

I. UNA FUNCIÓN PARA LOS EXPERIMENTOS MENTALES*

T. S. KUHN

Más de una vez los experimentos mentales han desempeñado un papel de crítica importante en el desarrollo de la ciencia física. El historiador, cuando menos, debe reconocerlos como un útil ocasionalmente poderoso para aumentar la comprensión de la naturaleza por parte del hombre. No obstante, está lejos de ser claro cómo han tenido efectos considerables.

A menudo, como ocurre en el caso del tren de Einstein alcanzado por el rayo en ambos extremos, se ocupan de situaciones que no han sido examinadas en el laboratorio.¹ A veces, como sucede en el caso del microscopio de Bohr-Heisenberg, postulan situa-

* Tomado de *L'aventure de la science, Mélanges Alexandre Koyré*, vol. 2, pp. 307-334, Hermann, París, 1964. Con autorización.

¹ El célebre experimento del tren aparece por primera vez en la popularización de la teoría de la relatividad, de Einstein, *Ueber die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie (Gemeinverständlich)* (Brunswick, 1916). En la quinta edición (1920), que yo he consultado, el experimento aparece descrito en las pp. 14-19. Nótese que este experimento mental sólo es una versión simplificada del empleado en el primer artículo de Einstein sobre la relatividad, "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik* 17, 1905, pp. 891-921. En aquel original experimento mental sólo se emplea una señal luminosa, reflejos en un espejo que ocupa el lugar del otro.

ciones que no pudieron examinarse plenamente y que no es necesario que acontezcan para nada en la naturaleza.²

Esta situación hace surgir una serie de enigmas, tres de los cuales serán examinados en esta obra por medio del análisis extenso de un solo ejemplo. Ningún experimento mental puede, por supuesto, explicar todos aquellos que han sido históricamente significativos. La categoría "experimento mental" es en todo caso demasiado amplia y demasiado vaga para que la tomemos como epítome. Muchos experimentos mentales difieren del que examinamos aquí. Pero este ejemplo particular, tomado de la obra de Galileo, tiene un interés propio, y ese interés se ve aumentado por su evidente parecido con ciertos experimentos mentales que resultaron efectivos en la reformulación de la física durante el siglo xx. Aun cuando no analizaré este punto o cuestión, sugiero que el ejemplo pertenece típicamente a una clase importante.

Los principales problemas ocasionados por el es-

² W. Heisenberg, "Ueber den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik* 43, 1927, pp. 172-198. N. Bohr, "The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory", *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici, 11-20 Settembre 1927*, vol. 2, Bolonia, 1928, pp. 565-588. El argumento empieza tratando al electrón como partícula clásica, y analiza su trayectoria antes y después de su colisión con el fotón que se emplea para determinar su posición o velocidad. El resultado debe mostrar que estas mediciones no pueden efectuarse clásicamente y que, por tanto, la descripción inicial ha supuesto más de lo que permite la mecánica cuántica. Sin embargo, tal violación del principio de la mecánica cuántica no disminuye la importancia del experimento mental.

tudio de los experimentos mentales pueden formularse en una serie de preguntas (En primer lugar, puesto que la situación imaginada en un experimento mental, claramente puede no ser arbitraria, ¿a qué condiciones de verosimilitud está sujeta? ¿En qué sentido y en qué extensión puede la situación ser de tal índole que la naturaleza pueda presentarla o lo ha hecho en realidad?) Ese enigma, a su vez, señala un segundo enigma. Concediendo que todo experimento mental feliz incluya en su diseño alguna información acerca del mundo, esa información no está en sí misma en disputa en el experimento. Por el contrario, si tenemos que ver con un verdadero experimento mental, los datos empíricos en que se apoya debieron de ser bien conocidos y generalmente aceptados antes de haber concebido el experimento. ¿Cómo, entonces, apoyado exclusivamente en datos familiares, puede un experimento mental conducir a un nuevo conocimiento o a una nueva comprensión de la naturaleza? Finalmente, ¿para formular la tercera pregunta de manera más breve, ¿qué clase de nuevo conocimiento o comprensión puede producirse así? ¿Qué esperan aprender los científicos de los experimentos mentales?

Existe un conjunto bastante sencillo de respuestas a estas preguntas y lo elaboraré con ilustraciones tomadas tanto de la historia como de la psicología, en las dos secciones que siguen a continuación. Dichas respuestas —que son claramente importantes pero que, creo, no absolutamente acertadas— sugieren que la nueva comprensión producida por los experimentos mentales no es una comprensión de la

to mental consiste en ayudar a eliminar la confusión anterior obligando al científico a reconocer las contradicciones inherentes a su manera de pensar desde el principio. A diferencia del descubrimiento de nuevo conocimiento, la eliminación de la confusión existente no significa la exigencia de adicionales datos empíricos, como tampoco es necesario que la situación imaginada aparezca realmente en la naturaleza. Por el contrario, el experimento mental cuya finalidad es eliminar la confusión, está sujeto a una sola condición de verosimilitud. La situación imaginada debe ser una situación a la cual el científico pueda aplicar sus conceptos de la manera en que normalmente los ha empleado antes.

Como son muy convincentes, y como se relacionan estrechamente con la tradición filosófica, estas respuestas requieren un examen detallado y respetuoso. Además, una mirada a ellas nos dará herramientas analíticas esenciales. No obstante, omiten importantes rasgos de la situación histórica en la cual funcionan los experimentos mentales y por lo tanto, en las últimas dos secciones de este trabajo se buscarán respuestas de una clase algo diferente. La tercera sección en particular sugerirá que conduce significativamente al error describir como "contradictoria" o "confusa" la situación del científico antes de la realización del pertinente experimento mental. Estamos más cerca de la verdad si afirmamos que los experimentos mentales ayudan a los científicos a encontrar leyes y teorías diferentes de las que sostenían antes. En este caso, el conocimiento anterior puede haber sido "confuso" y "contradictorio" sólo en el sentido bastante especial y completamente ahistórico que atribuye la confusión

y la contradicción a todas las leyes y teorías que el progreso científico ha obligado a rechazar. Sin embargo, inevitablemente esa descripción sugiere que los efectos de la experimentación mental aun cuando no presente datos nuevos, se acerca mucho más a los de la experimentación real de la que se ha supuesto por lo general. En la última sección intentaremos sugerir cómo pudo suceder esto.

El contexto histórico dentro del cual los verdaderos experimentos mentales ayudan a la reformulación o al reajuste de conceptos existentes es por fuerza extraordinariamente complejo. Por tanto, comienzo con uno más sencillo, por no ser histórico y he escogido con este propósito una transposición conceptual inducida en el laboratorio por el brillante psicólogo infantil suizo Jean Piaget. La justificación de esta aparente desviación de nuestro tema se irá presentando a medida que avancemos. Piaget se ocupa de los niños, exponiéndolos a una auténtica situación de laboratorio y después formulándoles preguntas acerca de dicho experimento. Sin embargo, en sujetos poco más maduros, el mismo efecto habría podido producirse sólo con preguntas y sin recurrir a ninguna exhibición física. Si las mismas preguntas se hubiesen autogenerado, nos enfrentaríamos a una situación pura de experimentación mental que será mostrada en la siguiente sección, tomando el material de la obra de Galileo. Puesto que, por añadido, la particular transposición inducida por el experimento de Galileo es prácticamente la misma producida por Piaget en el laboratorio, podemos aprender mucho comenzando con el caso más elemental.

En la situación de laboratorio de Piaget, se mues-

tran a los niños dos automóviles de juguete de diferentes colores, uno rojo y el otro azul.³ Durante cada exposición experimental, avanzan ambos autos uniformemente en una línea recta. En algunas ocasiones ambos cubrirán la misma distancia pero en diferentes intervalos de tiempo. En otras exposiciones, los tiempos requeridos fueron los mismos pero uno de los autos cubriría una mayor distancia. Finalmente, hubo varios experimentos en los cuales ni las distancias ni los tiempos fueron los mismos. Después de cada carrera, Piaget preguntaba a sus sujetos cuál de los autos se había movido con más ligereza y cómo podía afirmarlo el niño.

