

*Una introducción  
a la filosofía de  
la ciencia*

*Por*

*Rudolf Carnap*

*Traducción de*

*Emilio Méndez Pinto*

Edición digital para la Biblioteca Digital del ILCE

Título original: Concepts, theories, and methods of the physical sciences

© De la traducción: Emilio Méndez Pinto

Prohibida su reproducción por cualquier medio mecánico o eléctrico sin la autorización por escrito de los coeditores.

## Prefacio

Este libro nació de un seminario que he dado muchas veces, con contenido y forma variantes. En un principio se llamó “Fundamentos filosóficos de la física”, o “Conceptos, teorías, y métodos de las ciencias físicas”. Aunque el contenido cambiaba a menudo, el punto de vista filosófico general se ha mantenido constante: el curso destacaba el análisis lógico de los conceptos, afirmaciones, y teorías de la ciencia, en lugar de especulaciones metafísicas.

La idea de presentar la sustancia de mis (más bien informales) charlas seminarias en un libro me fue sugerida por Martin Gardner, quien atendió mi curso en 1946 en la Universidad de Chicago. En 1958, Gardner se preguntó si existía un mecanografiado del seminario o si éste podría hacerse; si esto último, él se ofreció a editarlo para que fuese publicado. Nunca había mecanografiado mis conferencias ni mis charlas seminarias, y no estaba dispuesto a tomarme el tiempo para hacerlo. Simplemente sucedió que este curso fue anunciado para el siguiente semestre, en el otoño de 1958, en la Universidad de California en Los Ángeles, y me fue sugerido que tanto mis charlas como las discusiones fuesen grabadas. Consciente de la enorme distancia existente entre la palabra hablada y una formulación apta para ser publicada, al principio fui muy escéptico acerca del plan. Pero mis amigos me instaron a hacerlo, ya que no muchas de mis perspectivas sobre los problemas en la filosofía de la ciencia habían sido publicadas. El estímulo decisivo provino de mi esposa, quien se ofreció a grabar todo el curso semestral en una cinta de grabación y transcribirlo. Ella levó esto a cabo y también me brindó una invaluable ayuda en las últimas fases del trabajo. Este libro le debe mucho, aunque no vivió para verlo publicado.

A Gardner le fue enviada una versión corregida de la transcripción, y fue entonces que comenzó con su difícil tarea, que realizó con gran habilidad y sensibilidad, ya que no sólo suavizó el estilo, sino que encontró formas de hacer la lectura más fácil al reordenar algunos de los temas y al perfeccionar los ejemplos o contribuir con algunos nuevos. Los capítulos fueron de aquí para allá varias veces, y de vez en cuando les hacía grandes cambios o adiciones, o le sugería a Gardner que los hiciese. Aunque el seminario estaba pensado para estudiantes de posgrado en filosofía que estuviesen

familiarizados con la lógica simbólica y tuviesen algún conocimiento de matemáticas y física de nivel universitario, decidimos hacer el libro accesible a un círculo de lectores mayor. El número de fórmulas lógicas, matemáticas, y físicas fue reducido considerablemente, y aquellas que quedaron fueron explicadas siempre que esto fuera aconsejable.

Este libro no intenta ofrecer un tratamiento sistemático de todos los problemas importantes en los fundamentos filosóficos de la física. En mi seminario - y por tanto también en el libro - he preferido restringirme a un pequeño número de problemas fundamentales (como se indica por los títulos respectivos de las seis partes que lo componen) y discutirlos a fondo, en lugar de incluir una discusión superficial de muchos otros temas. La mayoría de los asuntos tratados en este libro (salvo la Parte III, que versa sobre la geometría, y el capítulo 30, que versa sobre física cuántica) resultan relevantes a todas las ramas de la ciencia, incluyendo las ciencias biológicas, la psicología, y las ciencias sociales. Creo, pues, que este libro también puede servir como una introducción general a la filosofía de la ciencia.

Mis primeros agradecimientos van para mi fiel y eficiente colaborador, Martin Gardner. Le estoy agradecido por su excelente trabajo y también por su inagotable paciencia al momento de soportar mis largas demoras en devolver algunos capítulos o cuando le pedía más cambios en los mismos.

También quiero agradecer a mis amigos Herbert Feigl y Carl G. Hempel por las sugerentes ideas presentes en las conversaciones de muchos años, y especialmente por sus útiles comentarios sobre algunas partes del manuscrito. También doy gracias a Abner Shimony por su generosa ayuda técnica sobre cuestiones relativas a la mecánica cuántica. Además, doy gracias a muchos amigos y colegas por su estimulante influencia y a mis alumnos que atendieron una u otra versión de este seminario y cuyas preguntas y comentarios impulsaron algunas de las discusiones presentes en este libro.

Por último, reconozco con agradecimiento el amable permiso de Yale University Press para las extensas citas del libro *Physics and Reality* (1940), de Kurt Riezler.

Febrero de 1966

RUDOLF CARNAP  
Universidad de California, Los Ángeles

# Parte I

## LEYES, EXPLICACIÓN, Y PROBABILIDAD

### CAPÍTULO 1

#### El valor de las leyes: explicación y predicción

Las observaciones que hacemos en la vida cotidiana, así como las observaciones más sistemáticas de la ciencia, revelan ciertas repeticiones o regularidades en el mundo. El día siempre sigue a la noche; las estaciones del año se repiten en el mismo orden; el fuego siempre se siente caliente; los objetos caen cuando los soltamos, y así sucesivamente. Las leyes de la ciencia no son más que declaraciones que expresan estas regularidades de manera tan precisa como sea posible.

Si una cierta regularidad es observada en todos los tiempos y en todos los lugares, sin excepción alguna, entonces la regularidad es expresada en la forma de una “ley universal”. Un ejemplo de la vida cotidiana es: “Todo el hielo es frío”. Esta declaración afirma que cualquier pedazo de hielo - en cualquier lugar en el Universo, en cualquier momento pasado, presente, o futuro - es (era, o será) frío. No todas las leyes de la ciencia son universales. En lugar de afirmar que una regularidad ocurre en *todos* los casos, algunas leyes afirman que ocurre únicamente en un cierto porcentaje de casos. Si el porcentaje es especificado, o si de alguna otra forma se hace una declaración cuantitativa sobre la relación de un evento con otro, entonces a la declaración se le llama “ley estadística”. Por ejemplo: “Las manzanas maduras son usualmente rojas”, o “Aproximadamente la mitad de los bebés que nacen cada año son niños”. Ambos tipos de ley - universal y estadística - son necesarias en la ciencia. Las leyes universales son lógicamente más simples, y por esta razón las consideraremos primero. En esta parte de la discusión, “leyes” serán, por lo general, leyes universales.

Las leyes universales son expresadas en la forma lógica de lo que se conoce, en la lógica formal, como una “declaración condicional universal”. (En este libro, ocasionalmente haremos uso de la lógica simbólica, pero sólo de una manera muy elemental.) Por ejemplo, consideremos una ley del tipo más simple posible. Ésta afirma

que, sea lo que sea  $x$ , si  $x$  es  $P$ , entonces  $x$  es también  $Q$ . Esto se escribe, simbólicamente, como sigue:

$$(x)(Px \supset Qx).$$

A la expresión “ $(x)$ ” en el lado izquierdo se le llama “cuantificador universal”, y nos dice que la declaración se refiere a *todos* los casos de  $x$ , y no sólo a un cierto porcentaje de casos. “ $Px$ ” dice que  $x$  es  $P$ , y “ $Qx$ ” dice que  $x$  es  $Q$ . El símbolo “ $\supset$ ” es una conectiva: vincula el término a su izquierda con el término a su derecha. En castellano corresponde, aproximadamente, a la afirmación: “Si...entonces...”.

Si “ $x$ ” representa cualquier objeto material, entonces la ley declara que, para cualquier objeto material  $x$ , si  $x$  tiene la propiedad  $P$ , también tiene la propiedad  $Q$ . Por ejemplo, en física podríamos decir: “Para cada cuerpo  $x$ , si tal cuerpo es calentado, tal cuerpo se expandirá.” Esta es la ley de la expansión térmica en su forma más simple, no cuantitativa. En la ciencia física, desde luego, uno intenta obtener leyes cuantitativas y calificarlas para así excluir excepciones, pero, si dejamos de lado tales refinamientos, entonces esta declaración condicional universal es la forma lógica básica de todas las leyes universales. A veces no sólo decimos que  $Qx$  se mantiene cuando  $Px$  se mantiene, sino que también lo contrario es cierto: siempre que  $Qx$  se mantiene,  $Px$  también se mantiene. Los lógicos llaman a esto una declaración bicondicional (una declaración condicional en ambas direcciones). Pero, desde luego, esto no contradice el hecho de que en todas las leyes universales tratamos con condicionales universales, porque una [declaración] bicondicional puede ser considerada como la conjunción de dos condicionales.

No todas las declaraciones hechas por los científicos tienen esta forma lógica. Un científico bien podría decir: “Ayer en Brasil, el profesor Smith descubrió una nueva especie de mariposa.” Esta no es la declaración de una ley, ya que habla acerca de un tiempo y lugar únicos y especificados; declara que algo sucedió en tal tiempo y en tal lugar. Debido a que declaraciones como la recién descrita tratan sobre hechos individuales, son llamadas declaraciones “singulares”. Claro está que todo nuestro conocimiento tiene su origen en declaraciones singulares (las observaciones particulares de individuos particulares). Una de las cuestiones más grandes y complicadas en la filosofía de la ciencia es cómo es que somos capaces de ir desde tales declaraciones singulares a la afirmación de leyes universales.

Cuando las declaraciones de los científicos se hacen en un lenguaje ordinario y no en el lenguaje más preciso de la lógica simbólica, debemos tener mucho cuidado en

no confundir declaraciones singulares con universales. Si un zoólogo escribe en un libro de texto: “El elefante es un excelente nadador”, no se está refiriendo a que un elefante en particular, que observó hace un año en el zoológico, es un excelente nadador. Cuando dice “el elefante”, está usando “el” en el sentido aristotélico; se refiere a toda la clase de elefantes. Todas las lenguas europeas han heredado del griego (y quizá también de otras lenguas) esta manera de hablar en una forma singular cuando en realidad uno se refiere a una clase o a un tipo. Los griegos dijeron: “El hombre es un animal racional”. Se referían, desde luego, a todos los hombres, y no a un hombre en particular. Similarmente, decimos “el elefante” cuando nos referimos a todos los elefantes, o “la tuberculosis se caracteriza por los siguientes síntomas:...” cuando nos referimos a todos los casos, y no a un único caso de tuberculosis.

Es desafortunado que nuestro lenguaje tenga esta ambigüedad, porque da lugar a muchos malentendidos. Los científicos a menudo se refieren a declaraciones universales - o más bien a lo que es expresado por tales declaraciones - como “hechos”. Olvidan que la palabra “hecho” fue originalmente aplicada (y la debemos aplicar exclusivamente en este sentido) a casos singulares, particulares. Si a un científico se le pregunta sobre la ley de expansión térmica, podría decir: “Ay, la expansión térmica. Es uno de los hechos básicos, más familiares de la física.” De manera similar, podría hablar del hecho de que el calor es generado por una corriente eléctrica, del hecho de que el magnetismo es producido por la electricidad, y así sucesivamente. Éstos son a veces considerados como “hechos” familiares de la física. Para evitar malentendidos, preferimos no llamar “hechos” a tales declaraciones. Los hechos son eventos particulares. “Esta mañana, en el laboratorio, envié una corriente eléctrica a través de una bobina de alambre con un cuerpo de hierro dentro de ella, y descubrí que el cuerpo de hierro se volvió magnético.” Este es un hecho a menos que, desde luego, me haya engañado de algún modo. Sin embargo, si me encontraba sobrio, si la habitación no estaba muy nebulosa, y si nadie ha manipulado secretamente el aparato para jugarme una broma, entonces puedo declarar, como una observación fáctica, que esta mañana ocurrió tal secuencia de eventos.

Cuando usemos la palabra “hecho”, vamos a referirnos a ella en el sentido singular, para así distinguirla claramente de las declaraciones universales. A tales declaraciones universales les llamaremos “leyes”, incluso cuando sean tan elementales como la ley de expansión térmica, o, incluso más elemental, la declaración: “Todos los cuervos son negros.” No sé si esta declaración es verdadera, pero, asumiendo su verdad,

llamaremos a tal declaración una ley de la zoología. Los zoólogos podrán hablar, informalmente, de “hechos” tales como “el cuervo es negro”, o “el pulpo tiene ocho brazos”, pero, en nuestra terminología más precisa, las declaraciones de este tipo serán llamadas “leyes”.

