea cierta»; o «tal y cual cosa es casi segura pero hay todavía algún asomo de duda»; o, en el otro extremo: «bien, realmente no lo sabemos». Todos los conceptos de la ciencia se encuentran en alguna zona intermedia de una escala graduada, pero en ninguno de los extremos, la falsedad absoluta o la verdad absoluta.

Creo que es necesario aceptar esta idea, no solo para la ciencia sino también para otras cosas; es de gran valor reconocer la ignorancia. Es un hecho que, cuando tomamos decisiones en nuestra vida, no

sabemos en absoluto que las estamos tomando correctamente; solo pensamos que lo estamos haciendo lo mejor que podemos; y eso es lo que deberíamos hacer.

Contenido:

§. *Actitud de incertidumbre*

§. *La creencia en Dios y los hechos de la ciencia*

§. *El comunismo y el punto de vista científico*

§. *Interconexiones*

§. *La ciencia y las cuestiones morales*

§. *Las herencias de la civilización occidental*

§. Actitud de incertidumbre

Creo que una vez que sabemos que realmente vivimos en la incertidumbre, deberíamos admitirlo; tiene gran valor ser conscientes de que no conocemos las respuestas a diferentes preguntas. Esta actitud mental —esta actitud de incertidumbre— es vital para el científico, y es esta actitud mental la que debe adquirir en primer lugar el estudiante. Llega a ser un hábito del pensamiento. Una vez adquirida, uno ya no puede dar marcha atrás.

Lo que sucede, entonces, es que el joven empieza a dudar de todas las cosas porque no puede tenerlas como una verdad absoluta. Y así hay un ligero cambio en la pregunta de «¿Existe un Dios?» a «¿Hasta qué punto es seguro que existe un Dios?». Este cambio muy sutil es un gran golpe y supone una separación entre los caminos de la

ciencia y la religión. Yo no creo que un auténtico científico pueda volver a creer en lo mismo que creía antes. Aunque hay científicos que creen en Dios, no creo que piensen en él de la misma forma que lo hacen las personas religiosas. Si son coherentes con su ciencia, pienso que ellos se dicen algo parecido a esto: «Yo estoy casi seguro de que existe un Dios. La duda es muy pequeña». Esto es muy diferente de decir: «Yo sé que existe un Dios». No creo que un científico pueda alcanzar nunca ese punto de vista, esa comprensión realmente religiosa, ese conocimiento real de que existe un Dios: esa certeza absoluta que tienen las personas religiosas.

Por supuesto, este proceso de duda no siempre empieza abordando la pregunta de la existencia de Dios. Normalmente se someten primero a examen algunos principios especiales, tales como la cuestión del más allá, o detalles de la doctrina religiosa, como los detalles de la vida de Cristo. Es más interesante, no obstante, ir derechos y francos al tema central, y discutir el punto de vista más extremo que duda de la existencia de Dios.

Una vez que la pregunta ha perdido su carácter absoluto, y se desliza por la escala de la incertidumbre, puede terminar en posiciones muy diferentes. En muchos casos la conclusión es muy próxima a la certeza. Pero en otros, por el contrario, el resultado neto de un examen riguroso de la teoría que mantenía su padre respecto a Dios puede ser la afirmación de que es falsa casi con certeza.

§. La creencia en Dios y los hechos de la ciencia

Esto nos lleva a la segunda dificultad que encuentra nuestro estudiante para conciliar ciencia y religión. ¿Por qué se concluye a menudo que la creencia en Dios —al menos, el Dios del tipo religioso— se considera muy poco razonable, muy poco probable? Pienso que la respuesta tiene que ver con las cosas científicas —los hechos o los hechos parciales— que el hombre aprende.

Por ejemplo, el tamaño del universo es impresionante; nosotros estamos montados en una minúscula partícula que da vueltas alrededor de un Sol entre cien mil millones de soles en esta galaxia, que a su vez es una entre mil millones de galaxias.

Además, está la íntima relación entre el hombre biológico y los animales, y entre una forma de vida y otra. El hombre es un recién llegado a un vasto drama en desarrollo; ¿es posible que todo lo demás sea tan solo un andamio para su creación? Y también están los átomos de los que todo parece estar construido, siguiendo leyes inmutables. Nada puede escapar a ello; las estrellas están hechas del mismo material, y los animales están hechos del mismo material, pero con tal complejidad como para aparecer misteriosamente vivos, como el propio hombre.