Al analizar cómo respondían los niños a las preguntas limito mi atención a un grupo intermedio, con la edad suficiente para aprender algo de los experimentos, y lo bastante pequeño como para que sus respuestas no sean las que un adulto podría dar. Las más de las veces, los niños de este grupo describen como "más rápido" el automóvil que alcanza la meta primero o que corre durante la mayor parte del movimiento. Además, solían continuar aplicando el término de esa manera aun cuando reconocieran que el automóvil "más lento" podía recorrer más espacio que el auto "más ligero" en el mismo tiempo. Examinemos, por ejemplo, una exposición en la que ambos autos partieron de la misma línea, pero en la cual el rojo partió más tarde y luego alcanzó al azul en la meta. Así pues, es típico el siguiente diálogo, con la respuesta del niño

3 J. Piaget, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, París, 1946, particularmente capítulos 6 y 7. Los experimentos descritos más adelante se encuentran en un capítulo posterior.

en cursivas. "¿Partieron al mismo tiempo?"—No, el azul partió primero. "¿Llegaron juntos?"—Sí. "¿Fue uno de los dos más rápido, o fueron iguales?"—El azul fue más rápido.⁴ Esas respuestas manifiestan lo que, en bien de la simplicidad, llamaré el criterio de "llegada a la meta" para la aplicación de "más ligero".

Si la llegada a la meta fuera el único criterio empleado por los niños de Piaget no habría nada que los experimentos por sí solos pudieran enseñarles. Podríamos llegar a la conclusión de que su concepto de "más rápido" era diferente del de un adulto pero que, puesto que lo empleaban congruentemente, sólo la intervención de la autoridad paterna o pedagógica podría inducir al cambio. Sin embargo, otros experimentos revelan la existencia de un segundo criterio, e incluso el experimento que acabamos de describir puede hacerlo así. Casi inmediatamente después de registrar la exposición mencionada, fue reajustado el aparato de modo que el auto rojo empezara muy tarde y tuviera que ser movido especialmente y con rapidez suficiente para ponerse a la par del azul al llegar a la meta. En este caso, el diálogo con el mismo niño fue de la siguiente manera. "¿Corrió uno más rápidamente que el otro?"—El rojo. "¿Cómo lo sabes?"—LO HE VISTO.⁵ Al parecer, cuando los movimientos son suficientemente rápidos, pueden ser percibidos en forma directa y como tales

4 *Ibid.*, p. 160.

5 *Ibid.*, p. 161, las cursivas son mías. En este pasaje he traducido *plus fort* como más pronto; en el pasaje anterior, en francés decía *plus vite*. Sin embargo, los propios experimentos indican que en este contexto, aunque tal vez no en todos, las respuestas a las preguntas *plus fort* y *plus vite* son las mismas.

por los niños (compárese la manera como los adultos "ven" el movimiento de la segunda manecilla de un reloj, con la forma en que observan el cambio de posición del minutero). Algunas veces los niños emplean esa percepción directa del movimiento al identificar el auto más rápido. Por falta de un término más adecuado, llamaré al criterio correspondiente "confusión perceptual".

Es la coexistencia de estos dos criterios, la llegada a la meta y la confusión perceptual, lo que hace posible que los niños aprendan en un laboratorio de Piaget. Incluso sin el laboratorio, tarde o temprano la naturaleza enseñaría la misma lección como a los niños mayores en el grupo de Piaget. No muy a menudo (o los niños no habrían conservado el concepto por tan largo tiempo) sino ocasionalmente, la naturaleza presentará una situación en la cual un cuerpo cuya velocidad percibida directamente sea más lenta y que, sin embargo, llegue primero a la meta. En este caso las dos claves entran en conflicto; es posible que el niño sea movido a decir que ambos cuerpos son "más ligeros" o ambos "más lentos", o que el mismo cuerpo es a la vez "más rápido" y "más lento". Esta experiencia paradójica es la que se genera en el laboratorio de Piaget, con resultados a veces sorprendentes. Sometidos a un solo experimento paradójico, los niños dirán primero que un cuerpo fue "más rápido" y luego aplicarán inmediatamente la misma etiqueta al otro. Sus respuestas se vuelven críticamente dependientes de diferencias menores en el arreglo experimental y en la formulación de las preguntas. Por último, al darse cuenta de la oscilación aparentemente arbitraria de sus respuestas, los niños que son más inteligentes o

que están mejor preparados descubrirán o inventarán la concepción adulta de "más rápido". Con un poco de práctica algunos de ellos la emplearán en el futuro de manera congruente. Esos son los niños que han aprendido de su contacto con el laboratorio de Piaget.

Más para retomar al conjunto de preguntas que motivaron esta investigación, ¿qué diremos que han aprendido, y de qué? Por el momento me limito a una serie mínima y algo tradicional de las respuestas que constituirá el punto de partida para una sección posterior. Debido a que incluyó dos criterios independientes para aplicar la relación conceptual "más rápido", el aparato mental que los niños de Piaget llevaron a su laboratorio contiene una contradicción implícita. En el laboratorio, el efecto causado por una situación nueva, que incluye las dos exposiciones y el interrogatorio, obligó a los niños a tomar conciencia de esa contradicción. Como resultado, algunos de ellos cambiaron su concepto de "más rápido", acaso bifturcándolo. El concepto original fue dividido en algo parecido a la concepción adulta de "más rápido" y el concepto de "alcanzar la meta primero". El aparato conceptual de los niños probablemente fue entonces más rico y ciertamente más adecuado. Han aprendido a evitar un considerable error conceptual y, de esta manera, a pensar con mayor claridad.

A su vez, esas respuestas ofrecen otra, pues apuntan a la condición única que las situaciones experimentales de Piaget deben satisfacer para lograr una finalidad pedagógica. Es obvio que esas situaciones no necesariamente son arbitrarias. Un psicólogo podría, por razones completamente distintas, pregun-

tarle a un niño si un árbol o una col fueron más rápidos; además, es probable que obtuviera una respuesta,⁶ pero el niño no aprendería a pensar con más claridad. Para lograrlo, la situación que se le presenta debe ser pertinente. Debe, por así decirlo, mostrar las claves que habitualmente emplea cuando hace afirmaciones acerca de la velocidad relativa. Por otro lado, aunque las claves deben ser normales, la situación plena no necesariamente tiene que serlo. Si se le presenta una historieta animada mostrando movimientos paradójicos, el niño llegará a las mismas conclusiones acerca de sus conceptos, aunque la naturaleza misma estuviera gobernada por la ley de que los cuerpos más rápidos siempre llegan primero a la meta. No hay, pues, ninguna condición de verosimilitud física. El experimentador puede imaginar cualquier situación que le plazca siempre que permita la aplicación de claves normales.

Tomaremos ahora un caso histórico, pero por lo demás similar, de revisión conceptual, promovido éste por el análisis cercano de una situación imaginaria. Como sucede con los niños en el laboratorio de Piaget, la *Física* de Aristóteles y la tradición que proviene de ella nos da la evidencia de dos criterios diferentes empleados en discusiones acerca de la velocidad. El punto de vista general es muy conocido, pero debemos recalcarlo. En la mayoría de los casos, Aristóteles considera el movimiento o el cambio (es muy común que ambos términos sean inter-

⁶ Preguntas como éstas fueron empleadas por Charles E. Osgood para obtener la que llama él "perfil semántico" de varias palabras. Véase su libro reciente, *The Measurement of Meaning*, Urbana, Ill., 1957.

cambiables en su física) como un cambio de estado. Así "todo cambio es de algo a algo, como lo indica la propia palabra *metabole*".⁷ La reiteración por Aristóteles de afirmaciones como ésta indica que normalmente veía cualquier movimiento que no fuera de cuerpo celeste como un acto finito y completo que debía ser captado como una totalidad. Por consiguiente, mide la cantidad y la velocidad de un movimiento en función de los parámetros que describen sus puntos extremos, el *termini a quo* y el *ad quem* de la física medieval.

Las consecuencias del concepto aristotélico de velocidad son a la vez inmediatas y obvias. Como lo dice él mismo: "El más rápido de dos objetos atravesará una mayor magnitud en un tiempo igual, una magnitud igual en menos tiempo, y una mayor magnitud en menos tiempo."⁸ O si no, "es velocidad igual cuando el *mismo* cambio se logra en un tiempo igual".⁹ En estos pasajes, como en muchas otras partes de los escritos de Aristóteles, la concepción implícita de velocidad es muy parecida a lo que podríamos llamar "velocidad media"; cantidad equivalente a la proporción de la distancia total respecto al tiempo total transcurrido. Como en el caso del criterio de llegada a la meta, definido por los niños, esta manera de apreciar la velocidad difiere de la nuestra. Pero, asimismo, la diferencia no causará daño, siempre que el criterio de velocidad promediado sea, en sí mismo, empleado congruentemente.