Más adelante distinguiremos entre dos tipos de ley: empírica y teórica. Las leyes del tipo simple que he mencionado son a veces llamadas “generalizaciones empíricas” o “leyes empíricas”. Son simples porque hablan de propiedades, como el color negro o las propiedades magnéticas de un pedazo de hierro, que pueden ser directamente observadas. La ley de expansión térmica, por ejemplo, es una generalización basada en muchas observaciones directas de cuerpos que se expanden cuando son calentados. Por el contrario, los conceptos teóricos, no observables, tales como las partículas elementales y los campos electromagnéticos, deben tratarse a partir de leyes teóricas. Todo esto lo discutiremos más tarde. Lo menciono aquí porque, de otra forma, ustedes podrían pensar que los ejemplos que he dado no cubren el tipo de leyes que quizá han aprendido en sus clases de física teórica.

En resumen, la ciencia comienza con observaciones directas de hechos particulares. Nada más es observable. Ciertamente, una regularidad no es directamente observable, y solamente a partir de comparar muchas observaciones entre sí es que se descubren las regularidades, y éstas son expresadas por declaraciones llamadas “leyes”.

¿De qué sirven tales leyes? ¿Qué propósito cumplen en la ciencia y en la vida cotidiana? La respuesta es doble: sirven para *explicar* hechos ya conocidos, y para *predecir* hechos aún no conocidos.

Primero, veamos cómo es que las leyes de la ciencia son usadas para la explicación. Ninguna explicación - esto es, nada que merezca el título honorífico de “explicación” - puede ser ofrecida sin referirse a, por lo menos, una ley. (En casos simples, sólo hay una ley, pero en casos más complicados puede estar involucrado un conjunto de muchas leyes.) Es importante enfatizar este punto, porque los filósofos a menudo han sostenido que pueden explicar ciertos hechos en la historia, en la naturaleza, o en la vida humana de alguna otra forma. Comúnmente hacen esto al especificar algún tipo de agente o fuerza a la que se responsabiliza de los casos a ser explicados.

En la vida cotidiana la anterior es, claro está, una forma familiar de explicación. Si alguien pregunta: “¿Cómo es que mi reloj, que dejé aquí en la mesa antes de abandonar el cuarto, ahora ya no esté?” Y uno responde: “Vi a Jones entrar en el cuarto

y tomarlo.” Esta es la explicación de la desaparición del reloj. Quizá no es considerada como una explicación suficiente. ¿Por qué Jones tomó el reloj? ¿Quería robarlo o simplemente tomarlo prestado? Quizá lo tomó bajo la errónea impresión de que era suyo. La primera pregunta, “¿Qué le sucedió al reloj?”, fue respondida por una declaración fáctica: Jones lo tomó. La segunda pregunta, “¿Por qué Jones lo tomó?”, puede ser respondida por otro hecho: lo tomó prestado por un momento. Parecería, por tanto, que no necesitamos leyes en absoluto. Pedimos la explicación de un hecho, y se nos da un segundo hecho. Pedimos una explicación del segundo hecho, y se nos da un tercero. Las demandas de nuevas explicaciones pueden sacar a relucir nuevos hechos. ¿Por qué, entonces, es necesario referirse a una ley para poder ofrecer una explicación adecuada de un hecho?

La respuesta es que las explicaciones fácticas en realidad son explicaciones de leyes disfrazadas. Cuando las examinamos con más cuidado, encontramos que son declaraciones abreviadas, incompletas, que tácitamente asumen ciertas leyes, pero sucede que éstas nos son tan familiares que resulta innecesario expresarlas. En el ejemplo del reloj, la primera respuesta, “Jones lo tomó”, no sería considerada una explicación satisfactoria si no asumiésemos la siguiente ley universal: siempre que alguien toma un reloj de una mesa, el reloj ya no se encuentra sobre la mesa. La segunda respuesta, “Jones lo tomó prestado”, es una explicación porque damos por sentada la siguiente ley general: si alguien toma prestado un reloj para usarlo en otra parte, toma el reloj y se lo lleva.

Consideremos un ejemplo más. Preguntamos al pequeño Tommy por qué está llorando, y nos responde con otro hecho: “Jimmy me pegó en la nariz.” ¿Por qué consideramos esto como una explicación suficiente? Porque sabemos que un golpe en la nariz causa dolor, y que, cuando los niños sienten dolor, lloran. Estas son leyes psicológicas generales, y son tan bien conocidas que son asumidas incluso por Tommy cuando nos dice por qué está llorando. Si estuviésemos lidiando con, digamos, un niño marciano y conociésemos muy poco sobre las leyes psicológicas marcianas, entonces una simple declaración fáctica podría no ser considerada como una explicación adecuada del comportamiento del niño. A menos que los hechos puedan ser conectados con otros hechos por medio de por lo menos una ley, explícitamente establecida o tácitamente comprendida, no proporcionan explicaciones.

El esquema general implicado en toda explicación de la variedad deductiva puede ser expresado, simbólicamente, como sigue:

$$1. (x)(Px \supset Qx)$$

$$2. Pa$$

$$3. Qa$$

La primera declaración es la ley universal que aplica a cualquier objeto  $x$ . La segunda declaración afirma que un objeto particular  $a$  tiene la propiedad  $P$ . Estas dos declaraciones, tomadas en conjunto, nos permiten derivar, lógicamente, la tercera declaración: el objeto  $a$  tiene la propiedad  $Q$ .

En la ciencia, así como en la vida cotidiana, la ley universal no siempre se establece explícitamente. Si se pregunta a un físico: “¿Por qué esta barra de hierro, que hace un momento cabía exactamente en el aparato, es ahora demasiado larga como para caber?”, él podría responder: “Mientras estabas fuera del cuarto, calenté la barra.” Él asume, desde luego, que tú conoces la ley de expansión térmica; de otra forma, para poder ser comprendido, habría añadido, “y, cuando un cuerpo es calentado, se expande”. La ley general es esencial a su explicación. Pero si conoces la ley, y él sabe que la conoces, quizá no sienta necesario establecer la ley. Es por esta razón que las explicaciones, especialmente en la vida cotidiana en donde se dan por sentadas las leyes del sentido común, a menudo parecen ser muy distintas al esquema que recién ofrecí.

A veces, al dar una explicación, las únicas leyes conocidas que aplican son estadísticas y no universales. En tales casos, debemos contentarnos con una explicación estadística. Por ejemplo, podemos saber que un cierto tipo de hongo es ligeramente venenoso y que causa determinados síntomas de enfermedad en el 90% de las personas que lo comieron. Si un doctor encuentra estos síntomas al examinar a un paciente, y éste le informa a aquél que ayer comió este tipo particular de hongo, el doctor considerará esto como una explicación de los síntomas aun cuando la ley implicada sea únicamente estadística. Y sí es, en realidad, una explicación.

Incluso cuando una ley estadística proporciona únicamente una explicación extremadamente débil, no deja de ser una explicación. Por ejemplo, una ley estadística médica puede afirmar que 5% de las personas que comen una determinada comida desarrollarán un cierto síntoma. Si un doctor cita esto como su explicación a un paciente que presenta tal síntoma, éste podrá no estar satisfecho. “¿Por qué”, preguntará, “soy uno del 5%?”. En algunos casos, el doctor será capaz de ofrecer más explicaciones. Podrá realizar una prueba de alergias al paciente y descubrir que es alérgico a esta comida en particular. “Si hubiese sabido esto”, le dirá al paciente, “le hubiese advertido

sobre esta comida. Sabemos que, cuando las personas que tienen una alergia como la suya comen de esta comida, el 97% de ellos desarrollará síntomas como los suyos.” Esto podría satisfacer al paciente como una explicación más fuerte. Pero ya sean fuertes o débiles, estas son explicaciones genuinas. Ante la falta de leyes universales conocidas, las explicaciones estadísticas a menudo son el único tipo disponible.

En el ejemplo reciente, las leyes estadísticas son lo mejor que puede establecerse, porque no hay un conocimiento médico suficiente que justifique una ley universal. Las leyes estadísticas en la economía y en otros campos de la ciencia social se deben a una ignorancia similar. Nuestro conocimiento limitado de las leyes psicológicas, de las leyes fisiológicas subyacentes, y de cómo es que aquellas puedan, a su vez, descansar sobre leyes físicas, hace necesario formular las leyes de la ciencia social en términos estadísticos. En la teoría cuántica, sin embargo, nos encontramos con leyes estadísticas que pueden no ser el resultado de la ignorancia; tales leyes bien pueden expresar la estructura básica del mundo. El célebre principio de incertidumbre de Heisenberg es el ejemplo más conocido de lo anterior. Muchos físicos creen que todas las leyes de la física descansan, en última instancia, sobre leyes fundamentales que son estadísticas. Si este es el caso, tendremos que contentarnos con explicaciones basadas sobre leyes estadísticas.

¿Qué hay de las leyes elementales de la lógica que están involucradas en todas las explicaciones? ¿Alguna vez sirven como las leyes universales sobre las que descansa la explicación científica? No, no lo hacen. La razón es que son leyes de un tipo totalmente distinto. Es cierto que las leyes de la lógica y de las matemáticas puras (no de la geometría física, que es otra cosa) son universales, pero no nos dicen nada sobre el mundo. Estas leyes simplemente establecen relaciones que se mantienen entre ciertos conceptos, y no porque el mundo tenga tal o cual estructura, sino únicamente porque tales conceptos están definidos de ciertas formas.

Aquí hay dos ejemplos de leyes lógicas simples:

1. Si  $p$  y  $q$ , entonces  $p$ .
2. Si  $p$ , entonces  $p$  o  $q$ .

Estas declaraciones no pueden ser impugnadas porque su verdad está basada en los significados de los términos involucrados. La primera ley simplemente establece que, si asumimos la verdad de las declaraciones  $p$  y  $q$ , entonces debemos asumir que la declaración  $p$  es verdadera. La ley se sigue de la manera en que usamos “y” y “si...entonces”. La segunda ley afirma que, si asumimos la verdad de  $p$ , debemos

asumir que  $p$  o  $q$  es verdadera. Puesto en palabras, la ley es ambigua porque el vocablo castellano “o” no distingue entre un significado inclusivo (una o ambas) y un significado exclusivo (una pero no ambas). Para hacer precisa la ley, la expresamos simbólicamente al escribir:

$$p \supset (p \vee q).$$

El símbolo " $\vee$ " se entiende como “o” en el sentido inclusivo. Su significado puede ser dado de manera más formal si escribimos su tabla de verdad. Esto lo hacemos al listar todas las posibles combinaciones de los valores de verdad (verdad o falsedad) para los dos términos conectados por el símbolo, y después al especificar cuáles combinaciones son permitidas por el símbolo y cuáles no.

Las cuatro posibles combinaciones de los valores son:

$p$	$q$
1. verdadera	verdadera
2. verdadera	falsa
3. falsa	verdadera
4. falsa	falsa

El símbolo " $\vee$ " está definido por la regla de que " $p \vee q$ " es verdadera en los primeros tres casos y falsa en el cuarto. El símbolo " $\supset$ ", que traducido toscamente al español es “si...entonces”, está definido al decir que " $p \supset q$ " es verdadera en el primero, tercero, y cuarto casos, y falsa en el segundo. Una vez comprendida la definición de cada término en una ley lógica, claramente vemos que la ley debe ser verdadera en una forma completamente independiente de la naturaleza del mundo. Es una verdad necesaria, una verdad que se mantiene, como a veces lo expresan algunos filósofos, en todos los mundos posibles.

Esto es cierto tanto para las leyes de las matemáticas como para las de la lógica. Una vez especificados, de manera precisa, los significados de “1”, “3”, “4”, “+”, y “=”, la verdad de la ley " $1 + 3 = 4$ " se sigue directamente de estos significados. Tal es el caso incluso en las áreas más abstractas de las matemáticas puras. Una estructura es llamada un “grupo”, por ejemplo, si satisface ciertos axiomas que definen un grupo. El espacio euclidiano tridimensional puede ser algebraicamente definido como un conjunto de ternas ordenadas de números reales que satisfacen ciertas condiciones básicas. Pero todo esto no tiene nada que ver con la naturaleza del mundo exterior. No hay ningún mundo posible en donde no se mantengan las leyes de la teoría de grupos y la geometría

abstracta del espacio euclidiano tridimensional, porque estas leyes únicamente dependen de los significados de los términos involucrados, y no de la estructura del mundo real en el que nos encontramos.