Es una gran aventura contemplar el universo más allá del hombre, pensar en lo que significa sin el hombre, como lo fue durante la mayor parte de su larga historia, y lo es en la inmensa mayoría de los lugares. Cuando finalmente se alcanza esta visión objetiva y se aprecian el misterio y la majestad de la materia, volver la mirada objetiva al hombre visto como materia, para ver la vida como parte

de un misterio universal de la máxima profundidad, es sentir una experiencia que apenas se puede describir. Normalmente acaba en risas ante la inutilidad de intentar comprender. Estas visiones científicas acaban en sobrecogimiento y misterio, perdidos en el borde de la incertidumbre, pero parecen tan profundas y tan impresionantes que la teoría de que todo está dispuesto simplemente como un escenario para que Dios observe la lucha del hombre entre el bien y el mal parece insuficiente.

Así que supongamos que este es el caso de nuestro estudiante concreto, y que crece en él la convicción de que, por ejemplo, la oración individual no es oída. (No estoy tratando de refutar la realidad de Dios; estoy tratando de darles una idea de las razones por las que muchos llegan a pensar que la oración carece de sentido). Por supuesto, y como resultado de esta duda, la pauta de la duda se orienta a los problemas éticos; porque, en la religión que él aprendió, los problemas morales estaban relacionados con la palabra de Dios, y si ese Dios no existe, ¿cuál es su palabra? Pero, al final, y de forma bastante sorprendente, creo yo, los problemas morales quedan relativamente intactos; es posible que al principio el estudiante decida que algunas pocas cosas eran erróneas, pero con frecuencia cambia luego de opinión y termina con un punto de vista moral que no es fundamentalmente diferente del inicial.

Parece haber una especie de independencia en estas ideas. Al final, es posible dudar de la divinidad de Cristo y, pese a todo, creer firmemente que es bueno comportarte con tu prójimo como quisieras que él se comporte contigo. Es posible tener estas dos

ideas al mismo tiempo; y espero que ustedes encuentren que mis colegas científicos ateos se suelen conducir bien en sociedad.

§. El comunismo y el punto de vista científico

Me gustaría comentar, de pasada, y puesto que la palabra «ateísmo» está estrechamente relacionada con «comunismo», que las ideas comunistas son la antítesis de lo científico, en el sentido de que en el comunismo se dan respuestas a todas las preguntas —preguntas políticas tanto como morales— sin ninguna discusión y ninguna duda. El punto de vista científico es exactamente lo contrario; es decir, todas las cuestiones deben ser puestas en duda y discutidas; debemos discutir todo: observar las cosas, comprobarlas, y por lo tanto cambiarlas. El gobierno democrático está mucho más próximo a esta idea, porque hay discusión y hay oportunidad de modificación. No se lanza la nave en una dirección definida. Es cierto que cuando hay una tiranía de ideas, de modo que se sabe exactamente lo que tiene que ser cierto, se actúa con mucha decisión, y eso parece bueno... durante un tiempo. Pero la nave se enfila inmediatamente en la dirección errónea, y ya nadie puede modificar la dirección. De modo que las incertidumbres de la vida en una democracia son, creo yo, mucho más compatibles con la ciencia.

Aunque la ciencia tiene cierto impacto en muchas ideas religiosas, ella no afecta al contenido moral. La religión tiene muchos aspectos; responde a todo tipo de preguntas. En primer lugar, por ejemplo, responde a preguntas acerca de qué son las cosas, de dónde

proceden, qué es el hombre, qué es Dios, las propiedades de Dios y todo eso. Llamemos a esto el aspecto metafísico de la religión. También nos dice otra cosa: cómo debemos comportarnos. No me refiero a cómo hay que comportarse en ciertas ceremonias, y qué ritos hay que llevar a cabo; dejemos eso aparte. Lo que quiero decir es que nos indica cómo debemos comportarnos en la vida en general, de una forma moral. Da respuestas a cuestiones morales; ofrece un código moral y ético. Llamemos a esto el aspecto ético de la religión.