⁷ Aristóteles, *Física*, trad. al inglés R. P. Hardie y R. K. Gaye, en *The Works of Aristotle*, vol. 2, Oxford, 1930, pp. 224^b 35-225^a1.

⁸ *Ibid.*, 232^a 25-27.

⁹ *Ibid.*, 249^b 4-5.

Sin embargo, como lo que ocurre a los niños de Piaget, desde un punto de vista moderno, Aristóteles no siempre es totalmente coherente. También él parece que posee un criterio parecido a la confusión perceptual del niño para juzgar la velocidad. En particular, algunas veces discrimina entre la velocidad de un cuerpo cerca del comienzo y cerca del final de su movimiento. Por ejemplo, al distinguir los movimientos naturales o provocados, que terminan en descenso, de los movimientos violentos, que requieren de alguien exterior, afirma lo siguiente: "Pero mientras la velocidad de aquello que llega a una parada parece aumentar siempre, la velocidad de aquello que es empujado violentamente parece siempre decrecer."¹⁰ Aquí, como en algunos pasajes similares, no se hace mención al punto final, a la distancia cubierta o al tiempo transcurrido. En lugar de ello, Aristóteles está captando de manera directa y acaso perceptual un aspecto del movimiento que describimos como "velocidad instantánea" y que tiene propiedades completamente distintas de la velocidad promedio. Empero, Aristóteles no hace esa distinción. De hecho, como lo veremos más adelante, importantes aspectos de su física son condicionados por su incapacidad para discriminar. Como resultado, aquellos que usan el concepto aristotélico de velocidad pueden verse frente a paradojas muy parecidas a aquellas con las cuales Piaget confrontaba a sus niños.

Examinaremos a continuación el experimento mental que Galileo empleó para hacer evidentes estas paradojas. Pero del primer experimento señalamos en la época de Galileo el concepto de velocidad ya no era

¹⁰ *Ibid.*, 230^a, 23^b, 5.

el mismo sostenido por Aristóteles. Las famosas técnicas analíticas desarrolladas durante el siglo XIV para tratar la latitud de las formas habían enriquecido el aparato conceptual disponible para los estudiosos del movimiento. En particular, introdujo una diferenciación entre la velocidad total de un movimiento, por un lado, y la intensidad de velocidad en cada punto del movimiento, por el otro. El segundo de estos conceptos se acercaba mucho al moderno concepto de velocidad instantánea; el primero, aunque sólo después de algunas importantes revisiones de Galileo, era un gran paso hacia la concepción contemporánea de la velocidad promedio.¹¹ Parte de la paradoja implícita en el concepto aristotélico de la velocidad fue eliminada durante la Edad Media, es decir dos siglos y medio antes de que Galileo escribiera su teoría.

Aquella transformación medieval de los conceptos fue, sin embargo, incompleta en un sentido importante. La latitud de las formas puede emplearse para la comparación de dos movimientos diferentes sólo si ambos tienen la misma "extensión", cubren la misma distancia, es decir, consumen el mismo tiempo. La afirmación de Richard Swineshead acerca de la regla mertoniana puede servir para hacer evidente esta limitación también frecuentemente descuidada: si un incremento de la velocidad fuese uniformemente adquirido, entonces "ese mismo espacio sería atravesado por medio de ese incremento... como por medio de un grado inferior [o intensidad

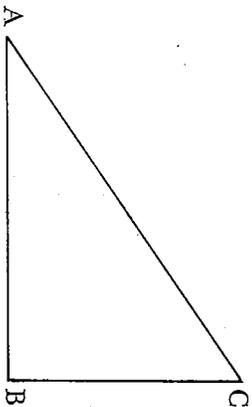
¹¹ Para un análisis detallado de toda la cuestión de la latitud de las formas, véase Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages*, Madison, Wis., 1959, Segunda Parte.

de la velocidad] de ese incremento suponiendo que algo fuese a desplazarse con ese grado inferior [de velocidad] en todo es tiempo".¹² Aquí, el tiempo transcurrido debe ser el mismo para ambos movimientos, o de lo contrario la técnica de la comparación falla. Si los tiempos transcurridos pudieran ser diferentes, entonces un movimiento uniforme de menor intensidad pero de larga duración podría tener una velocidad total mayor que un movimiento más intenso (es decir, con mayor velocidad instantánea) que durara sólo un corto tiempo. En general, los analistas medievales del movimiento eludían esta dificultad potencial restringiendo su atención a comparaciones que sus técnicas pudieran explicar. Sin embargo, Galileo exigió una técnica más general y al desarrollarla (o cuando menos al enseñarla a otros) empleó un experimento mental que ponía toda la paradoja aristotélica en primer plano. Tenemos dos garantías de que la dificultad era todavía muy real a comienzos del siglo XVII. Una de ellas es la agudeza pedagógica de Galileo; su texto iba dirigido a problemas reales. Más impresionante, quizá, es el hecho de que el propio Galileo no siempre logró eludir la dificultad.¹³

¹² *Ibid.*, p. 290.

¹³ El lapso más importante de esta índole ocurre en "El Segundo Día" del *Diálogo de los dos sistemas universales*, de Galileo (véase la traducción al inglés por Stillman Drake, Berkeley, 1953, pp. 199-201). Galileo arguye allí que ningún cuerpo material, por muy ligero que sea, será arrojado de una Tierra en rotación aun si la Tierra gira mucho más rápidamente de lo que en realidad hace. Tal resultado (que el sistema de Galileo requiere: su lapso, aunque sin duda no deliberado, tampoco es inmotivado) se logra tratando la velocidad terminal de un movimiento uniforme-

El experimento pertinente aparece casi al principio de "El Primer Día" en el *Diálogo sobre los dos sistemas del mundo*, de Galileo.¹⁴ Salviati, quien habla en nombre de Galileo, pide a sus dos interlocu-



tores que imaginen dos planos, *CB* vertical y *CA* inclinado, erigidos a la misma distancia vertical encima de un plano horizontal, *AB*. Para ayudar a la imaginación, Salviati incluye un dibujo como el que presentamos en esta misma página. A lo largo de estos dos planos hay que imaginar que dos cuerpos se deslizan o ruedan sin fricción desde un determinado punto de partida común en *C*. Finalmente, Salviati pide a sus interlocutores suponer que cuando los cuerpos que se deslizan lleguen a *A* y *B*, respectivamente, habrán adquirido el mismo ímpetu o velocidad, la velocidad necesaria, por así decirlo,

mente acelerado como si fuera proporcional a la distancia recorrida por el movimiento. Desde luego, la proporción es consecuencia directa de la regla mertoniana, pero sólo es aplicable a movimientos que requieran el mismo tiempo. Los notas de Drake a este pasaje deben examinarse, ya que aportan una interpretación un tanto diferente.

¹⁴ *Ibid.*, pp. 22-27.

para llevarlos nuevamente a la altura vertical de la cual partieron.¹⁵ También esto es concedido y Salviati procede a preguntar a los participantes en el diálogo cuál de los dos cuerpos se desplaza más velozmente. Su propósito es hacerles comprender que, empleando el concepto de velocidad por entones corriente pueden verse obligados a admitir que el desplazamiento a lo largo del plano perpendicular es al mismo tiempo más rápido que, igual en velocidad y más lento que el desplazamiento a lo largo del plano inclinado. Su objetivo es en este caso hacer que, con esta paradoja, sus interlocutores y lectores se den cuenta de que la velocidad no debe atribuirse a la totalidad de un movimiento sino más bien a sus partes. En suma el experimento mental es, como lo señala el propio Galileo, una propedéutica a la plena discusión del movimiento uniforme y acelerado que tiene lugar en "el tercer discurso" de su obra *Dos nuevas ciencias*. Condensaré y sistematizaré considerablemente el argumento mismo, pues no es necesario que nos interese el detallado toma y daca del discurso. Cuando se les pregunta por primera vez cuál de los cuerpos es más rápido, los interlocutores dan la respuesta a la que todos llegamos, aunque los físicos que se encuentran entre nosotros deberían saberlo mejor. El desplazamiento a lo largo de la perpendicular, dicen, es obviamente

¹⁵ Galileo hace de esta concesión un empleo ligeramente menor del que yo haré más adelante. Hablando estrictamente, su argumento no depende de ella si el plano CA puede extenderse más allá de A y si el cuerpo que rueda a lo largo del plano extendido continúa ganando velocidad. Por simplicidad, limitaré mi recapitulación sistemática al plano no extendido, siguiendo la clave aportada por Galileo en la primera parte de su texto.

el más rápido.¹⁶ Aquí, se combinan dos de los tres criterios que ya hemos encontrado. Aunque ambos cuerpos están en movimiento, aquel que se mueve a lo largo de la perpendicular es el "más confuso o borroso". Además el movimiento perpendicular es el que llega primero a la meta.