El mundo real es un mundo en constante cambio. Incluso las leyes más fundamentales de la física, por todo lo que podemos estar seguros, pueden variar ligeramente de un siglo a otro. Lo que creemos que es una constante física con un valor fijo puede estar sujeto a muchos cambios cíclicos que aún no hemos observado. Pero tales cambios, sin importar qué tan drásticos sean, nunca destruirán la verdad de una única ley lógica o aritmética.

Suena muy dramático, quizá reconfortante, decir que, por lo menos aquí, hemos encontrado certeza. Es cierto que hemos obtenido certeza, pero hemos pagado un precio muy alto por ella. El precio es que las declaraciones de la lógica y la matemática no nos dicen nada sobre el mundo. Podemos estar seguros de que tres más uno es cuatro, pero, ya que esto se mantiene en todos los mundos posibles, no puede decirnos nada acerca del mundo en que vivimos.

¿Qué queremos decir por “mundo posible”? Simplemente un mundo que pueda ser descrito sin contradicción alguna. Esto incluye a los mundos de cuentos de hadas y a los mundos ideales del tipo más fantástico, siempre que sean descritos en términos lógicamente consistentes. Por ejemplo, ustedes podrían decir: “Tengo en mente un mundo en donde hay exactamente mil eventos, ni uno más ni uno menos. El primer evento es la aparición de un triángulo rojo. El segundo es la aparición de un cuadrado verde. Sin embargo, como el primer evento fue azul y no rojo...”. Aquí es donde interrumpo. “Hace un momento dijiste que el primer evento es rojo, y ahora dices que es azul. No te entiendo.” Quizá he grabado lo que has dicho, y lo reproduzco para convencerte de que has declarado una contradicción. Si persistes en tu descripción de este mundo, incluyendo las dos afirmaciones contradictorias, tendré que insistir en que no estás describiendo nada que pueda llamarse un mundo posible.

Por otra parte, podrías describir un mundo posible como sigue: “Hay un hombre. Este hombre se encoge, haciéndose cada vez más pequeño. De pronto, se convierte en un pájaro. Después el pájaro se convierte en mil pájaros. Estos pájaros vuelan por el cielo, y las nubes conversan entre ellas sobre lo sucedido.” Todo esto es un mundo posible. Fantástico, sí; pero no contradictorio.

Podríamos decir que los mundos posibles son mundos concebibles, pero intento evitar el término “concebible” porque a menudo es usado en el sentido más restringido

de “lo que pueda ser imaginado por un ser humano”. Muchos mundos posibles pueden ser descritos pero no imaginados. Podríamos, por ejemplo, hablar de un continuo en donde todos los puntos determinados por coordenadas racionales sean rojos y todos los puntos determinados por coordenadas irracionales sean azules. Si admitimos la posibilidad de adscribir colores a los puntos, éste es un mundo no contradictorio. Es concebible en el sentido amplio, esto es, puede ser asumido sin contradicción. Pero no es concebible en el sentido psicológico. Nadie puede siquiera imaginar un continuo incoloro de puntos. Únicamente nos podemos imaginar el modelo crudo de un continuo (un modelo consistente en puntos muy apretados). Los mundos posibles son mundos concebibles en el sentido amplio. Son mundos que pueden ser descritos sin contradicción lógica alguna.

Las leyes de la lógica y de las matemáticas puras, por su propia naturaleza, no pueden utilizarse como base para la explicación científica, porque no nos dicen nada que distinga al mundo real de algún otro mundo posible. Cuando pedimos la explicación de un hecho, de una observación particular en el mundo real, debemos hacer uso de las leyes *empíricas*. Ciertamente no poseen la certeza de las leyes lógicas y matemáticas, pero sí nos dicen algo sobre la estructura del mundo.

En el siglo XIX, algunos físicos alemanes, como Gustav Kirchhoff y Ernst Mach, afirmaron que la ciencia no debe preguntarse el “¿por qué?”, sino el “¿cómo?”. Querían decir que la ciencia no debe buscar por agentes metafísicos desconocidos que sean responsables de ciertos eventos, sino solamente describir tales eventos en términos de leyes. Esta prohibición de preguntar “¿por qué?” debe ser entendida en su entorno histórico. El antecedente inmediato era la atmósfera filosófica alemana de la época, dominada por el idealismo en la tradición de Fichte, Schelling, y Hegel. Estos hombres sintieron que una descripción de cómo se comportaba el mundo no era suficiente. Querían una comprensión más completa, que creyeron poder obtener únicamente al encontrar causas metafísicas que se encontraran detrás de los fenómenos y no fueran accesibles al método científico. Los físicos reaccionaron ante este punto de vista diciendo: “No nos molesten con sus preguntas de por qué. No hay respuesta alguna más allá de la ofrecida por las leyes empíricas.” Se opusieron a las cuestiones del por qué porque por lo general eran cuestiones metafísicas.

Hoy en día, la atmósfera filosófica ha cambiado. En Alemania, aún hay unos cuantos filósofos trabajando en la tradición idealista, pero en Inglaterra y en los Estados Unidos esta tradición prácticamente ha desaparecido. Como resultado de lo anterior, ya

no nos preocupan las cuestiones relativas al por qué. Ya no necesitamos decir, “No preguntes por qué”, porque ahora, cuando alguien pregunta por qué, asumimos que se refiere a un sentido científico, no metafísico. Simplemente nos está pidiendo que expliquemos algo puesto en un marco de leyes empíricas.

Cuando era joven y formaba parte del Círculo de Viena, algunas de mis publicaciones tempranas estaban escritas como una reacción al clima filosófico del idealismo alemán. Como consecuencia, estas publicaciones y las de otros en el Círculo de Viena estaban repletas de declaraciones prohibitorias similares a la recién discutida. Estas prohibiciones deben ser entendidas en referencia a la situación histórica en la que nos encontrábamos. Hoy, y especialmente en los Estados Unidos, raramente hacemos tales prohibiciones. El tipo de oponentes que tenemos aquí es de una naturaleza muy distinta, y la naturaleza del oponente a menudo determina la forma en la que uno expresa sus propios puntos de vista.

Cuando decimos que, para la explicación de un hecho dado, es indispensable el uso de una ley científica, lo que queremos excluir es, especialmente, el punto de vista de que antes de que un hecho pueda ser adecuadamente explicado, deban encontrarse ciertos agentes metafísicos. En épocas precientíficas, esta era, desde luego, el tipo de explicación normalmente ofrecida. En un tiempo, se pensó que el mundo estaba habitado por espíritus o demonios no directamente observables pero que *actuaban* para causar que la lluvia cayera, que el río fluyera, y que los relámpagos destellaran. En lo que fuese que se viera, había algo - o, mejor dicho, *alguien* - responsable del evento. Esto es, desde una perspectiva psicológica, comprensible. Si un hombre me hace algo que no me gusta, me resulta natural hacerlo responsable de ello, enojarme, y devolverle el golpe. Si una nube vierte agua sobre mí, no puedo responderle con un golpe, pero sí puedo encontrar una salida para mi enojo si hago a la nube, o a algún demonio invisible detrás de la nube, responsable por la lluvia. Puedo maldecir a este demonio, agitar mi puño contra él, y entonces mi ira se alivia, me siento mejor. No es difícil comprender cómo los miembros de las sociedades precientíficas encontraron satisfacción psicológica imaginando agentes detrás de los fenómenos de la naturaleza.

Con el tiempo, como sabemos, las sociedades dejaron de lado sus mitologías, pero a veces los científicos remplazan los espíritus por agentes que en realidad no son muy distintos. El filósofo alemán Hans Driesch, muerto en 1941, escribió muchos libros sobre filosofía de la ciencia. Originalmente era un destacado biólogo, célebre por su trabajo sobre ciertas respuestas organicistas, incluyendo la regeneración en los erizos de

mar. Solía cortar partes de sus cuerpos y observar en qué etapas de su crecimiento y bajo qué condiciones eran capaces de crecer nuevas partes. Su trabajo científico era importante y excelente. Pero a Driesch también le interesaban las cuestiones filosóficas, especialmente aquellas que trataban con los fundamentos de la biología, así que eventualmente se convirtió en profesor de filosofía. En este campo también hizo un trabajo extraordinario, pero había un aspecto de su filosofía que tanto mis amigos en el Círculo de Viena como yo no considerábamos tan altamente. Era su *manera* de explicar tales procesos biológicos como los de la regeneración y reproducción.

En el tiempo en que Driesch llevó a cabo su trabajo biológico, se pensaba que muchas características de los seres vivos no podían encontrarse en otra parte. (Hoy, se ve más claramente que existe un continuo que conecta los mundos orgánico e inorgánico.) Pretendía explicar estas características organicistas únicas, así que postuló lo que llamó “entelequia”. Este término había sido introducido por Aristóteles, que tenía su propio significado para él, y el cual no discutiremos aquí. Driesch dijo, en efecto: “La entelequia es una cierta fuerza específica que causa que los seres vivos se comporten de la manera en que lo hacen. Pero no debe pensarse en ella como en una fuerza *física* como la gravedad o el magnetismo. Ay no, nada de eso.”

Las entelequias de los organismos, sostenía Driesch, son de varios tipos, y dependen de la etapa de evolución del organismo. En los organismos primitivos, unicelulares, la entelequia es bastante simple. A medida que avanzamos en la escala evolutiva, a través de las plantas, los animales inferiores, los animales superiores, y finalmente hasta llegar al hombre, la entelequia se vuelve cada vez más compleja. Así lo revela el mayor grado al cual están integrados los fenómenos en las formas superiores de vida. Lo que llamamos la “mente” de un cuerpo humano, en realidad no es nada más que una porción de la entelequia de la persona. La entelequia es mucho más que la mente, o por lo menos más que la mente consciente, porque es responsable de todo lo que hace cada célula del cuerpo. Si me corto un dedo, las células de éste forman un nuevo tejido y llevan ciertas sustancias al corte para matar bacterias entrantes. Estos eventos no son conscientemente dirigidos por la mente, y ocurren incluso en el dedo de un bebé de un mes de edad, quien nunca ha oído hablar de las leyes de la fisiología. Todo esto, insistía Driesch, se debe a la entelequia del organismo, de la cual la mente es *una* manifestación. Además, pues, de la explicación científica, Driesch tenía una elaborada teoría de la entelequia, que ofreció como una explicación *filosófica* de

fenómenos científicos sin explicar tal como la regeneración de partes de los erizos de mar.

¿Es ésta una explicación? Mis amigos y yo tuvimos algunas discusiones con Driesch sobre ella. Recuerdo una en el Congreso Internacional de Filosofía, en Praga, en 1934. Hans Reichenbach y yo criticamos la teoría de Driesch, mientras que otros la defendían. En nuestras publicaciones no dedicamos mucho espacio a estas críticas porque admirábamos el trabajo hecho por Driesch tanto en la biología como en la filosofía. Driesch era muy distinto a la mayoría de los filósofos en Alemania, porque en realidad quería desarrollar una filosofía científica. Sin embargo, nos parecía que a su teoría de la entelequia le faltaba algo: la percepción de que uno no puede ofrecer una explicación sin ofrecer también una ley.

Recuerdo que le dijimos: “Sobre tu entelequia...no sabemos qué quieres decir con ella. Dices que no es una fuerza física. ¿Entonces qué es?”

“Bueno”, respondió (claro está que estoy parafraseando sus palabras), “no deben tener miras tan estrechas. Cuando uno le pide a un físico una explicación de por qué este clavo se mueve hacia aquella barra de hierro, te dirá que la barra de hierro es un imán y que el clavo es atraído hacia ella por la fuerza del magnetismo. Nadie nunca ha visto al magnetismo. Uno solamente ve el movimiento de un pequeño clavo hacia la barra de hierro.”

Nosotros acordamos. “Sí, es cierto, nadie ha visto al magnetismo.”

“Verán”, continuó, “el físico introduce fuerzas que nadie puede observar - fuerzas como el magnetismo y la electricidad - para explicar ciertos fenómenos. Yo quiero hacer lo mismo. Las fuerzas físicas no son adecuadas para explicar ciertos fenómenos orgánicos, así que introduje algo parecido a la fuerza pero que no es una fuerza física porque no se comporta de la manera en que lo hacen las fuerzas físicas. Por ejemplo, no está espacialmente localizada. Es verdad que actúa sobre un organismo físico, pero actúa con respecto a todo el organismo, no sólo sobre ciertas partes de él. Por lo tanto, no puede decirse dónde está localizada. No hay ubicación alguna. No es una fuerza física, pero me es tan legítimo introducirla como lo es al físico introducir la invisible fuerza del magnetismo.”