Ahora bien, nosotros sabemos que, incluso con valores morales aceptados, los seres humanos son muy débiles; hay que recordarles los valores morales para que puedan seguir a sus conciencias. No se trata simplemente de tener una conciencia recta; es también una cuestión de mantener la fortaleza para hacer lo que se sabe que es correcto. Y es necesario que la religión dé fortaleza y consuelo, e inspiración para seguir estas ideas morales. Este es el aspecto inspirativo de la religión. Ofrece inspiración no solo para la conducta moral: ofrece inspiración para las artes y para todo tipo de grandes pensamientos y acciones.

§. Interconexiones

Estos tres aspectos de la religión están interconectados y, en vista de esta estrecha integración de ideas, se tiene en general la sensación de que atacar un aspecto del sistema es atacar a la estructura entera. Los tres aspectos están conectados más o menos de la siguiente forma: el aspecto moral, el código moral, es la

palabra de Dios, que nos implica en una cuestión metafísica. Luego viene la inspiración porque uno está haciendo la voluntad de Dios; uno es para Dios; en parte uno siente que está con Dios. Y esto es una gran inspiración porque pone las acciones propias en contacto con el universo en conjunto.

Así que estas tres cosas están muy bien interconectadas. La dificultad es esta: que la ciencia entra a veces en conflicto con la primera de las tres categorías, con el aspecto metafísico de la religión. Por ejemplo, en el pasado hubo una discusión acerca de si la Tierra era el centro del universo, y si la Tierra se movía alrededor del Sol o permanecía inmóvil. El resultado de todo esto fueron terribles luchas y calamidades, pero finalmente se resolvió (con la retirada de la religión en este caso concreto). Más recientemente hubo un conflicto sobre la cuestión de si el hombre tiene una ascendencia animal.

El resultado en muchas de estas situaciones es una retirada de la visión metafísica religiosa, pero de ninguna manera hay un colapso de la religión. Y además no parece haber ningún cambio apreciable o fundamental en la visión moral.

Después de todo, ¿es que si la Tierra se mueve alrededor del Sol ya no es mejor poner la otra mejilla? ¿Supone alguna diferencia el que la Tierra esté inmóvil o que se mueva alrededor del Sol? Cabe esperar un nuevo conflicto. La ciencia se desarrolla y se descubrirán nuevas cosas en las que estará en desacuerdo con la teoría metafísica actual de ciertas religiones. De hecho, incluso con todas las retiradas pasadas de la religión, todavía hay conflictos reales

para individuos concretos cuando aprenden acerca de la ciencia y oyen hablar de la religión. La cosa no se ha integrado muy bien; hay aquí conflictos reales, y pese a todo la moral no se ve afectada.

Como cuestión de hecho, el conflicto es doblemente difícil en esta región metafísica. Para empezar, los hechos pueden estar en conflicto, pero, incluso si no lo estuvieran, la actitud es diferente. El espíritu de incertidumbre en la ciencia supone una actitud hacia las cuestiones metafísicas completamente diferente de la certeza y la fe que se exige en la religión. Hay definitivamente un conflicto, creo yo —tanto en hechos como en espíritu— en los aspectos metafísicos de la religión.

En mi opinión, no es posible que la religión encuentre un conjunto de ideas metafísicas que garanticen que no se va a entrar en conflicto con una ciencia en continuo avance y en continuo cambio, una ciencia que se adentra en lo desconocido. No sabemos cómo responder a las preguntas; es imposible encontrar una respuesta que algún día no se descubra que es falsa. La dificultad surge porque la ciencia y la religión están aquí tratando de responder a preguntas en el mismo dominio.

§. La ciencia y las cuestiones morales

Por el contrario, yo no creo que surja un conflicto real con la ciencia en el aspecto ético, porque creo que las cuestiones morales están fuera del dominio científico.

Permítanme dar tres o cuatro argumentos para mostrar por qué creo esto. En primer lugar, ha habido conflictos en el pasado entre

la visión científica y la religiosa acerca del aspecto metafísico y, pese a todo, las más antiguas visiones morales no colapsan, no cambian. Segundo, hay hombres buenos que practican la ética cristiana y que no creen en la divinidad de Cristo. Ellos mismos no encuentran aquí ninguna incompatibilidad.

En tercer lugar, aunque creo que de vez en cuando aparece alguna evidencia científica que podría interpretarse como prueba en apoyo de algún aspecto concreto de la vida de Cristo, o de otras ideas metafísicas religiosas, me parece que no hay ninguna evidencia científica que apoye la regla de oro. Creo que es de algún modo diferente.