Esta respuesta obvia e inmensamente atractiva, sin embargo, plantea al punto dificultades que primero son reconocidas por el más inteligente de los interlocutores, Sagredo. Señala (o muy cercanamente; estoy haciendo esta parte del argumento un poco más ceñida que en el original) que la respuesta es incompatible con la concesión inicial. Puesto que ambos cuerpos parten de estar en reposo y como ambos adquieren la misma velocidad final, deben tener la misma velocidad media. ¿Cómo es posible, entonces, que uno sea más ligero que el otro? En este punto, Salviati vuelve a entrar en la discusión, para recordar a sus oyentes que el más ligero de dos movimientos generalmente se define como aquel que cubre la misma distancia en menos tiempo. Sugiere que parte de la dificultad se debe al intento de comparar dos movimientos que cubren diferentes distancias; en lugar de ello, arguye, los participantes en el diálogo debieran comparar los tiempos que requirieran los dos cuerpos al desplazarse sobre una distancia que sea común. Como norma escoge la longitud del plano vertical CB.

¹⁶ Cualquiera que dude de que ésta es una respuesta muy tentadora y natural debe plantear la pregunta de Galileo, como yo lo he hecho, a estudiantes graduados en física. A menos que previamente se les diga lo que estará en cuestión, muchos de ellos darán la misma respuesta de los interlocutores de Salviati.

Empero, esto sólo empeora el problema. *CA* es más largo que *CB*, y la respuesta a la pregunta sobre qué cuerpo se mueve con más rapidez pasa a depender críticamente de dónde, a lo largo del declive *CA*, se mide la longitud estándar *CB*. Si se mide desde lo alto de la inclinación, entonces el cuerpo que se desplaza en la perpendicular completará su movimiento en menos tiempo que el cuerpo que está en el plano inclinado requiere para recorrer una distancia igual a *CB*. El desplazamiento a lo largo de la perpendicular es, por ende, más rápido. Por otro lado, si la distancia estándar se mide desde el extremo inferior de la inclinación, el cuerpo que se desplaza por la perpendicular necesitará más tiempo para completar su movimiento que el cuerpo sobre la inclinación necesitará para moverse en la misma distancia estándard. Por lo tanto, el movimiento a lo largo de la perpendicular es más lento. Por último, sostiene Salvati, si la distancia *CB* es trazada a lo largo de alguna parte interna apropiada de la inclinación, entonces el tiempo necesario para que los dos cuerpos atraviesen los dos segmentos estándard será el mismo. El desplazamiento sobre la perpendicular tiene la misma velocidad que el de la inclinación. A esta altura, el diálogo ha ofrecido tres respuestas, cada una de ellas incompatible con las otras, a una pregunta única acerca de una situación única.

El resultado, por supuesto, es la paradoja, y éstas es la manera, o una de ellas, en que Galileo preparaba a sus contemporáneos para un cambio de los conceptos empleados al discutir, analizar o experimentar acerca del movimiento. Aunque los nuevos conceptos no fueron desarrollados plenamente para el público hasta la aparición de las *Dos nuevas cien-*

cias, el *Diálogo*. . . ya muestra hacia dónde se encamina el argumento. "Más rápido" y "velocidad" no deben usarse de la manera tradicional. Podemos decir que en un instante particular, un cuerpo tiene una velocidad instantánea mayor que la que otro cuerpo tiene en el mismo periodo en otro instante específico. O bien puede afirmarse que un cuerpo particular recorre una distancia particular más rápidamente que otro que atraviése la misma distancia u otra. Pero los dos tipos de afirmaciones no describen las mismas características del movimiento. "Más rápido" significa algo diferente cuando se aplica, por un lado, a la comparación de promedios instantáneos de desplazamiento en instantes particulares y, por el otro, a la comparación de los tiempos requeridos para que se complete la totalidad de dos movimientos específicos. Un cuerpo puede ser "más rápido" en un sentido y no en el otro.

Esa reforma conceptual es lo que el experimento mental de Galileo ayudó a enseñar, y por ende, podemos formular nuestras antiguas preguntas acerca de ello. Evidentemente, las respuestas mínimas son las mismas que obtenemos al analizar el resultado de los experimentos de Piaget. Los conceptos que Aristóteles aplicó al estudio del movimiento eran en alguna parte contradictorios, y la contradicción no fue eliminada mentalmente durante la Edad Media. El experimento mental de Galileo colocó la dificultad en el primer plano, enfrentando a sus lectores a la paradoja implícita en su forma de pensar. Resultado: les ayudó a modificar su aparato conceptual.

Si todo esto es verdadero, entonces podemos observar el criterio de verosimilitud al cual el experimento mental necesariamente debe adaptarse. No

existe ninguna diferencia en el argumento de Galileo sobre si los cuerpos realmente ejecutan en forma acelerada y uniforme un movimiento cuando se desplazan por los planos inclinado y vertical. Tampoco importa si, cuando las alturas de estos planos son las mismas, los dos cuerpos realmente alcanzan iguales velocidades instantáneas en la parte inferior. Galileo no se molesta en analizar estos puntos. Para su finalidad en esta parte del *Diálogo*, basta que podamos suponer estas cosas. Por otro lado, no se sigue de allí que la elección de la situación experimental por Galileo pueda ser arbitraria. Por ejemplo, él no pudo sugerir que consideremos una situación en que el cuerpo se desvanezca al comienzo de su desplazamiento desde C y luego reaparezca poco tiempo después en A sin haber atravesado la distancia intermedia. Ese experimento ilustraría las limitaciones de la aplicabilidad de "más rápido", pero, cuando menos hasta el reconocimiento de los saltos cuánticos, estas limitaciones no fueron informativas. A partir de ellas, ni nosotros ni los lectores de Galileo podemos aprender algo respecto a los conceptos tradicionalmente empleados. Nunca se pensó aplicar tales conceptos a un caso de esa especie. En suma, para que esta clase de experimentos mentales sean eficaces, deben permitir a quienes los desarrollan o los estudian, emplear conceptos de la misma manera en que han sido empleados antes. Sólo si se cumple con esta condición puede el experimento mental mostrar a su público consecuencias no previstas de sus operaciones conceptuales normales.

A estas alturas, partes esenciales de mi argumento han sido condicionadas por lo que yo considero

como una posición filosófica tradicional en el análisis del pensamiento científico cuando menos desde el siglo XVII.

Para que un experimento mental tenga eficacia, debe presentar, como ya lo hemos visto, una situación normal, es decir, una situación en que quien analiza el experimento se sienta bien equipado por la experiencia anterior. Nada acerca de la situación imaginada puede ser enteramente desconocido. Por tanto, si el experimento depende, como debe ser, de una anterior experiencia, dicha experiencia debe ser en general familiar, antes de que se emprendiera el experimento. Este aspecto de la situación experimental mental parece dictar una de las conclusiones que hasta ahora he sacado continuamente; como no implica una nueva información sobre el mundo, un experimento mental no puede enseñar nada que no fuera conocido antes. O más bien, no puede enseñar nada acerca del mundo. En cambio, enseña al científico cosas respecto a su aparato mental. Su función se limita a la corrección de anteriores errores conceptuales.