Nuestra respuesta fue que el físico no explica el movimiento del clavo hacia la barra simplemente introduciendo la palabra “magnetismo”. Desde luego, si se le pregunta por qué se mueve el clavo, podría responder primero diciendo que el movimiento se debe al magnetismo, pero si se le pide una explicación más completa,

ofrecerá ciertas leyes como respuesta. Las leyes pueden no estar expresadas en términos cuantitativos, como las ecuaciones de Maxwell que describen los campos magnéticos, sino que pueden ser leyes simples, cualitativas, sin números en ellas. El físico podría decir: “Todos los clavos que contienen hierro son atraídos a los extremos de las barras que han sido magnetizadas.” Después puede pasar a explicar el estado de estar magnetizado ofreciendo otras leyes no cuantitativas. Podría decir que el mineral de hierro, de la ciudad de Magnesia (debe recordarse que la palabra “magnético” deriva de la ciudad griega de Magnesia, donde este tipo de mineral de hierro fue encontrado por primera vez), posee esta propiedad. Podría explicar que las barras de hierro se magnetizan si se las frota de cierta manera con minerales naturalmente magnéticos. Podría dar otras muchas leyes acerca de las condiciones bajo las cuales ciertas sustancias pueden magnetizarse y leyes sobre determinados fenómenos asociados al magnetismo. Podría indicar que, si se magnetiza un clavo y se suspende por el centro, de tal suerte que se balancee libremente, un extremo apuntará hacia el norte. Si se dispone de otro clavo magnético, se pueden juntar los dos extremos que apuntan hacia el norte y se observará que no se atraen, sino que se repelen uno a otro. Podría explicar que, si se calienta una barra de hierro magnetizada, o se le martilla, entonces perderá fuerza magnética. Todas estas son leyes cualitativas que pueden ser expresadas en la forma lógica: “si...entonces...”. El punto que quiero destacar aquí es este: no es suficiente, para propósitos explicativos, con simplemente introducir un nuevo agente al darle un nuevo nombre. También deben ofrecerse leyes.

Driesch no ofreció leyes. No especificó cómo es que la entelequia de un roble difiere de la entelequia de una cabra o de una jirafa. Tampoco clasificó sus entelequias. Únicamente clasificó organismos y dijo que cada organismo tiene su propia entelequia. No formuló leyes que establecieran bajo qué condiciones se fortalece o se debilita una entelequia. Claro está que describió todo tipo de fenómenos orgánicos y ofreció reglas generales para tales fenómenos. Dijo que, si se corta una extremidad de un erizo de mar de cierta forma, el organismo no sobrevivirá; si se corta de otra forma, el organismo sobrevivirá, pero sólo volverá a crecer una extremidad fragmentaria. Córtese de otra forma y, en cierta etapa del crecimiento del erizo de mar, se regenerará una extremidad nueva y completa. Todas estas declaraciones son leyes zoológicas perfectamente respetables.

“¿Qué añades a estas leyes empíricas”, le preguntamos a Driesch, “si, después de ofrecerlas, procedes a decirnos que todos los fenómenos que tales leyes abarcan se deben a la entelequia del erizo de mar?”

Creímos que no se añadía nada. Como la noción de entelequia no nos da nuevas leyes, no explica más que las leyes generales ya disponibles. No nos ayuda, en lo más mínimo, en hacer nuevas predicciones, y es por estas razones que no podemos decir que ha aumentado nuestro conocimiento científico. Podría parecer, a primera vista, que el concepto de entelequia añade algo a nuestras explicaciones, pero cuando lo examinamos más de cerca, descubrimos su vacuidad. Es una pseudoexplicación.

Podría argumentarse que el concepto de entelequia no resulta inútil si proporciona a los biólogos una nueva orientación, un nuevo método de ordenar las leyes biológicas. Nuestra respuesta es que realmente sería útil si, por medio de él, pudiésemos formular leyes más generales de las que pudiésemos formular antes. En la física, por ejemplo, el concepto de energía desempeñó ese papel. Los físicos del siglo XIX teorizaron que quizá ciertos fenómenos, como la energía cinética y potencial en la mecánica, el calor (esto fue antes del descubrimiento de que el calor es simplemente la energía cinética de las moléculas), la energía de los campos magnéticos, y así sucesivamente, podrían ser manifestaciones de un tipo básico de energía. Esto condujo a experimentos que demostraron que la energía mecánica puede ser transformada en calor, y que el calor es energía mecánica, y que la cantidad de energía permanece constante. Así, la energía fue un concepto útil porque condujo a leyes más generales, tal como la ley de la conservación de la energía. Pero la entelequia de Driesch no fue un concepto fructífero en este sentido, porque no condujo al descubrimiento de leyes biológicas más generales.

Además de suministrar *explicaciones* para los hechos observados, las leyes de la ciencia también proveen un medio para *predecir* nuevos hechos aún no observados. El esquema lógico involucrado aquí es exactamente el mismo que el esquema subyacente bajo la explicación. Éste, como recordarán, estaba expresado simbólicamente como:

1.  $(x)(Px \supset Qx)$
2.  $Pa$
3.  $Qa$

Primero tenemos una ley universal: para cualquier objeto  $x$ , si tiene la propiedad  $P$ , entonces también tiene la propiedad  $Q$ . Segundo, tenemos una declaración diciendo

que el objeto  $a$  tiene la propiedad  $P$ . Tercero, deducimos, a partir de lógica elemental, que el objeto  $a$  tiene la propiedad  $Q$ . Este esquema subyace tanto bajo la explicación como bajo la predicción; solamente cambia la situación del conocimiento. En la explicación, el hecho  $Qa$  ya es conocido. Explicamos  $Qa$  al mostrar cómo puede deducirse de las declaraciones 1 y 2. En la predicción,  $Qa$  es un hecho *aún no conocido*. Tenemos una ley, y tenemos el hecho  $Pa$ . Concluimos que  $Qa$  debe ser también un hecho, incluso cuando aún no ha sido observado. Por ejemplo, conocemos la ley de expansión térmica. También sabemos que hemos calentado una determinada barra. Al aplicar la lógica de la forma mostrada en el esquema, inferimos que, si ahora medimos la barra, descubriremos que es más larga de lo que era antes.

En la mayoría de los casos, el hecho desconocido es en realidad un evento futuro (por ejemplo, un astrónomo predice la fecha del siguiente eclipse de Sol), y es por eso que utilizo el término “predicción” para este segundo uso de las leyes. Pero no requiere ser una predicción en el sentido literal de la palabra. En muchos casos, el hecho desconocido es simultáneo al hecho conocido, como en el caso del ejemplo de la barra calentada. La expansión de la barra ocurre simultáneamente al calentamiento de ésta, y es sólo nuestra observación de la expansión la que tiene lugar después de nuestra observación del calentamiento.

En otros casos, el hecho desconocido puede incluso estar en el pasado. Sobre la base de leyes psicológicas, junto con ciertos hechos derivados de documentos históricos, un historiador infiere determinados hechos desconocidos de la historia. Un astrónomo puede inferir que un eclipse de la Luna debe haber tenido lugar en una determinada fecha en el pasado. Un geólogo puede inferir, a partir de las estrías en las rocas, que en una fecha del pasado una cierta región tuvo que haber estado cubierta por un glaciar. Utilizo el término “predicción” para todos estos ejemplos porque en cada caso tenemos el mismo esquema lógico y la misma situación de conocimiento (un hecho conocido y una ley conocida de las cuales derivamos un hecho desconocido).

En muchos casos, la ley involucrada puede ser estadística y no universal. La predicción será, entonces, solamente probable. Un meteorólogo, por ejemplo, trata con una mezcla de leyes físicas exactas y varias leyes estadísticas. No puede decir que mañana lloverá; sólo puede decir que la lluvia es muy probable.

Esta incertidumbre también es característica de la predicción del comportamiento humano. Teniendo como base el conocimiento de ciertas leyes psicológicas de una naturaleza estadística y de ciertos hechos sobre una persona,

podemos predecir, con diversos grados de probabilidad, cómo es que se comportará. Si le pedimos a un psicólogo que nos diga qué efecto tendrá sobre nuestro hijo un determinado evento, responderá: “Tal como veo la situación, su hijo probablemente reaccionará de esta manera. Desde luego, las leyes de la psicología no son muy exactas. Es una ciencia joven, y hasta ahora conocemos muy poco sobre sus leyes. Pero, sobre la base de lo que es conocido, pienso que es recomendable que...”. Y así nos da un consejo basado sobre la mejor predicción que puede hacer, con sus leyes probabilísticas, acerca del comportamiento futuro de nuestro hijo.

Cuando la ley es universal, entonces la lógica deductiva elemental está involucrada en inferir hechos desconocidos. Si la ley es estadística, debemos usar una lógica distinta, i. e., la lógica de la probabilidad. Para dar un ejemplo: una ley establece que el 90% de los residentes de una cierta región tienen pelo negro. Sé que un individuo es el residente de tal región, pero ignoro el color de su pelo. Sin embargo, puedo inferir, sobre la base de la ley estadística, que la probabilidad de que su pelo sea negro es  $\frac{9}{10}$ .

La predicción es, por supuesto, tan esencial a la vida cotidiana como lo es a la ciencia. Incluso los actos más triviales que llevamos a cabo durante el día están basados en predicciones. Uno gira el pomo de una puerta. Lo hace porque observaciones de hechos pasadas, junto con ciertas leyes universales, lo llevan a uno a creer que girar el pomo abrirá la puerta. Uno puede no estar consciente del esquema lógico involucrado - sin duda se estará pensando en otras cosas -, pero todas las acciones deliberadas como ésta presuponen el esquema. Existe un conocimiento de hechos específicos, un conocimiento de determinadas regularidades observadas que pueden expresarse como leyes universales o estadísticas y que proveen la base para la predicción de hechos desconocidos. La predicción está involucrada en todo acto del comportamiento humano que suponga elección deliberativa. Sin ella, tanto la ciencia como la vida cotidiana serían imposibles.

## CAPÍTULO 2

### Inducción y probabilidad estadística

En el capítulo 1, asumimos que las leyes de la ciencia eran válidas. Vimos cómo tales leyes son utilizadas, tanto en la ciencia como en la vida cotidiana, como explicaciones de hechos conocidos y como un medio para predecir hechos desconocidos. Preguntémonos ahora cómo es que llegamos a estas leyes. ¿Sobre qué base estamos justificados para creer que una ley se sostiene? Sabemos, desde luego, que todas las leyes están basadas en las observaciones de ciertas regularidades. Constituyen un conocimiento indirecto, opuesto al conocimiento directo de los hechos. ¿Qué justifica que vayamos de la observación directa de hechos a una ley que exprese determinadas regularidades de la naturaleza? Esto es lo que, en la terminología clásica, se conoce como “el problema de la inducción”.

La inducción es a menudo contrastada con la deducción al asegurar que esta última va de lo general a lo específico o singular, mientras que la primera recorre el otro camino, de lo singular a lo general. Esta es una simplificación engañosa. En la deducción, existen tipos de inferencia distintos a los que van de lo general a lo específico; en la inducción, también hay muchos tipos de inferencia. La distinción clásica también es engañosa porque sugiere que tanto la deducción como la inducción son simplemente dos ramas de un solo tipo de lógica. El célebre trabajo de John Stuart Mill, *A System of Logic*, contiene una larga descripción de lo que Mill llamó “lógica inductiva”, y establece varios cánones del procedimiento inductivo. Hoy somos más reacios a utilizar el término “inferencia inductiva”, y si después de todo se le utiliza, debemos entender que se refiere a un tipo de inferencia que difiere fundamentalmente de la deducción.

En la lógica deductiva, la inferencia conduce de un conjunto de premisas a una conclusión tan cierta como las premisas. Si se tiene alguna razón para creer las premisas, se tiene una razón igualmente válida para creer la conclusión que se sigue lógicamente de las premisas. Si las premisas son verdaderas, la conclusión no puede ser falsa. Con respecto a la inducción, la situación es completamente distinta. La verdad de una conclusión inductiva nunca es cierta. Con esto no quiero decir solamente que la conclusión no puede ser cierta porque descansa sobre premisas que no pueden

conocerse con certeza. Incluso si las premisas se asumen como verdaderas y la inferencia es una inferencia inductiva válida, la conclusión puede ser falsa. Lo más que podemos decir es que, con respecto a las premisas dadas, la conclusión tiene un cierto grado de probabilidad. La lógica inductiva nos dice cómo calcular el valor de esta probabilidad.