Veamos si puedo dar una pequeña explicación filosófica de por qué es diferente, de por qué la ciencia no puede afectar a la base fundamental de la moral.

Un problema humano típico, uno al que la religión pretende ofrecer respuesta, se plantea siempre de la forma siguiente. ¿Debería yo hacer esto? ¿Deberíamos nosotros hacer esto? ¿Debería el gobierno hacer esto? Para responder a esta pregunta, podemos dividirla en dos partes. Primera: si yo hago esto, ¿qué sucederá? Y segunda: ¿Quiero yo que eso suceda? ¿Qué de valor —o de bueno— saldría de ello?

Ahora bien, una pregunta como: si yo hago esto, ¿qué sucederá?, es estrictamente científica. De hecho, la ciencia puede definirse como un método para tratar de responder solo a preguntas que pueden plantearse como: si yo hago esto, ¿qué sucederá?, y el cuerpo de conocimientos que así se obtiene. La técnica consiste esencialmente

en esto: pruébalo y observa. Entonces uno reúne una gran cantidad de información a partir de tales experimentos. Todos los científicos estarán de acuerdo en que una pregunta —cualquier pregunta, ya sea filosófica o de otro tipo— que no pueda plantearse en una forma que pueda ponerse a prueba mediante el experimento (o, en términos sencillos, que no pueda plantearse en la forma: si yo hago esto, ¿qué sucederá?) no es una pregunta científica; está fuera del dominio de la ciencia.

Yo afirmo que lo que uno quiere que suceda, el valor que pueda tener el resultado y cómo se juzga dicho valor (que es el otro extremo de la pregunta: ¿debería yo hacer esto?), todo eso debería estar fuera de la ciencia porque no es una pregunta que se pueda responder con solo saber lo que sucede. Uno aún tiene que *juzgar* lo que sucede, de una manera moral. Así, por esta razón teórica, creo que hay una completa compatibilidad entre la visión moral —o el aspecto ético de la religión— y la información científica.

Volver al tercer aspecto de la religión —el aspecto inspirativo— me lleva a la pregunta fundamental que me gustaría plantear a este panel imaginario. La fuente de inspiración actual —para fortaleza y consuelo— en cualquier religión está estrechamente entrelazada con el aspecto metafísico. Es decir, la inspiración proviene de trabajar para Dios, de obedecer su voluntad, sintiéndose uno con Dios. Los lazos emocionales con un código moral basado de esta manera empiezan a debilitarse seriamente cuando se expresan dudas, por pequeñas que sean, respecto a la existencia de Dios. Por eso,

cuando la creencia en Dios se hace insegura, este método de obtener inspiración empieza a fallar.

Yo no conozco la respuesta a este problema central: el problema de mantener el valor real de la religión como fuente de fortaleza y ánimo para la mayoría de los hombres y, al mismo tiempo, no exigir una fe absoluta en los aspectos metafísicos.

§. Las herencias de la civilización occidental

La civilización occidental, a mi modo de ver, se mantiene sobre dos grandes herencias. Una es el espíritu científico de aventura: la aventura en lo desconocido, que debe ser reconocido como desconocido para ser explorado; la exigencia de los misterios irresolubles del universo que siguen sin respuesta; la actitud de que todo es incierto; en resumen: la humildad del intelecto. La otra gran herencia es la ética cristiana: la acción basada en el amor, la hermandad de todos los hombres, el valor del individuo, la humildad del espíritu.

Estas dos herencias son lógicamente y completamente compatibles. Pero la lógica no lo es todo; uno necesita su propio corazón para seguir una idea. Si la gente vuelve a la religión, ¿a qué está volviendo? ¿Es la Iglesia moderna un lugar para dar consuelo a un hombre que duda de Dios; más aún, a uno que no cree en Dios? ¿Es la Iglesia moderna un lugar para dar consuelo y aliento al valor de tales dudas? Hasta ahora, ¿no hemos extraído fortaleza y consuelo para mantener una u otra de estas herencias compatibles de un modo que ataque a los valores de la otra? ¿Es esto inevitable?

¿Cómo podemos obtener inspiración para mantener estos dos pilares de la civilización occidental de modo que puedan permanecer juntos con pleno vigor, sin temerse uno a otro? ¿No es este el problema central de nuestro tiempo?