No obstante, sospecho que algunos historiadores de la ciencia pueden sentirse incómodos ante esta conclusión, y sugiero que otros deberían estarlo. Hasta cierto punto, la conclusión recuerda demasiado la posición familiar que considera a la teoría toloomeca, la teoría del flogisto, o la teoría térmica como meros errores, confusiones o dogmatismos que una ciencia más liberal o inteligente debió evitar desde el comienzo. En la atmósfera de la historiografía contemporánea, evaluaciones como éstas han llegado a ser cada vez menos plausibles, y el mismo aire de improbabilidad afecta la conclusión que yo

he presentado en este trabajo. Aunque no físico experimental, Aristóteles era un brillante lógico. ¿Habrá cometido, en un asunto tan fundamental para su física, un error tan elemental como el que le hemos atribuido? O si lo ha hecho, ¿habrán sus sucesores durante casi dos milenios continuado el mismo error elemental? ¿Puede una confusión lógica ser todo lo que va implícito, y puede la función de los experimentos mentales ser tan trivial como lo indica este total punto de vista? Creo que la respuesta a todas estas preguntas es "no", y que la raíz de la dificultad está en suponer que, como se apoyan exclusivamente en datos muy conocidos, los experimentos mentales no pueden enseñar nada acerca del mundo. Aunque el vocabulario epistemológico contemporáneo no ofrece locuciones útiles, ahora quiero argüir que de los experimentos mentales la mayoría de la gente aprende sobre sus conceptos y sobre el mundo, a la vez. Al aprender acerca del concepto de la velocidad, los lectores de Galileo también aprenden algo respecto a cómo se desplazan los cuerpos. Lo que sucede con ellos es muy parecido a lo que le ocurre a un hombre, como Lavoisier, que debe asimilar el resultado de un nuevo e inesperado descubrimiento experimental.¹⁷

Al acercarnos a esta serie de cuestiones centrales, primero pregunto qué pudo querer significar cuando describe el concepto infantil de "más rápido" y el concepto aristotélico de velocidad como "contradictorio" o "confuso". "Contradictorio", cuando me- nos, sugiere que estos conceptos son como el famoso

¹⁷ Esta observación presupone un análisis de la manera en que surgen nuevos descubrimientos, para lo cual véase mi [5].

ejemplo del lógico acerca de la cuadratura del círculo, pero eso no puede ser perfectamente cierto. La cuadratura del círculo es contradictoria en el sentido de que no puede ser ejemplificada en ningún mundo posible. Ni siquiera podemos imaginar un objeto que tuviera estas cualidades requeridas. Ni el concepto del niño ni el de Aristóteles son, sin embargo, contradictorios en ese sentido. El concepto infantil de más ligero aparece repetidamente ejemplificado en nuestro propio mundo; la contradicción sólo surge cuando se enfrenta al niño con esa especie relativamente rara de movimiento, en el cual el objeto perceptualmente *más* borroso o confuso *retarda* la llegada a la meta. De manera similar, el concepto de velocidad de Aristóteles con sus dos normas simultáneas, puede aplicarse sin dificultad a la mayoría de los movimientos que vemos a nuestro alrededor. Los problemas surgen únicamente para la clase de movimientos, también en este caso bastante raros, en que el criterio de velocidad instantánea y el de velocidad promedio nos conducen a respuestas contradictorias en las aplicaciones cualitativas. En estos dos casos, los conceptos son contradictorios sólo en el sentido de que el individuo que los emplea *corre el riesgo* de la contradicción. Puede, por así decirlo, encontrarse en una situación en que se vea obligado a dar respuestas incompatibles a una sola y única pregunta.

Por supuesto, no es esto lo que se quiere significar cuando se aplica el término "contradictorio" a un concepto. Sin embargo, puede suceder que eso sea lo que tenemos en mente cuando describimos los conceptos examinados antes como "confuso" o "inadecuado para el pensamiento claro". Ciertamente,

esos términos se ajustan mejor a la situación. Empero, implican una norma para la claridad y la adecuación que acaso no tengamos el derecho de aplicar. ¿Debemos exigirles a nuestros conceptos, como no lo hacemos ni podemos hacerlo a nuestras leyes y teorías, que sean aplicables a cualquiera y a todas las situaciones que pudieran surgir en algún mundo posible? ¿No basta exigir a un concepto, como lo hacemos con una ley o teoría, que sea inequívocamente aplicable a toda situación que podamos encontrar?

Para comprender la pertinencia de esas preguntas, imaginemos un mundo en el cual todos los movimientos ocurren a una velocidad uniforme (esa condición es más severa que necesaria, pero hará que el argumento sea más claro. La condición más débil requerida es que ningún cuerpo que sea "más lento", según cualquier criterio, podrá jamás alcanzar a un cuerpo "más ligero". Llamaré "quasiuniformes" a los movimientos que satisfacen esta situación más débil). En un mundo de esta índole, el concepto aristotélico de velocidad no podría ser amenazado jamás por una situación física real, porque la velocidad instantánea y media de cualquier movimiento sería siempre la misma.¹⁸ ¿Qué diríamos entonces si encontrásemos a un científico de este mundo imaginario empleando continuamente el concepto

¹⁸ También podemos imaginar un mundo en que las dos normas empleadas por los niños de Piaget nunca conducirían a contradicción, pero es más complejo y por tanto no haré uso de ello en el argumento siguiente. Sin embargo, permítaseme arriesgar una conjetura que puede ponerse a prueba, acerca de la naturaleza del movimiento en tal mundo. A menos que imiten a sus mayores, los niños que consideraran el movimiento a la manera antes descrita deben

aristotélico de velocidad? No diríamos, creo yo, que está confundido. Nada puede ocurrirle a su ciencia o lógica debido a su aplicación del concepto. En cambio, dada nuestra propia experiencia más amplia, y nuestro aparato conceptual correspondiente más rico, es probable que diríamos que, consciente o inconscientemente, él ha incluido en su concepto de velocidad su esperanza de que sólo movimientos uniformes ocurrirían en su mundo. Es decir, llegaríamos a la conclusión de que su concepto funcionó en parte como ley de la naturaleza, una ley que regularmente se satisface en su mundo, pero a la que sólo en ocasiones le sucedería lo mismo en el nuestro.

Por supuesto, en el caso de Aristóteles no podemos decir todo esto. Él sabía, y en ocasiones lo reconoce, que los cuerpos en caída, por ejemplo, aumentan su velocidad a medida que avanzan. Por otra parte, hay muchas pruebas de que Aristóteles mantuvo esta información en la periferia misma de su conciencia científica. Cada vez que pudo hacerlo, lo cual fue frecuente, consideró a los movimientos como uniformes o como si poseyeran las propiedades del movimiento uniforme, y los resultados fueran trascendentes para la mayor parte de su física. Por ejemplo, en la sección anterior examinamos un párrafo tomado de la *Física* que puede pasar por definición de movimiento "más rápido": "La más rápida de dos cosas atraviesa una gran magnitud en igual tiempo, una magnitud igual en menos tiempo y una

ser relativamente insensibles a la importancia de una desventaja en el resultado de una carrera. En cambio, todo parecería depender de la violencia con que se mueven brazos y piernas.

magnitud más grande en menos tiempo." Comparamos esto con el pasaje que inmediatamente le sigue: "Supongamos que *A* es más rápido que *B*. Ahora bien, puesto que de dos cosas la que cambia más pronto es más rápida, en el tiempo *FG*, en el cual *A* ha cambiado de *C* a *D*, *B* no habrá llegado todavía a *D* pero estará cerca."¹⁹ Esta afirmación ya no es toda una definición. En lugar de ello, se refiere al comportamiento físico de los cuerpos "más rápidos" y, en consecuencia, sólo se ocupa de los cuerpos que tienen un movimiento uniforme o casi uniforme.²⁰ Todo el experimento mental de Galileo tiende a demostrar que esta afirmación y otras parecidas a ella —afirmaciones que parecen ser la inevitable consecuencia de la única definición que el concepto tradicional de "más ligero" apoyará— no son aplicables al mundo tal como lo conocemos y que el concepto, por ende, requiere modificación. No obstante, Aristóteles procede a construir su concepción del movimiento como "cuasiuniforme" en lo más profundo de la urdimbre de su sistema.

Por ejemplo, en el párrafo que sigue inmediatamente a aquel del cual tomamos las afirmaciones anteriores, emplea esas afirmaciones para demostrar que el espacio debe ser continuo si el tiempo lo es. Su argumento depende del supuesto, implícito antes, de que si un cuerpo *B* queda detrás de otro cuerpo *A* al final de un desplazamiento, debió de retrasarse en

¹⁹ Aristóteles, *Obras*, 2, 232^a 28-31.