Sabemos que las declaraciones de hecho singulares, obtenidas a partir de la observación, no son nunca absolutamente ciertas porque podemos cometer errores en nuestras observaciones; pero, con respecto a las leyes, existe una incertidumbre aún mayor. Una ley sobre el mundo establece que, en cualquier caso particular, en cualquier lugar y en cualquier tiempo, si una cosa es verdadera, otra cosa es verdadera. Es claro que esto se refiere a una infinitud de casos posibles. Los casos reales podrán no ser infinitos, pero hay una infinitud de casos posibles. Una ley fisiológica dice que, si se clava una daga en el corazón de cualquier ser humano, éste morirá. Ya que nunca ha sido observada excepción alguna a esta ley, es aceptada como universal. Es cierto, obviamente, que el número de casos hasta ahora observados de dagas siendo clavadas en corazones humanos es finito. Es posible que algún día la humanidad se extinga, y, en tal caso, el número de seres humanos, tanto pasados como futuros, es finito. Pero no sabemos si la humanidad se extinguirá. Por tanto, debemos decir que hay una infinitud de casos posibles, todos cubiertos por la ley. Y, si hay una infinitud de casos, ningún número de observaciones finitas, sin importa cuán grande sea, puede hacer que la ley “universal” sea cierta.

Claro está que podemos seguir y hacer más y más observaciones, llevándolas a cabo de la manera más cuidadosa y científica que podamos, hasta que, eventualmente, podamos decir: “Esta ley ha sido comprobada tantas veces que podemos estar totalmente seguros de su verdad. Es una ley bien establecida y bien fundada.” Pero si pensamos en lo anterior, veremos que incluso las leyes de la física mejor fundadas deben descansar únicamente sobre un número finito de observaciones. Siempre es posible que mañana pueda encontrarse un contraejemplo. En ningún momento es posible llegar a la verificación *completa* de una ley. En realidad, no deberíamos hablar, en absoluto, de “verificación” - si por la palabra entendemos un establecimiento definitivo de la verdad -, sino sólo de confirmación.

Curiosamente, aunque no hay forma alguna por la que una ley pueda ser verificada (en el sentido estricto de la palabra), existe una forma simple por la que puede ser falseada: uno necesita encontrar un solo contraejemplo. El conocimiento de

un contraejemplo puede ser, a su vez, incierto, ya que uno puede haber cometido un error de observación o haberse engañado de alguna forma. Pero si asumimos que el contraejemplo es un hecho, entonces la negación de la ley se sigue inmediatamente. Si una ley dice que todo objeto  $P$  es también  $Q$ , y encontramos un objeto  $P$  que no es  $Q$ , la ley está refutada. Un millón de casos positivos son insuficientes para verificar una ley; un contraejemplo es suficiente para falsearla. La situación es fuertemente asimétrica. Es fácil refutar una ley; es extremadamente complicado encontrar una confirmación fuerte.

¿Cómo es que encontramos la confirmación de una ley? Si hemos observado un gran número de casos positivos y ningún caso negativo, decimos que la confirmación es fuerte. Qué tan fuerte es y si esta fuerza puede ser expresada numéricamente son todavía cuestiones controversiales en la filosofía de la ciencia. Regresaremos a esto en un momento. Aquí únicamente nos interesa dejar en claro que nuestra primera tarea al buscar la confirmación de una ley es comprobar casos para determinar si son positivos o negativos. Esto se hace utilizando nuestro esquema lógico para hacer predicciones. Una ley establece que  $(x)(Px \supset Qx)$ ; por lo tanto, para un objeto dado  $a$ ,  $Pa \supset Qa$ . Intentamos encontrar tantos objetos como podamos (simbolizados aquí por “ $a$ ”) que tengan la propiedad  $P$ . Después observamos si también satisfacen la condición  $Q$ . Si encontramos un caso negativo, el asunto está resuelto. De otra forma, cada nuevo caso positivo supone evidencia adicional que se suma a la fuerza de nuestra confirmación.

Evidentemente, existen varias reglas metodológicas para llevar a cabo comprobaciones eficientes. Por ejemplo, deben diversificarse los casos tanto como sea posible. Si se está comprobando la ley de expansión térmica, uno no debe limitar sus pruebas a sustancias sólidas. Si se está comprobando la ley de que todos los metales son buenos conductores de electricidad, uno no debe confinar sus pruebas a muestras de cobre. Deben probarse tantos metales como sea posible y bajo varias condiciones - de calor, frío, etc. -. No entraremos en las muchas reglas metodológicas para la comprobación; simplemente señalaremos que, en todos los casos, la ley es comprobada al hacer predicciones y viendo después si éstas se cumplen. En algunos casos, encontramos en la naturaleza los objetos con los que queremos probar. En otros, debemos producirlos. Al comprobar la ley de expansión térmica, por ejemplo, no buscamos objetos que estén calientes, sino que tomamos ciertos objetos y los calentamos. Producir condiciones para la comprobación tiene la gran ventaja de que podemos seguir la regla metodológica de diversificación más fácilmente. Sea como

fuere, ya sea que nosotros creemos las situaciones a ser comprobadas o ya las encontremos confeccionadas en la naturaleza, el esquema subyacente es el mismo.

Hace un momento planteé la cuestión de si el grado de confirmación de una ley (o de una única declaración que estemos prediciendo por medio de una ley) puede expresarse en una forma cuantitativa. En lugar de decir que una ley está “bien fundada” y que otra ley “descansa sobre una evidencia endeble”, podemos decir que la primera ley tiene un grado de confirmación de 0.8, mientras que el grado de confirmación para la segunda ley es de tan sólo 0.2. Esta cuestión ha sido muy debatida. Mi punto de vista es que este procedimiento es legítimo, y que lo que he llamado “grado de confirmación” es idéntico a la probabilidad lógica.

Una declaración como tal no significa mucho hasta que sepamos qué se quiere decir con “probabilidad lógica”. ¿Por qué añadí el adjetivo “lógica”? Sin duda no es una práctica común; la mayoría de los libros sobre probabilidad no distinguen entre los distintos tipos de probabilidad, siendo la “lógica” uno de ellos. Es mi creencia, sin embargo, que hay dos tipos fundamentalmente distintos de probabilidad, y los distingo llamando a uno “probabilidad estadística” y al otro “probabilidad lógica”. Es desafortunado que la misma palabra, “probabilidad”, ha sido usada en dos sentidos tan distintos. No hacer esta distinción es fuente de una enorme confusión en los libros sobre filosofía de la ciencia, así como en el discurso de los propios científicos.

En lugar de “probabilidad lógica”, a veces uso el término “probabilidad inductiva”, porque, en mi concepción, este es el tipo de probabilidad al que uno se refiere cuando se lleva a cabo una inferencia inductiva. Por “inferencia inductiva” no sólo me refiero a la inferencia de los hechos a las leyes, sino también a cualquier inferencia “no demostrativa”, esto es, a una inferencia tal que la conclusión no se siga con necesidad lógica cuando esté dada la verdad de las premisas. Estas inferencias deben expresarse en grados de lo que he llamado “probabilidad lógica” o “probabilidad inductiva”. Para ver claramente la distinción entre este tipo de probabilidad y la probabilidad estadística, resulta útil echar un breve vistazo a la historia de la teoría de la probabilidad.

La primera teoría de la probabilidad, ahora comúnmente llamada “teoría clásica”, fue desarrollada durante el siglo XVIII. Jacob Bernoulli (1654-1705) fue el primero en escribir un tratado sistemático sobre ella, y el reverendo Thomas Bayes realizó importantes contribuciones a la teoría. A finales de ese siglo, el gran matemático y físico Pierre Simon de Laplace escribió el primer gran tratado sobre el tema. Era una

comprehensiva elaboración matemática de una teoría de la probabilidad, y puede considerarse como el clímax del periodo clásico.

La aplicación de la probabilidad a lo largo del periodo clásico fue principalmente a juegos de azar como los dados, las cartas, y la ruleta. En realidad, la teoría tuvo su origen en el hecho de que algunos jugadores de la época pidieron a Pierre Fermat y a otros matemáticos que calcularan para ellos las probabilidades exactas supuestas en ciertos juegos de azar. Así es que la teoría comenzó con ciertos problemas concretos, no con una teoría matemática general. A los matemáticos de la época les pareció extraño que cuestiones de este tipo pudiesen ser respondidas aun cuando no había un campo de las matemáticas disponible para proporcionar tales respuestas. Como consecuencia de lo anterior, desarrollaron la teoría combinatoria, que podía aplicarse a problemas de azar.

¿Qué entendían por “probabilidad” estos hombres que desarrollaron la teoría clásica? Propusieron una definición que aún se encuentra en los libros elementales sobre probabilidad: la probabilidad es la proporción del número de casos favorables entre el número de todos los casos posibles. Veamos cómo funciona en un ejemplo sencillo. Si alguien dice: “Yo arrojó este dado. ¿Cuál es la probabilidad de que salgan un uno o un cuatro?” La respuesta, de acuerdo con la teoría clásica, es como sigue. Existen dos casos “favorables”, es decir, casos que satisfacen las condiciones especificadas en la pregunta. En total, hay seis formas posibles en las que puede caer el dado. La proporción de casos favorables a casos posibles es, por tanto,  $2:6$  o  $1:3$ . Respondemos a la pregunta diciendo que hay una probabilidad de  $\frac{1}{3}$  de que el dado muestre, al caer, un uno o un cuatro.

Todo esto parece muy claro, incluso obvio, pero hay una dificultad importante en la teoría. Los autores clásicos dijeron que, antes de que uno pueda aplicar su definición de probabilidad, se debe asegurar que todos los casos involucrados sean igualmente probables. Ahora parecemos estar atrapados en un círculo vicioso. Intentamos definir qué queremos decir con probabilidad, y al hacerlo utilizamos el concepto de “igualmente probable”. En realidad, los proponentes de la teoría clásica no lo pusieron en estos términos. Dijeron que los casos deben ser “equiposibles”. Esto, a su vez, fue definido por un célebre teorema que llamaron “el principio de razón insuficiente”. Hoy es comúnmente llamado “el principio de indiferencia”. Si uno no

conoce alguna razón por la cual un caso deba ocurrir en lugar de otro, entonces los casos son equiposibles.

Así fue, en resumen, como fue definida la probabilidad en el periodo clásico. Sobre este enfoque clásico ha sido construida toda una teoría matemática comprensiva, pero la única cuestión que aquí nos ocupa es si el fundamento de esta teoría - la definición clásica de probabilidad - es adecuado para la ciencia.

Durante el siglo XIX, paulatinamente fueron surgiendo voces críticas contra la definición clásica. En el siglo XX, alrededor de los años 20, tanto Richard von Mises como Hans Reichenbach hicieron fuertes críticas al enfoque clásico.<sup>1</sup> Mises dijo que la “equiposibilidad” no puede ser entendida excepto en el sentido de “equiprobabilidad”. Pero si esto es lo que significa, estamos, en efecto, atrapados en un círculo vicioso. La tradición clásica, afirmó Mises, es circular y por consiguiente inutilizable.

Mises tenía otra objeción. Concedió que, en ciertos casos simples, podemos confiar en el sentido común para saber si ciertos eventos son equiposibles. Podemos saber que la cara y la cruz son resultados equiposibles cuando se arroja una moneda porque no conocemos razón alguna por la cual una deba salir en vez de la otra. Sucede lo mismo con la ruleta; no hay razón alguna por la cual la pelota deba caer en un compartimiento y no en otro. Si las cartas de juego son del mismo tamaño y forma, con idénticas partes posteriores, y son bien barajadas, entonces es igualmente probable que se reparta una carta a un jugador como cualquier otra. De nuevo, las condiciones de equiposibilidad están satisfechas. Pero, Mises continuó, ninguno de los autores clásicos indicó cómo es que esta definición de probabilidad podría ser aplicada a muchas otras situaciones. Consideremos las tablas de mortalidad. Las compañías de seguros tienen que conocer la probabilidad de que, en los Estados Unidos, un hombre de cuarenta años y sin enfermedades serias, vaya a estar vivo para la misma fecha del siguiente año. Deben ser capaces de calcular probabilidades de este tipo porque son la base sobre la cual la compañía determina sus tasas.