Lo propongo al panel para su discusión.

Procedencias

«El placer de descubrir» es la transcripción corregida de una entrevista con Richard P. Feynman que fue emitida como un programa de televisión en la BBC2 llamado *Horizon: El placer de descubrir*. Está reimpreso con permiso del productor Christopher Syckes, Carl Feynman y Michelle Feynman.

«Los computadores del futuro» fue publicado originalmente en 1985 como una Nishina Memorial Lecture. Aquí está reimpreso con permiso del profesor K. Nishijima en representación de la Nishina Memorial Foundation.

«Los Álamos desde abajo» fue publicado originalmente por el Instituto de Tecnología de California en la revista *Engineering and Science*. Está reimpreso con permiso.

«Cuál es y cuál debería ser el papel de la cultura científica en la sociedad moderna» está reimpreso con permiso de la Sociedad Italiana de Física.

«Hay mucho sitio al fondo» fue publicado originalmente por el Instituto de Tecnología de California en la revista *Engineering and Science*. Está reimpreso con permiso.

«El valor de la ciencia» procede de *Qué te importa lo que piensen los demás: aventuras de un personaje curioso* tal como se las contó Richard P. Feynman a Ralph Leighton. Copyright 1988 por Gweneth Feynman y Ralph Leighton. Reimpreso con permiso de W. W. Norton & Company, Inc.

«¿Qué es la ciencia?» está reimpreso con permiso de *The Physics Teacher*, volumen 9, pp. 313-320. Copyright 1969 American Association of Physics Teachers.

«Ciencia tipo “cultos cargo”: discurso de la ceremonia de graduación en Caltech en 1974» fue publicado originalmente por el Instituto de Tecnología de California en la revista *Engineering and Science*. Está reimpreso con permiso.

«Tan sencillo como uno, dos, tres» procede de *Qué te importa lo que piensen los demás: aventuras de un personaje curioso* tal como se las contó Richard P. Feynman a Ralph Leighton. Copyright 1988 por Gweneth Feynman y Ralph Leighton. Reimpreso con permiso de W. W. Norton & Company, Inc.

«La relación entre ciencia y religión» fue publicado originalmente por el Instituto de Tecnología de California en la revista *Engineering and Science*. Está reimpreso con permiso.

Sobre el autor

RICHARD PHILLIPS FEYNMAN (Nueva York, Estados Unidos, 11 de mayo de 1918 - Los Ángeles, California, Estados Unidos, 15 de febrero de 1988). Físico teórico estadounidense. Revisó todo el panorama de la electrodinámica cuántica, y revolucionó el modo en que la ciencia entendía la naturaleza de las ondas y las partículas elementales. En 1965 compartió el Premio Nobel de Física con el estadounidense Julian S. Schwinger y el japonés Tomonaga Shinichiro, científicos que de forma independiente desarrollaron teorías análogas a la de Feynman, aunque la labor de este último destaca por su originalidad y alcance. Las herramientas que ideó para resolver los problemas que se le plantearon, como, por ejemplo, las representaciones gráficas de las interacciones entre partículas conocidas como diagramas de Feynman, o las denominadas integrales de Feynman, permitieron el avance en muchas áreas de la física teórica a lo largo del período iniciado tras la Segunda Guerra Mundial.



Descendiente de judíos rusos y polacos, estudió física en el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y se doctoró luego en la Universidad de Princeton, donde colaboró en el desarrollo de la física atómica entre 1941 y 1942. Los tres años siguientes lideró el grupo de jóvenes físicos teóricos que colaboraron en el Proyecto Manhattan

en el laboratorio secreto de Los Álamos, bajo la dirección de Hans Bethe.

En los años cincuenta justificó, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, la teoría macroscópica del físico soviético L. D. Landau, que daba explicación al estado superfluido del helio líquido a temperaturas cercanas al cero absoluto, estado caracterizado por la extraña ausencia de fuerzas de rozamiento.

En 1968 trabajó en el acelerador de partículas de Stanford, período en el que introdujo la teoría de los partones, hipotéticas partículas localizadas en el núcleo atómico, que daría pie más tarde a la introducción del moderno concepto de quark. Su aportación a la física teórica ha quedado recogida en títulos tales como *Quantum electrodynamics* (1961) y *The theory of fundamental processes* (1961).