²⁰ En realidad, desde luego, el primer pasaje no puede ser una definición. Cualquiera de las tres condiciones allí enunciadas podría tener tal función, pero tomar las tres como equivalentes, cual lo hace Aristóteles, tiene las mismas implicaciones físicas que yo ilustro aquí, tomado del segundo pasaje.

todos los puntos intermedios. En tal caso, *B* puede usarse para dividir el espacio y *A* para dividir el tiempo. Si uno es continuo, el otro también debe serlo.²¹ Sin embargo, infortunadamente el supuesto no se sostiene, por ejemplo, si el movimiento más lento se desacelera y el más ligero se acelera, y sin embargo Aristóteles no ve ninguna necesidad de excluir movimientos de esa especie. Nuevamente, aquí el argumento depende del que Aristóteles atribuye a todos los movimientos las propiedades cualitativas del cambio uniforme.

La misma concepción del movimiento sostiene los argumentos con los cuales Aristóteles desarrolla sus llamadas leyes cuantitativas del movimiento.²² Para ilustración, sólo consideremos cómo la distancia cubierta depende del tamaño del cuerpo y del tiempo transcurrido: "Entonces, si el motor *A* ha movido

²¹ Aristóteles, *Obras*, 2, 232^b 21-233^a 13.

²² Estas leyes siempre se describen como "cuantitativas", y yo seguiré este uso. Pero resulta difícil creer que pretendieran ser cuantitativas en el sentido de tal término que es corriente en el estudio del movimiento desde Galileo. Tanto en la antigüedad como en la Edad Media, los hombres que regularmente consideraron que la medición era pertinente a la astronomía y que ocasionalmente la emplearon en la óptica analizaron esas leyes del movimiento sin una referencia, así fuera velada, a cualquier tipo de observación cuantitativa. Además, las leyes nunca se aplican a la naturaleza salvo en argumentos que dependen de una *reductio ad absurdum*. A mí, su intención me parece cualitativa; son un enunciado, empleando el vocabulario de las proporciones, de varias regularidades cualitativas correctamente observadas. Esta opinión puede parecer más convincente si recordamos que después de Eudoxio, aún la proporción geométrica fue regularmente interpretada como no-numérica.

a B hasta la distancia C , en un tiempo D , entonces en el mismo tiempo la misma fuerza A , moverá $\frac{1}{2}B$ dos veces la distancia C y en un $\frac{1}{2}D$ moverá $\frac{1}{2}B$ toda la distancia C ; pues así se observarán las reglas de la proporción.²³ Es decir, con esas fuerzas y ese medio, la distancia cubierta varía directamente con el tiempo e inversamente con el tamaño del cuerpo.

Para los oídos modernos esta ley resulta inevitablemente extraña, aunque no tanto como usualmente ha parecido.²⁴ Pero dado el concepto aristotélico de velocidad—un concepto que no provoca problemas en la mayoría de sus aplicaciones—resulta la única ley sencilla disponible. Si el movimiento es tal que la velocidad media y la instantánea son idénticas, entonces, *ceteris paribus*, la distancia recorrida debe ser proporcional al tiempo. Si, por añadidura, suponemos con Aristóteles (y con Newton) que “dos fuerzas, cada una de las cuales lleva por separado uno o dos pesos a una determinada distancia en un punto determinado... moverán los pesos combinados a igual distancia en un tiempo igual”, entonces la velocidad debe ser alguna función de la proporción de la fuerza respecto al tamaño del cuerpo.²⁵ La ley de Aristóteles se deriva de aquí directamente al suponer que la función es la más sencilla disponible: la proporción misma. Acaso ésta no pareciera una manera legítima de llegar a las leyes del movi-

²³ Aristóteles, *Obras*, 2, 249^b 30-250^a 4.

²⁴ Para una crítica congruente de quienes consideran que esta ley es simplemente absurda, véase Stephen Toulmin, “Criticism in the History of Science: Newton on Absolute Space, Time and Motion, I”, *Philosophical Review* 68, 1959, pp. 1-29, particularmente la nota número 1.

²⁵ Aristóteles, *Obras*, 2, 250^a 25-28.

miento, pero los procedimientos de Galileo eran con frecuencia idénticos.²⁶ En este aspecto particular lo que principalmente diferencia a Galileo de Aristóteles es que el primero comenzó con una distinta concepción de la velocidad. Puesto que él no vio todos los movimientos como casi uniformes, la velocidad no fue la única medida de movimiento que podía cambiar al aplicarse una fuerza, el tamaño del cuerpo, etcétera. Galileo también pudo tomar en cuenta las variaciones de la aceleración.

Estos ejemplos podrían multiplicarse de manera considerable, pero mi concepción puede ya verse claramente. El concepto aristotélico de velocidad, en el cual se fundía algo como los modernos conceptos separados de velocidad promedio y velocidad instantánea, fue parte integral de toda su teoría acerca del movimiento y tuvo implicaciones en toda su física. Pudo desempeñar ese papel porque no era simplemente una definición, confusa o no. En lugar de ello, tuvo implicaciones físicas y actuó en parte como ley de la naturaleza. Esas implicaciones nunca pudieron ser desafiadas por la observación o la lógica en un mundo en que todos los movimientos eran

²⁶ Por ejemplo, “Por tanto, cuando observo una piedra que inicialmente estaba en reposo y que cae de una posición elevada y que continuamente adquiere nuevos incrementos de velocidad, ¿por qué no he de creer que tales aumentos ocurren de un modo que es excesivamente sencillo y bastante obvio para cualquiera? Si, ahora, examinamos cuidadosamente la cuestión, no encontramos adición o incremento más sencillo del que se repite siempre de la misma manera.” Cf. Galileo Galilei, *Dialogues Concerning Two New Sciences* (Trad. H. Crew y A. de Salvio), Evans-ton y Chicago, 1946, pp. 154-155. Sin embargo, Galileo sí procedió a hacer una verificación experimental.

uniformes o casi uniformes, y Aristóteles actuó como si viviera en un mundo así. En realidad, por supuesto, su mundo era diferente, pero aun así su concepto funcionaba tan bien que los potenciales conflictivos con la observación pasaban completamente inadvertidos. Y mientras eso ocurrió —hasta que, por así decirlo, las dificultades potenciales de la aplicación del concepto comenzaron a volverse reales— no podemos decir que el concepto aristotélico de la velocidad sea confuso. Claro que podemos decir que estaba “equivocado” o que era “falso” en el mismo sentido en que aplicamos esos términos a las leyes y las teorías anticuadas. Además, podemos afirmar que como el concepto era falso, los hombres que las empleaban *tenían que confundirse*, como les sucede a los interlocutores de Salviati. Pero no podemos, según creo, encontrar algún defecto intrínseco en el concepto mismo. Sus defectos no estriban en su coherencia lógica sino en su incapacidad para adecuarse a la fina estructura del mundo al cual se espera que pueda aplicarse. Por ello, aprender a reconocer sus defectos equivale necesariamente a aprender acerca del mundo, así como también acerca del concepto.

Si el contenido legislativo de los conceptos individuales parece una concepción poco conocida, ello se debe probablemente al contexto dentro del cual lo he enfocado aquí. A los lingüistas, hace mucho tiempo que esta cuestión les resulta familiar, aunque controvertida, por los escritos de B. L. Whorf²⁷ y Braithwaite, siguiendo a Ramsey, ha desarrollado

²⁷ B. L. Whorf, *Language, Thought, and Reality: Selected Writings*, John B. Carroll (comp.), Cambridge, Mass., 1956.

una tesis similar usando modelos lógicos para demostrar la inextricable mezcla de ley y definición que debe caracterizar la función incluso de conceptos científicos relativamente elementales.²⁸ Más acordes con la cuestión son las varias discusiones lógicas recientes acerca del uso de “frases de reducción” al formar conceptos científicos. Se trata de frases que especifican (de una manera lógica que aquí no nos interesa) las condiciones de observación o prueba a las cuales puede someterse un concepto determinado. En la práctica, corren estrechamente paralelas a los contextos en que la mayoría de los conceptos científicos se adquieren en la realidad, y ello hace que sus dos características más sobresalientes sean de particular significación. En primer lugar, se requieren varias frases de reducción —a veces muchísimas— para dar a un concepto determinado la gama de aplicación requerida para su uso en la teoría científica. En segundo lugar, tan pronto como se utiliza una frase de reducción para introducir un concepto único, esas oraciones implican “ciertas afirmaciones que tienen el carácter de leyes empíricas... Conjuntos de oraciones de reducción combinan de manera peculiar las funciones de concepto y de formación de teorías”.²⁹ Esta cita, con la oración que

²⁸ R. B. Braithwaite, *Scientific Explanation*, (Cambridge, 1953), pp. 50-87. Y véase también W. V. O. Quine, “Two Dogmas of Empiricism”, en *From a Logical Point of View*, Cambridge, Mass., 1953, pp. 20-46.