¿Cuáles son, preguntó Mises, los casos equiposibles para un hombre? Supongamos que el Sr. Smith aplica para un seguro de vida y la compañía lo envía con un doctor. Éste reporta que Smith no tiene enfermedades serias y que su acta de nacimiento muestra que tiene cuarenta años. Entonces la compañía examina sus tablas

---

<sup>1</sup> Sobre los puntos de vista de Mises y Reichenbach, véase Richard von Mises, *Probability, Statistics, and Truth* (Nueva York: Macmillan, 1939), y Hans Reichenbach, *The Theory of Probability* (Berkeley, California: University of California Press, 1949).

de mortalidad, y sobre la base de la probable expectativa de vida de este hombre, le ofrece un seguro a una tasa determinada. El Sr. Smith puede morir antes de que cumpla cuarenta y un años, o puede vivir hasta los cien. La probabilidad de sobrevivir un año más disminuye cada vez más a medida que envejece. Supongamos que muere a los cuarenta y cinco años. Esto es malo para la compañía de seguros, porque él pagó sólo unas cuantas primas, y ahora le tienen que pagar \$20,000 a su beneficiario. ¿Dónde están los casos equiposibles? El Sr. Smith puede morir a la edad de cuarenta años, o cuarenta y uno, o cuarenta y dos, y así sucesivamente. Estos son los casos posibles. Pero de ninguna manera son equiposibles; que muera a los 120 años es extremadamente improbable.

Mises señaló que una situación similar prevalece al aplicar la probabilidad a las ciencias sociales, a la predicción del tiempo, e incluso a la física. Estas situaciones no son como los juegos de azar, en donde los posibles resultados pueden clasificarse ordenadamente en  $n$  casos mutuamente exclusivos, completamente exhaustivos, que satisfacen las condiciones de equiposibilidad. Un pequeño cuerpo de sustancia radioactiva emitirá o no, en el siguiente segundo, una partícula alfa. La probabilidad de que emita la partícula es, digamos, de 0.0374. ¿Dónde están los casos equiposibles? No los hay. Únicamente tenemos dos casos: o emitirá la partícula alfa en el siguiente segundo, o no la emitirá. Esta fue la principal crítica de Mises a la teoría clásica.

Por el lado constructivo, Mises y Reichenbach dijeron lo siguiente. Lo que realmente queremos decir por probabilidad no tiene nada que ver con contar casos. Es más bien una medida de “frecuencia relativa”. Por “frecuencia absoluta”, nos referimos al número total de objetos u ocurrencias, por ejemplo, al número de personas en Los Ángeles que el año pasado murieron de tuberculosis. Por “frecuencia relativa” nos referimos a la proporción de este número al [número] de la clase mayor siendo investigada, esto es, al número total de habitantes de Los Ángeles.

Podemos hablar de la probabilidad de que caiga cierto lado de un dado, dijo Mises, no sólo en el caso de un dado normal, donde es  $\frac{1}{6}$ , sino también en todos los casos de todos los tipos de dados cargados. Supongamos que alguien afirma que el dado que tiene está cargado, y que la probabilidad de que salga un cuatro no es  $\frac{1}{6}$ , sino menos de  $\frac{1}{6}$ . Alguien más dice: “Estoy de acuerdo contigo en que el dado está cargado,

pero no en la manera en que lo crees. Pienso que la probabilidad de que salga un cuatro es mayor que  $\frac{1}{6}$ .” Mises señaló que, con el fin de saber qué quieren decir ambos hombres con sus afirmaciones divergentes, debemos ver la forma en la que intentan establecer sus respectivos argumentos. Desde luego, llevarán a cabo una prueba empírica. Tirarán el dado un número de veces, manteniendo un registro del número de tiros y del número de cuatros salidos.

¿Cuántas veces tirarán el dado? Supongamos que hacen 100 tiros y encuentran que el cuatro sale 15 veces. Esto es un poco menos que  $\frac{1}{6}$  de 100. ¿No prueba esto que el primer hombre está en lo correcto? “No.”, podrá decir el otro, “Aún pienso que la probabilidad es mayor que  $\frac{1}{6}$ . Cien tiros no son suficientes para una prueba adecuada.” Quizá los hombres continúen tirando el dado hasta que llegan a 6,000 tiros. Si el cuatro ha salido menos de 1,000 veces, el segundo hombre quizá decida rendirse. “Tienes razón.”, dirá, “Es menos que  $\frac{1}{6}$ .”

¿Por qué se detienen en 6,000 tiros? Puede ser que estén cansados. Puede ser que hayan apostado un dólar a qué lado del dado está cargado, y por un simple dólar no quieran estar tres días más lanzando el dado. Pero la decisión de detenerse en 6,000 tiros es puramente arbitraria. Si, después de 6,000 tiros, el número de cuatros salidos es muy cercano a 1,000, podrán considerar que la cuestión aún no está decidida. Una pequeña desviación bien puede deberse a la casualidad, y no tanto a una tendencia física del propio dado. En un plazo mayor, la tendencia podría causar una desviación en la dirección opuesta. Para realizar una prueba más decisiva, los hombres podrían decidir arrojar el dado 60,000 veces. Es claro que no hay un número finito de tiros o de lances, no importa qué tan grande sea, en el cual puedan detener la prueba y decir, con una certeza firme, que la probabilidad de que salga un cuatro es  $\frac{1}{6}$ , o menor que  $\frac{1}{6}$ , o mayor.

Ya que no existe un número finito de pruebas suficiente para determinar una probabilidad con certeza, ¿cómo puede ser definida tal probabilidad en términos de una frecuencia? Mises y Reichenbach propusieron que sea definida no como la frecuencia relativa en una serie finita de casos, sino como el *límite* de la frecuencia relativa en una serie interminable. (Fue esta definición la que distinguió los puntos de vista de Mises y

Reichenbach de los de R. A. Fisher, en Inglaterra, y de otros estadísticos que también criticaron la teoría clásica. Estos últimos introdujeron el concepto de frecuencia de la probabilidad no a partir de una definición, sino como un término primitivo en un sistema axiomático.) Claro está que Mises y Reichenbach eran muy conscientes - aunque se les ha acusado de no serlo - de que ningún observador podrá tener a su disposición la serie infinita de observaciones completa. Pero pienso que sus críticos se equivocaban al decir que esta nueva definición de probabilidad no tiene aplicación alguna. Tanto Reichenbach como Mises han mostrado que muchos teoremas pueden desarrollarse sobre la base de su definición, y que, con la ayuda de estos teoremas, podemos decir algo significativo. No podemos decir, con certeza, cuál es el valor de una probabilidad, pero si la serie es lo suficientemente grande, podemos decir cuál *probablemente* es la probabilidad. En el ejemplo del dado, podríamos decir que la probabilidad de que la probabilidad de sacar un cuatro sea mayor que  $\frac{1}{6}$  es muy pequeña. Quizá el valor de esta probabilidad de una probabilidad pueda ser calculado. Los hechos de que el concepto de límite sea usado en la definición y de que la referencia se haga a una serie infinita ciertamente causan complicaciones y dificultades, tanto lógicas como prácticas. Pero no hacen que la definición carezca de significado, como han afirmado algunos críticos.

Reichenbach y Mises convenían en el punto de vista de que este concepto de probabilidad, basado en el límite de una frecuencia relativa en una serie infinita, es el único concepto de probabilidad aceptable en la ciencia. La definición clásica, derivada del principio de indiferencia, había resultado inadecuada, y no se encontró ninguna nueva definición, distinta a la de Mises y Reichenbach, que fuese superior a la vieja. Pero ahora surgía de nuevo la problemática cuestión de los casos únicos. La nueva definición funcionaba bien para fenómenos estadísticos, pero ¿cómo podía ser aplicada a un único caso? Un meteorólogo anuncia que la probabilidad de lluvia para mañana es de  $\frac{2}{3}$ . “Mañana” se refiere a un día particular y a ningún otro. Como la muerte del hombre que aplica para un seguro de vida, es un evento único, irrepetible, y a pesar de todo queremos atribuirle una probabilidad. ¿Cómo puede hacerse esto sobre la base una definición de frecuencia?

Mises pensó que no podía hacerse, y que por tanto las declaraciones de probabilidad para casos únicos deben ser excluidas. Reichenbach, sin embargo, era

consciente de que, tanto en la ciencia como en la vida cotidiana, constantemente hacemos declaraciones de probabilidad sobre eventos únicos, y resultaría útil, pensó, encontrar una interpretación plausible para tales declaraciones. En la predicción del clima, es fácil ofrecer la interpretación pretendida. El meteorólogo tiene a su disposición un gran número de reportes de observaciones del clima pasadas, así como datos sobre el clima para hoy. Encuentra que el clima de hoy pertenece a una cierta clase, y que en el pasado, cuando ocurría el clima de esta clase, la frecuencia relativa con la que llovía al siguiente día era de  $\frac{2}{3}$ . Entonces, de acuerdo con Reichenbach, el meteorólogo hace una “postulación”, esto es, asume que la frecuencia observada de  $\frac{2}{3}$ , basada sobre una serie finita pero muy larga de observaciones, es también el límite de la serie infinita. En otras palabras, estima que el límite se encontrará en la vecindad de  $\frac{2}{3}$ . Después hace la declaración: “La probabilidad de lluvia para mañana es de  $\frac{2}{3}$ .”

La declaración del meteorólogo, sostuvo Reichenbach, debe ser considerada como una declaración elíptica. Si la expandiese a su significado pleno, diría: “De acuerdo con nuestras observaciones pasadas, los estados del tiempo como el hoy observado eran seguidos, con una frecuencia de  $\frac{2}{3}$ , por lluvia al día siguiente.” La declaración abreviada parece aplicar la probabilidad a un caso único, pero es sólo una manera de hablar. En realidad, la declaración se refiere a la frecuencia relativa en una larga serie. Lo mismo es cierto para la declaración: “En el siguiente tiro del dado, la probabilidad de que salga un cuatro es  $\frac{1}{6}$ .” El “siguiente tiro” es, como el “clima de mañana”, un evento único, solo. Cuando le atribuimos probabilidad, en realidad estamos hablando elípticamente sobre la frecuencia relativa en una larga serie de tiros.

De esta forma, Reichenbach encontró una interpretación de las declaraciones que atribuían probabilidad a eventos únicos. Incluso intentó encontrar una interpretación para declaraciones que atribuían probabilidad a hipótesis generales en la ciencia. Aquí no entraremos en ello porque es más complicado y porque (en contraste con su interpretación de predicciones de probabilidad singulares) no ha conseguido una aceptación general.

El siguiente desarrollo importante en la historia de la teoría de la probabilidad fue el surgimiento de la concepción *lógica*. Fue propuesta poco después de 1920 por John Maynard Keynes, el célebre economista británico, y desde entonces ha sido detallada por muchos autores. Hoy existe una animosa controversia entre los proponentes de esta concepción lógica y los que están a favor de la interpretación de la frecuencia. El siguiente capítulo tratará esta controversia y la manera en la que, pienso, puede ser resuelta.

## CAPÍTULO 3

### Inducción y probabilidad lógica

Para John Maynard Keynes, la probabilidad era una relación lógica entre dos proposiciones. No intentó definir esta relación, e incluso llegó a afirmar que no podía ser formulada definición alguna. Únicamente por intuición, insistía, podemos comprender qué significa la probabilidad. Su libro, *A Treatise on Probability*<sup>2</sup>, ofrece unos cuantos axiomas y definiciones, expresadas en lógica simbólica, aunque no muy sólidas desde un punto de vista moderno. Algunos de los axiomas de Keynes en realidad son definiciones, y algunas de sus definiciones en realidad son axiomas. Pero su libro es interesante desde una perspectiva filosófica, especialmente los capítulos en donde discute la historia de la teoría de la probabilidad y lo que hoy puede aprenderse de puntos de vista anteriores. Su argumento principal era que, cuando hacemos una declaración de probabilidad, no estamos haciendo una declaración sobre el mundo, sino sólo sobre una relación lógica entre otras dos declaraciones. Únicamente estamos diciendo que una declaración tiene una probabilidad lógica de tanto y tanto con respecto a otra declaración.