²⁹ C. G. Hempel, *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, vol. 2, núm. 7, en la *International Encyclopedia of Unified Science*, Chicago, 1952. La discusión fundamental de las frases sobre reducción se encuentra en Rudolph Carnap, “Testability and Meaning”, *Philosophy of Science* 3, 1936, pp. 420-471, y 4, 1937, pp. 2-40.

la precede, describe muy de cerca la situación que acabamos de examinar.

Sin embargo, no necesitamos hacer la transición completa a la lógica y la filosofía de la ciencia para reconocer la función legislativa de los conceptos científicos. De modo diferente ya es conocida de todo historiador que haya estudiado de cerca la evolución de conceptos tales como elemento, especie, masa, fuerza, espacio, calórico o energía.⁸⁰ Estos y otros conceptos científicos se encuentran invariablemente dentro de una matriz de ley, teoría y expectativa, de los cuales no puede extraerse del todo en favor de la definición. Para descubrir qué significan, el historiador debe examinar tanto lo que se dice de ellos como la manera en que son utilizados. En el proceso, por lo regular descubre muchos diferen-

⁸⁰ Los casos del calórico y de la masa son particularmente instructivos, el primero porque corre paralelo al caso antes analizado, el segundo porque invierte la línea de desarrollo. A menudo se ha indicado que Sadi Carnot derivó buenos resultados experimentales de la teoría calórica porque su concepto del calor combinó características que después hubo que distribuir entre el calor y la entropía (véase mi discusión con V. K. La Mer, *American Journal of Physics* 22, 1954, pp. 20-27; 23, 1955, pp. 91-102 y 387-389. El último de los artículos formula el punto de la manera aquí requerida). La masa, en cambio, muestra una línea de desarrollo opuesta. En la teoría newtoniana, la masa inercial y la masa gravitacional son conceptos separados, medidos de modos distintos. Se necesita una ley de la naturaleza experimentalmente probada, para decir que las dos clases de mediciones siempre darán, dentro de los límites instrumentales, los mismos resultados. Sin embargo, de acuerdo con la relatividad general, no se necesita ninguna ley experimental en particular. Las dos mediciones *deben* dar el mismo resultado porque miden la misma cantidad.

tes criterios que gobiernan su uso y cuya coexistencia sólo puede ser comprendida por referencia a muchas otras creencias científicas (y a veces extracientíficas) que guían a quienes los usan. De ello se sigue que estos conceptos no fueron pensados para su aplicación a algún mundo posible sino sólo al mundo tal como el científico lo ve. Su utilización constituye un indicio de su compromiso con un cuerpo mayor de ley y teoría a la inversa, el contenido legislativo de ese cuerpo más amplio queda implicado por los conceptos mismos. Ésa es la razón de que, aunque muchos de ellos tienen historias coextensivas con las historias de las ciencias en las cuales funcionan, su significado y sus normas de utilización hayan cambiado con tanta frecuencia y tan drásticamente en el curso del desarrollo científico.

Por último, volviendo al concepto de velocidad, notemos que la reformulación de Galileo no lo volvió para siempre lógicamente puro. Sólo quedó más libre que su predecesor aristotélico de implicaciones acerca de la manera como la naturaleza debe actuar. Como resultado, nuevamente según el concepto aristotélico de velocidad, puede ponerse en duda por la experiencia acumulada, y es lo que ocurrió a finales del siglo pasado y a comienzos del actual. El episodio es demasiado conocido, de modo que no requiere discusión ni análisis extenso. Cuando se aplica a los movimientos acelerados, el concepto galileico de velocidad implica la existencia de un conjunto de sistemas espaciales de referencia físicamente no acelerados. Ésta es la lección del experimento de Newton con el cubo o balde, lección que ninguno de los relativistas de los siglos XVII y XVIII pudo descartar. Además, cuando se aplica a los movimientos lineales,

el revisado concepto de velocidad empleado en este trabajo implica la validez de las llamadas ecuaciones de transformación de Galileo, y éstas especifican propiedades físicas, por ejemplo la aditividad de la velocidad de la materia o de la luz. Sin tener que apelar a ninguna superestructura de leyes y teorías como las de Newton, ofrecen información enormemente significativas sobre cómo es el mundo.

O, antes bien, eso era lo que hacían. Uno de los primeros grandes triunfos de la física del siglo xx fue el reconocimiento de que esa información podía cuestionarse, y la consiguiente reelaboración de los conceptos de velocidad, espacio y tiempo. Además, en esta conceptualización volvemos a encontrar que los experimentos mentales desempeñaron un papel muy importante. El proceso histórico que acabamos de analizar a través de la obra de Galileo se ha repetido desde entonces con respecto a la misma constelación de conceptos. Es perfectamente posible que vuelva a ocurrir, pues se trata de unos de los procesos fundamentales por medio de los cuales la ciencia avanza.

A estas alturas casi he completado mi argumento. Para descubrir el elemento que todavía falta, permítaseme recapitular brevemente los principales puntos analizados hasta ahora. Comencé sugiriendo que una importante clase de experimentos mentales funciona enfrentando al científico con una contradicción o conflicto implícito en su modo de pensar. El reconocimiento de la contradicción se presenta entonces como una propiedad esencial para su eliminación. Como resultado del experimento mental se inventaron conceptos claros para remplazar

a los confusos antes empleados. Empero, un examen más detenido revela una dificultad esencial en este análisis. Los conceptos "corregidos" en la secuela de los experimentos mentales no presentan ninguna confusión *intrínseca*. Si su utilización planteó problemas al científico, dichos problemas fueron los que normalmente ocurren con el uso de cualquier ley o teoría basadas en la experimentación. Surgen, por así decirlo, no sólo de su equipo mental sino de las dificultades descubiertas en el intento por adecuar ese equipo a una experiencia previamente no asimilada. La naturaleza, más que la lógica sola, fue responsable de esta aparente confusión. Esta situación me llevó a sugerir que a partir de la clase de experimento mental aquí examinada, el científico aprende acerca del mundo, así como acerca de sus conceptos. Históricamente, su papel es muy cercano al doble desempeñado por experimentos y observaciones de laboratorio. En primer lugar, los experimentos mentales pueden revelar la negativa de la naturaleza a adaptarse a una serie de expectativas previas. Además, pueden sugerir maneras particulares en que deben revisarse tanto la expectación como la teoría.

¿Pero cómo —para plantear el restante problema— pueden hacer eso? Los experimentos de laboratorio desempeñan estos papeles porque dan al científico una información nueva e inesperada. Por el contrario, los experimentos mentales deben basarse totalmente en información que ya se tenga a mano. Si ambos pueden desempeñar esos papeles similares, ello debe ser porque, en ocasiones, los experimentos mentales le dan al científico acceso a información que tiene a mano y que, sin embargo,

le resulta inaccesible. Permítaseme ahora indicar, aunque necesariamente de manera breve e incompleta, cómo puede ocurrir esto.

En otra parte he señalado que el desarrollo de una especialidad científica madura está normalmente determinado por el conjunto de conceptos, leyes, teorías y técnicas instrumentales, estrechamente integrado, que el individuo adquiere a partir de la educación profesional.³¹ Esa urdimbre de creencias y expectativas nos dice cómo es el mundo, y simultáneamente define los problemas que todavía exigen atención profesional. Dichos problemas son los que, cuando son resueltos, extienden la precisión y los alcances del ajuste entre la creencia existente, por un lado, y la observación de la naturaleza, por el otro. Cuando los problemas son escogidos de esta manera, el éxito del pasado suele asegurar también el éxito futuro; una razón de que la investigación científica parezca avanzar firmemente de un problema resuelto a otro problema resuelto es que los profesionales limitan su atención a los problemas definidos por las técnicas conceptuales e instrumentales que ya tienen a mano.

Sin embargo, aunque el modo de selección de los problemas haga particularmente probable el éxito a corto plazo, también garantiza fallas a largo plazo, que incluso resultan más graves para el avance científico. Aun los datos que este restringido esquema de

³¹ Para análisis incompletos de este punto y de los siguientes, véanse mis artículos [4] y "The Function of Dogma in Scientific Research", en *Scientific Change*, A. C. Crombie (comp.), Nueva York, 1963, pp. 347-369. Todo el tema es tratado más completamente y con muchos ejemplos adicionales en [1].

investigación presenta al científico nunca se adecuan entera o precisamente a sus expectativas, inducidas por la teoría. Algunas de estas fallas de ajuste causan los comunes problemas de investigación; otros son empujados a la periferia de la conciencia y otros son suprimidos por completo. Por lo general, esta incapacidad de reconocer y enfrentar la anomalía se justifica en cada caso. Las más de las veces, los ajustes instrumentales menores o las pequeñas articulaciones de la teoría existente acaban por reducir la aparente anomalía a la ley. Dejar sin solución las anomalías cuando se les hace frente por primera vez equivale a invitar a la continua distracción.³² Pero no todas las anomalías responden a los ajustes menores de la existente urdimbre conceptual e instrumental. Entre las que no hacen esto hay algunas que, ya por ser particularmente sorprendentes, o ya por aparecer repetidas veces en muchos laboratorios diferentes, no pueden pasarse por alto indefinidamente. Aunque quedan sin asimilar, chocan con fuerza creciente con la conciencia de la comunidad científica.

A medida que este proceso continúa, cambia gradualmente el esquema de investigación de la comunidad. Al principio, aparecen cada vez con mayor frecuencia los informes de observaciones no asimiladas en las páginas de las notas de laboratorio o como apartes en los informes publicados. Luego, cada vez más investigación se dedica a la anomalía misma. Aquellos que están tratando de convertirla en ley discutirán cada vez más acerca del significado de los conceptos y las teorías que por largo

³² Muchos testimonios sobre este punto se encuentran en [76], particularmente en el capítulo 9.

tiempo sostuvieron en común sin percibir la ambigüedad. Unos pocos comenzarán a analizar críticamente el tejido de creencias que ha llevado a la comunidad al callejón sin salida. En ocasiones, incluso la filosofía se volverá un legítimo instrumento científico, lo que de ordinario no es. Creo que algunos o todos estos síntomas de la crisis de la comunidad son preludio invariable de una fundamental reconceptualización que la supresión de una obstinada anomalía casi siempre requiere. Típicamente, esa crisis sólo concluye cuando algún individuo o grupo muy imaginativo elabora una nueva urdimbre de leyes, teorías y conceptos; urdimbre que puede asimilar la anterior experiencia incongruente y, más que nada, la anterior experiencia asimilada.

En otra parte he denominado revolución científica a este proceso de reconceptualización. Tales revoluciones no necesariamente son tan totales como lo implica el esquema anterior, pero todas ellas comparten con él una característica esencial. Los datos requeridos por la revolución han existido antes o se encuentran en el umbral de la conciencia científica; el surgimiento de la crisis los trae al centro de la atención, y la reconceptualización revolucionaria permite que se los vea de una manera nueva.³⁸ Lo que se sabía vagamente a pesar del equipo mental anterior a la revolución, *a posteriori* se conoce de una manera precisa, debido a su equipo mental.

³⁸ La frase "les permite ser vistos de una manera nueva" debe quedar aquí como metáfora, aunque yo pretendo que sea totalmente literal. N. R. Hanson [18] ya ha sostenido que lo que ven los científicos depende de sus creencias y su preparación anteriores, y muchos testimonios sobre este punto se encontrarán en [1].

Esta conclusión, o constelación de conclusiones es, por supuesto, a la vez demasiado grandiosa y demasiado oscura para ser documentada de un modo general en este trabajo. Sin embargo, sugiero que en una aplicación limitada, un buen número de sus elementos esenciales ya ha sido documentado. Una crisis inducida por el fracaso de las expectativas y seguida de una revolución, se encuentra en el meollo de las situaciones de experimentos mentales que hemos venido examinando. Y a la inversa, el experimento mental es uno de los esenciales útiles analíticos que aparecen durante la crisis y que después ayudan a promover la reforma conceptual básica. El resultado de los experimentos mentales puede ser el mismo de los de las revoluciones científicas: pueden capacitar al científico a emplear como parte integral de su conocimiento lo que ese mismo conocimiento antes le hacía inaccesible. Éste es el sentido en el cual cambian su conocimiento del mundo. Y como pueden tener ese efecto, se acumulan de manera tan notable en las obras de hombres como Aristóteles, Galileo, Descartes, Einstein y Bohr, los grandes tejedores de las nuevas urdimbres conceptuales.

Volvamos ahora brevemente y por última vez a nuestros propios experimentos, tanto de Piaget como de Galileo. Creo que lo que se nos dificulta es que encontramos implícitas en la mentalidad preexperimental leyes de la naturaleza que entran en conflicto con la información que nosotros estábamos seguros de que ya poseían nuestros sujetos. En realidad, solamente porque poseían la información podían aprender de la situación experimental. En tales circunstancias nos deja perplejos su incapacidad para ver

el conflicto; ya estamos seguros de algo que ellos todavía tienen que aprender; y por ello, nos vemos tentados a considerarlos como confusos. Considero que esa forma de describir la situación no era del todo errónea, pero se prestaba a falsas interpretaciones. Aunque mi propio sustituto final debe quedar en parte como metáfora, aventuro, en su lugar, la siguiente descripción.

Durante algún tiempo antes que tropezásemos con ellos, nuestros sujetos, en sus tratos con la naturaleza, habían empleado con éxito un tejido conceptual diferente del que nosotros usamos. Este tejido ha pasado la prueba del tiempo; todavía no se ha enfrentado con dificultades. No obstante, en el momento en que los encontramos, al final, han adquirido una variedad de experiencia que no puede ser asimilada por su manera tradicional de tratar con el mundo. En este sentido, tener a mano toda la experiencia requerida para una fundamental reevaluación de sus conceptos, pero hay algo en esa experiencia que ellos todavía no han captado. Precisamente por eso estaban sujetos a confusión, y acaso ya se sentían incómodos.⁸⁴ Empero, la total confusión sobreviene sólo en la situación de experimento mental, y entonces llega como un preludio de superación. Al transformar la anomalía sentida en contradicción concreta, el experimento mental informa a nuestros sujetos sobre qué anda mal. Esa

⁸⁴ Desde luego, los niños de Piaget no se mostraban incómodos (al menos, no por razones pertinentes) hasta que se les mostraron sus experimentos. Sin embargo, en la situación histórica, los experimentos mentales generalmente son provocados por una creciente conciencia de que se trata de algo, en alguna parte.

primera visión clara del desajuste entre experiencia y expectación implícita ofrece las claves necesarias para enderezar la situación.

¿Qué características debe tener un experimento mental para ser capaz de estos efectos? Todavía se sostiene una parte de mi respuesta anterior. Si va a revelar un desajuste entre el aparato conceptual tradicional y la naturaleza, la situación imaginaria debe permitir al científico emplear sus conceptos usuales de la manera en que los utilizó anteriormente. No debe, por así decirlo, violentar el uso normal. Por otro lado, la parte de mi respuesta anterior que trata de la verosimilitud física necesita ahora una revisión. Presumía que los experimentos mentales iban dirigidos a las contradicciones o confusiones puramente lógicas; por lo tanto, bastaría cualquier situación que mostrara esas contradicciones; no habría entonces ninguna condición de verosimilitud física. Sin embargo, si suponemos que la naturaleza y el aparato conceptual se implican mutuamente en la contradicción planteada por los experimentos mentales, se requiere una condición más fuerte. Aunque la situación imaginaria no necesita siquiera ser potencialmente realizable en la naturaleza, el conflicto deducido de ella debe ser tal que la naturaleza misma pudiera presentarlo. En realidad, ni aun esa condición es lo bastante fuerte. El conflicto al que se enfrenta el científico en la situación experimental debe ser un conflicto que, aunque visto con poca claridad, ya se le haya presentado en otras situaciones. A menos que ya haya tenido esa gran experiencia, todavía no estará preparado para aprender de los solos experimentos mentales.