Yo utilizo la frase “tanto y tanto”. En realidad, Keynes fue más cauteloso. Dudaba que la probabilidad, en general, pudiese ser un concepto cuantitativo, esto es, un concepto con valores numéricos. Por supuesto, convenía en que esto podía hacerse en casos especiales, como en el lanzamiento de un dado, en donde aplicaba el viejo principio de indiferencia. El dado es simétrico, todos sus lados son iguales, no tenemos razón para sospechar que está cargado, etc. Lo mismo es cierto para otros juegos de azar, en donde las condiciones están cuidadosamente arregladas para producir una simetría física, o, por lo menos, una simetría con respecto a nuestro conocimiento e ignorancia. Las ruedas de la ruleta están hechas de modo tal que sus distintos sectores son iguales. La rueda está cuidadosamente balanceada para eliminar cualquier tendencia que pudiese causar que la pelota se detenga en un número en lugar de en otro. Si alguien lanza una moneda, no tenemos razón alguna para suponer que saldrá cara en vez de cruz.

---

<sup>2</sup> John Maynard Keynes, *A Treatise on Probability*, (Londres: Macmillan, 1921).

En situaciones restringidas de este tipo, decía Keynes, podemos aplicar legítimamente algo como la definición clásica de probabilidad. Coincidió con otros críticos del principio de indiferencia en que, en el periodo clásico, tal principio había sido utilizado en un sentido muy amplio, y que había sido mal aplicado a muchas situaciones, como la predicción de que mañana saldrá el Sol. Es cierto, decía, que en los juegos de azar y en otras situaciones simples el principio de indiferencia es aplicable, y pueden ser dados valores numéricos a la probabilidad. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones, no tenemos manera de definir casos equiposibles y, por lo tanto, ninguna justificación para aplicar el principio. En tales casos, decía Keynes, no debemos usar valores numéricos. Su actitud era prudente y escéptica. No quería ir demasiado lejos, pisar sobre lo que consideraba una capa de hielo muy fina, así que limitó la parte cuantitativa de su teoría. En muchas situaciones en donde no dudamos en hacer apuestas, en atribuir valores numéricos a predicciones de probabilidad, Keynes advirtió en contra de esta práctica.

La segunda figura importante en el surgimiento del moderno enfoque lógico de la probabilidad es Harold Jeffreys, un geofísico inglés. Su *Theory of Probability*, publicado por vez primera en 1939 por Oxford Press, defiende una concepción estrechamente relacionada con la de Keynes. Cuando Keynes publicó su libro (salió en 1921, así que probablemente lo escribió en 1920), las primeras publicaciones de Mises y Reichenbach sobre probabilidad recién habían visto la luz. Aparentemente, Keynes no supo de ellas. Criticó el enfoque de la frecuencia, pero no lo discutió a detalle. Al tiempo que Jeffreys escribió su libro, la interpretación de la frecuencia ya había sido desarrollada por completo, así que este libro fue mucho más explícito al tratar con ella.

Jeffreys dijo, categóricamente, que la teoría de la frecuencia es totalmente incorrecta. Ratificó el punto de vista de Keynes de que la probabilidad no se refiere a una frecuencia, sino a una relación lógica. Era mucho más osado que el precavido Keynes. Creía que *sí* podían asignarse valores numéricos a la probabilidad en un gran número de casos, especialmente en todos aquellos en donde se aplica la estadística matemática. Quería tratar los mismos problemas que interesaron a R. A. Fisher y a otros estadísticos, pero quería tratarlos sobre la base de un concepto distinto de probabilidad. Creo que, debido a que hizo uso de un principio de indiferencia, algunos de sus resultados están expuestos a las mismas objeciones que surgieron en contra de la teoría clásica. No obstante, en su libro es difícil encontrar declaraciones específicas para

criticar. Sus axiomas, tomados uno después de otro, son aceptables, y es sólo cuando intenta derivar teoremas de un cierto axioma que, en mi opinión, se extravía.

El axioma en cuestión está establecido por Jeffreys como sigue: “Asignamos el número mayor sobre datos dados a la proposición más probable (y, por consiguiente, números iguales a proposiciones igualmente probables).” Obviamente, la parte incluida en el paréntesis sólo dice que, si  $p$  y  $q$  son igualmente probables sobre la base de la evidencia  $r$ , entonces deben asignarse números iguales a  $p$  y  $q$  como sus valores de probabilidad con respecto a la evidencia  $r$ . La declaración no nos dice nada sobre las condiciones bajo las cuales consideramos a  $p$  y  $q$  como igualmente probables con respecto a  $r$ . En ningún otro lugar del libro establece Jeffreys tales condiciones, aunque más tarde en su libro interpreta este axioma de la manera más sorprendente para establecer teoremas sobre leyes científicas. “Si no hay razón alguna para creer una hipótesis en lugar de otra”, escribe, “las probabilidades son iguales.” En otras palabras, si tenemos evidencia insuficiente para decidir si una teoría es verdadera o falsa, debemos concluir que la teoría tiene una probabilidad de  $\frac{1}{2}$ .

¿Es este un uso legítimo del principio de indiferencia? Desde mi punto de vista, es un uso que ha sido justamente condenado por los críticos de la teoría clásica. Si se recurre al principio de indiferencia para algo, debe haber algún tipo de simetría en la situación, tal como la igualdad de los lados de un dado o de los sectores de una rueda de ruleta, que nos permita decir que ciertos casos son igualmente probables. Ante la ausencia de tales simetrías en las características lógicas o físicas de una situación, de ninguna manera se justifica asumir probabilidades iguales simplemente porque ignoramos los méritos relativos de hipótesis rivales.

Un simple ejemplo aclarará lo anterior. De acuerdo con la interpretación de Jeffreys de su propio axioma, podríamos asumir una probabilidad de  $\frac{1}{2}$  de que haya organismos vivos en Marte porque no tenemos razón suficiente para creer esta hipótesis ni razón suficiente para creer su negación. De la misma forma, podríamos razonar que la probabilidad de que haya animales en Marte es  $\frac{1}{2}$  y de que haya seres humanos es también  $\frac{1}{2}$ . Cada afirmación, considerada por sí misma, es una afirmación sobre la cual no tenemos evidencia suficiente de una manera u otra. Pero estas afirmaciones están

relacionadas entre sí de tal suerte que no pueden tener los mismos valores de probabilidad. La segunda afirmación es más fuerte que la primera porque implica la primera, mientras que la primera no implica la segunda. Por lo tanto, la segunda afirmación tiene menos probabilidad que la primera, y la misma relación se guarda entre una tercera y una segunda [afirmación]. Por consiguiente, debemos ser extremadamente cuidadosos al aplicar incluso un principio de indiferencia modificado, o, de lo contrario, es probable que lleguemos a tales inconsistencias.

La obra de Jeffreys ha sido duramente criticada por los estadísticos matemáticos. Conuerdo con su crítica sólo con respecto a los pocos lugares en donde Jeffreys desarrolla teoremas que no pueden ser derivados de sus axiomas. Por otra parte, diría que tanto Keynes como Jeffreys fueron pioneros que trabajaron en la dirección correcta.<sup>3</sup> Mi propio trabajo sobre la probabilidad está en la misma dirección. Comparto su punto de vista de que la probabilidad lógica es una relación lógica. Si se hace una declaración afirmando que, para una hipótesis dada, la probabilidad lógica con respecto a una evidencia dada es 0.7, entonces la declaración total es analítica. Esto significa que la declaración se sigue de la definición de probabilidad lógica (o de los axiomas de un sistema lógico) sin referencia alguna a cualquier cosa fuera del sistema, es decir, sin referencia a la estructura del mundo real.

En mi concepción, la probabilidad lógica es una relación lógica algo similar a la implicación lógica; de hecho, pienso que la probabilidad puede ser considerada como una implicación parcial. Si la evidencia es tan fuerte que la hipótesis se sigue lógicamente de ella - está lógicamente implicada por ella -, tenemos un caso extremo en donde la probabilidad es 1. (La probabilidad 1 también ocurre en otros casos, pero este es un caso especial en donde ocurre.) Similarmente, si la negación de una hipótesis está lógicamente implicada por la evidencia, la probabilidad lógica de la hipótesis es 0. En medio, hay un continuo de casos sobre los cuales la lógica deductiva no nos dice nada más allá de la afirmación negativa de que ni la hipótesis ni su negación pueden deducirse de la evidencia. Sobre este continuo, la lógica inductiva debe tomar el relevo. Pero la lógica inductiva es como la lógica deductiva en ocuparse únicamente de las declaraciones involucradas, no de los hechos de la naturaleza. A partir de un análisis

---

<sup>3</sup> Una evaluación técnica del trabajo de Keynes y Jeffreys, y de otros que defendieron la probabilidad lógica, se encuentra en la sección 62 de mi *Logical Foundations of Probability* (Chicago: University of Chicago Press, 1950). Seis secciones no técnicas de este libro fueron reimpresas como una pequeña monografía, *The Nature and Application of Inductive Logic* (Chicago: University of Chicago Press, 1951).

lógico de una hipótesis declarada  $h$  y de una evidencia declarada  $e$ , concluimos que  $h$  no está lógicamente implicada, sino que está, por así decirlo, parcialmente implicada por  $e$  al grado de tanto y tanto.

En este punto, en mi opinión, estamos justificados para asignar un valor numérico a la probabilidad. Si es posible, nos gustaría construir un sistema de lógica inductiva de un tipo tal que para cada par de oraciones, una afirmando la evidencia de  $e$  y otra estableciendo una hipótesis  $h$ , pudiésemos asignar un número dando la probabilidad lógica de  $h$  con respecto a  $e$ . (No consideramos el caso trivial en donde la oración  $e$  es contradictoria; en tales casos, no puede asignarse ningún valor de probabilidad a  $h$ .) He conseguido desarrollar posibles definiciones de tales probabilidades para lenguajes muy simples que contengan únicamente predicados de un solo lugar, y estoy trabajando en extender la teoría a lenguajes más exhaustivos. Desde luego, si la totalidad de la lógica inductiva, que estoy tratando de construir sobre esta base, debe de ser de algún valor para la ciencia, debe ser finalmente aplicable a un lenguaje cuantitativo como el que tenemos en la física, en donde no solamente hay predicados de uno o dos lugares, sino también magnitudes numéricas como la masa, la temperatura, etc. Creo que esto es posible, y que los principios básicos involucrados son los mismos que los principios que hasta ahora han estado guiando el trabajo en la construcción de una lógica inductiva para el lenguaje simple de predicados de un solo lugar.

Cuando digo que pienso que es posible aplicar una lógica inductiva al lenguaje de la ciencia, no me refiero a que sea posible formular un conjunto de reglas, fijadas de una vez por todas, que conduzcan, automáticamente y en cualquier campo, de los hechos a las teorías. Parece dudoso, por ejemplo, que las reglas puedan ser formuladas de tal manera que permitan a un científico estudiar cien mil oraciones que ofrezcan varios reportes de observación y después encontrar, por una aplicación mecánica de tales reglas, una teoría general (un sistema de leyes) que explicase los fenómenos observados. Por lo general, esto no es posible, porque las teorías, especialmente las más abstractas que tratan con no observables como las partículas y los campos, hacen uso de un marco conceptual que va mucho más allá del marco utilizado para la descripción del material de observación. Uno no puede simplemente seguir un procedimiento mecánico basado sobre reglas fijas para idear un nuevo sistema de conceptos teóricos, y con la ayuda de éste una teoría. Es necesario un ingenio creativo. Este último punto a veces se expresa diciendo que no puede haber una máquina inductiva, una computadora en

donde podamos meter todas las oraciones de observación relevantes y obtener, en la forma de una emisión, un ordenado sistema de leyes que explique los fenómenos observados.

Estoy de acuerdo con que no puede haber una máquina inductiva si el propósito de la máquina es inventar nuevas teorías. Pero creo que puede haber una máquina inductiva con un objetivo mucho más modesto. Dadas ciertas observaciones  $e$  y una hipótesis  $h$  (en la forma, por ejemplo, de una predicción o incluso de un conjunto de leyes), creo que en muchos casos es posible determinar, a partir de procedimientos mecánicos, la probabilidad lógica, o el grado de confirmación, de  $h$  sobre la base de  $e$ . Para este concepto de probabilidad, también uso el término “probabilidad inductiva”, porque estoy convencido de que este es el concepto básico involucrado en todo razonamiento inductivo, y que la tarea principal del razonamiento inductivo es la evaluación de esta probabilidad.

Cuando examinamos la situación actual en la teoría de la probabilidad, encontramos una controversia entre los defensores de la teoría de la frecuencia y aquellos que, como Keynes, Jeffreys, y yo, hablamos en términos de una probabilidad lógica. Sin embargo, existe una diferencia importante entre mi posición y la de Keynes y Jeffreys. Ellos rechazan el concepto de frecuencia de la probabilidad; yo no. Pienso que este concepto, también llamado probabilidad estadística, es un buen concepto científico, ya sea que sea introducido a partir de una definición explícita, como en los sistemas de Mises y Reichenbach, o introducido a partir de un sistema axiomático y de reglas de aplicación práctica (sin definición explícita alguna), como en la estadística matemática contemporánea. En ambos casos, considero este concepto como importante para la ciencia. En mi opinión, el concepto lógico de probabilidad es un segundo concepto, de una naturaleza totalmente distinta, aunque igualmente importante.

Las declaraciones que dan valores a la probabilidad estadística no son puramente lógicas; son declaraciones fácticas en el lenguaje de la ciencia. Cuando un médico dice que la probabilidad de que un paciente reaccione positivamente a una inyección es “muy buena” (o quizá utilice un valor numérico y diga que es de 0.7), está haciendo una declaración en la ciencia médica. Cuando un físico dice que la probabilidad de que un cierto fenómeno radioactivo es tanto y tanto, está haciendo una declaración en la física. La probabilidad estadística es un concepto científico, empírico. Las declaraciones sobre la probabilidad estadística son declaraciones “sintéticas”, declaraciones que no pueden ser decididas por la lógica, sino que descansan sobre investigaciones empíricas. Sobre

este punto, concuerdo completamente con Mises, Reichenbach, y los estadísticos. Cuando decimos: “Con este dado particular, la probabilidad estadística de sacar un cuatro es 0.157”, estamos expresando una hipótesis científica que puede ser comprobada solamente a partir de una serie de observaciones. Es una declaración empírica porque sólo una investigación empírica puede confirmarla.

A medida que la ciencia se desarrolla, las declaraciones de probabilidad de este tipo parecen ser cada vez más importantes, no sólo en las ciencias sociales, sino también en la física moderna. La probabilidad estadística está supuesta no solamente en áreas en donde es necesaria debido a la ignorancia (como en las ciencias sociales o cuando un físico calcula el camino de una molécula en un líquido), sino también como un factor esencial en los principios básicos de la teoría cuántica. Para la ciencia, resulta de mayor importancia tener una teoría de probabilidad estadística, y tales teorías han sido desarrolladas por los estadísticos y, de una forma distinta, por Mises y Reichenbach.

Por otra parte, también necesitamos del concepto de probabilidad lógica. Es especialmente útil en las declaraciones metacientíficas, esto es, en las declaraciones sobre la ciencia. Decimos a un científico: “Usted me dice que puedo confiar en esta ley al hacer una cierta predicción. ¿Qué tan bien establecida está la ley? ¿Qué tan fidedigna es la predicción?” Hoy en día, el científico podrá o no estar dispuesto a responder una cuestión metacientífica de este tipo en términos cuantitativos. Pero creo que, una vez que la lógica inductiva esté lo suficientemente desarrollada, podrá responder: “Esta hipótesis está confirmada a un grado de 0.8 sobre la base de la evidencia disponible.” Un científico que responda de esta manera está haciendo una declaración sobre una relación lógica entre la evidencia y la hipótesis en cuestión. El tipo de probabilidad que tiene en mente es una probabilidad lógica, que también llamo “grado de confirmación”. Su declaración de que el valor de esta probabilidad es 0.8 no es, en este contexto, una declaración sintética (empírica), sino analítica. Es analítica porque no es necesaria investigación empírica alguna. Expresa una relación lógica entre una oración que establece la evidencia y una oración que establece la hipótesis.

Observemos que, al hacer una declaración de probabilidad analítica, siempre es necesario especificar la evidencia de manera explícita. El científico no debe decir: “La hipótesis tiene una probabilidad de 0.8.” Debe añadir, “con respecto a tal y cual evidencia.” Si esto último no se añade, su declaración puede ser tomada como una declaración de probabilidad estadística. Si pretende que sea una declaración de probabilidad lógica, es una declaración elíptica en donde se ha dejado fuera un

componente importante. En la teoría cuántica, por ejemplo, a menudo es difícil saber si un físico se refiere a una probabilidad estadística o a una lógica. Usualmente, los físicos no hacen esta distinción. Hablan como si sólo hubiese un concepto de probabilidad con el que trabajan. “Nos referimos a tal tipo de probabilidad que satisface los axiomas ordinarios de la teoría de la probabilidad”, podrían decir. Pero los axiomas ordinarios de la teoría de la probabilidad están satisfechos por ambos conceptos, así que esta indicación no aclara la cuestión de exactamente a qué tipo de probabilidad se refieren.

Una ambigüedad similar se encuentra en las declaraciones de Laplace y de otros que desarrollaron la concepción clásica de la probabilidad. No eran conscientes, como sí lo somos hoy, de la diferencia entre la probabilidad lógica y la probabilidad de frecuencia. Por esa razón, no siempre resulta posible determinar a qué concepto se referían. No obstante, estoy convencido de que la mayor parte del tiempo - no siempre, desde luego - se referían al concepto lógico. Mises y otros frequentistas se equivocaron, en mi opinión, en ciertas críticas que hicieron a la teoría clásica. Mises creía que no había otro concepto científico de probabilidad que el concepto de frecuencia, así que asumió que, si los autores clásicos se referían por “probabilidad” a algo en absoluto, debieron haberse referido a la probabilidad estadística. Por supuesto, no eran capaces de decir, clara y explícitamente, que a la larga se referían a una frecuencia relativa, pero esto es, de acuerdo con Mises, lo que implícitamente querían decir. No estoy de acuerdo con lo anterior. Creo que, cuando los autores clásicos hicieron ciertas declaraciones sobre la probabilidad a priori, estaban hablando de la probabilidad lógica, que es analítica y, por tanto, *puede* ser conocida a priori. No considero a estas declaraciones como violaciones del principio de empirismo, como sí lo hacían Mises y Reichenbach.

Permítanme añadir unas palabras de advertencia. Después de haber expresado este punto de vista en mi libro sobre probabilidad, un cierto número de colegas - algunos de ellos amigos míos - señalaron algunas citas de los autores clásicos y dijeron que la probabilidad lógica no pudo haber sido lo que tales autores tenían en mente. Con esto estoy de acuerdo. En algunas de sus declaraciones, los autores clásicos no pudieron haberse referido a la probabilidad lógica; presumiblemente, se referían a la probabilidad de frecuencia. No obstante, estoy convencido de que su concepto básico era la probabilidad lógica. Pienso que incluso esto está implícito por el título del primer libro sistemático en el campo, *Ars conjectandi (El arte de la conjetura)*, de Jacob Bernoulli. La teoría de la probabilidad de Mises no es un arte de la conjetura. Es una teoría axiomática matemáticamente formulada de fenómenos masivos. No hay nada conjetural

en ella. Lo que Bernoulli quería decir era bastante distinto. Hemos visto ciertos eventos, decía, tales como la forma en que ha caído un dado, y queremos hacer una conjetura sobre cómo caerá si lo arrojamos de nuevo. Queremos saber cómo hacer apuestas racionales. La probabilidad, para los autores clásicos, era el grado de certeza o seguridad que pueden tener nuestras creencias sobre eventos futuros. Esto es probabilidad lógica, no probabilidad en el sentido estadístico.<sup>4</sup>

No entraré en más detalles sobre mi perspectiva de la probabilidad, porque están involucrados muchos tecnicismos. Pero sí discutiré la inferencia en donde ambos conceptos de probabilidad pueden unirse. Esto ocurre cuando, o bien la hipótesis, o bien una de las premisas para la inferencia inductiva, contiene un concepto de probabilidad estadística. Podemos ver fácilmente esto al modificar el esquema básico utilizado en nuestra discusión de las leyes universales. En lugar de una ley universal (1), tomamos, como primera premisa, una ley estadística (1'), que dice que la frecuencia relativa ( $rf$ ) de  $Q$  con respecto a  $P$  es (digamos) 0.8. La segunda premisa (2) establece, como antes, que una cierta  $a$  individual tiene la propiedad  $P$ . La tercera declaración (3) afirma que  $a$  tiene la propiedad  $Q$ . Esta tercera declaración,  $Qa$ , es la hipótesis que queremos considerar sobre la base de las dos premisas. En forma simbólica:

$$(1') rf(Q, P) = 0.8$$

$$(2) Pa$$

$$(3) Qa$$

¿Qué podemos decir sobre la relación lógica de (3) con (1') y con (2)? En el caso anterior - el esquema para una ley universal -, pudimos hacer la siguiente declaración lógica:

(4) La declaración (3) está lógicamente implicada por (1) y (2).

No podemos hacer una declaración así sobre el esquema dado arriba porque la nueva premisa (1') es más débil que la primera premisa (1); establece una frecuencia relativa y no una ley universal. Pero *podemos* hacer la siguiente declaración, que también afirma una relación lógica aunque en términos de probabilidad lógica o de grado de confirmación, y no en términos de implicación:

---

<sup>4</sup> Mi punto de vista general, de que tanto la probabilidad estadística como la lógica son conceptos científicos buenos, legítimos, que desempeñan distintos papeles, está expresado en el capítulo II de mi *Logical Foundations of Probability*, citado en la nota al pie anterior, y en mi artículo de 1945, "The Two Concepts of Probability", reimpreso en Herbert Feigl y Wilfrid Sellars, editores, *Readings in Philosophical Analysis* (Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1949), pp. 330-348, y Herbert Feigl y May Brodbeck, editores, *Readings in the Philosophy of Science* (Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1953), pp. 438-455. Para una defensa escrita de manera más popular del mismo punto de vista, véase mi artículo "What is Probability?", *Scientific American*, 189 (septiembre de 1953).

(4') La declaración (3), sobre la base de (1') y (2), tiene una probabilidad de 0.8.

Observemos que esta declaración, al igual que la declaración (4), no es una inferencia lógica a partir de (1') y (2). Ambas (4) y (4') son declaraciones en lo que se llama un metalenguaje; son declaraciones lógicas *sobre* tres afirmaciones: (1) [o (1'), respectivamente], (2), y (3).

Es importante comprender, de forma precisa, qué se quiere decir por una declaración como “La probabilidad estadística de  $Q$  con respecto a  $P$  es 0.8.” Cuando los científicos hacen este tipo de declaraciones, hablando de la probabilidad en el sentido de frecuencia, no siempre resulta exactamente claro a qué frecuencia se refieren. ¿Es la frecuencia de  $Q$  en una muestra observada? ¿Es la frecuencia de  $Q$  en la población total bajo consideración? ¿Es una *estimación* de la frecuencia en la población total? Si el número de casos observados en la muestra es muy grande, entonces la frecuencia de  $Q$  en la muestra puede que no difiera en algún grado significativo de la frecuencia de  $Q$  en la población o de una estimación de esta frecuencia. Sin embargo, es importante tener en mente las distinciones teóricas supuestas aquí.

Supongamos que queremos conocer qué porcentaje de cien mil hombres viviendo en una ciudad determinada se afeitan con rasuradoras eléctricas. Decidimos preguntar a mil de estos hombres. Con el fin de evitar una muestra parcial, debemos seleccionar a los mil hombres a partir de las formas desarrolladas por los expertos en el campo de las técnicas de encuesta modernas. Asumamos que obtenemos una encuesta imparcial, y que ochocientos hombres en la muestra reportaron usar una rasuradora eléctrica. La frecuencia relativa observada de esta propiedad es, por lo tanto, 0.8. Como mil hombres es una muestra bastante grande, podríamos concluir que la probabilidad estadística de esta propiedad, en la población total, es 0.8. Estrictamente hablando, esta no es una conclusión justificada. Sólo conocemos el valor de la frecuencia en la muestra; no conocemos el valor de la frecuencia en la población. Lo mejor que podemos hacer es una *estimación* de la frecuencia en la población, y no debe confundirse esta estimación con el valor de la frecuencia en la muestra. Por lo general, este tipo de estimaciones se desvían, en una cierta dirección, de la frecuencia relativa observada en una muestra.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Esta cuestión no es discutida en mi *Logical Foundations of Probability*, sino en una pequeña monografía, *The Continuum of Inductive Methods* (University of Chicago Press, 1952). He desarrollado un número de técnicas para estimar la frecuencia relativa sobre la base de muestras observadas.

Asumamos que (1') es conocido: la probabilidad estadística de  $Q$ , con respecto a  $P$ , es 0.8. (Cómo sabemos esto es una cuestión que no necesita considerarse. Pudimos haber hecho una prueba sobre la población total de cien mil hombres al entrevistar a cada uno de ellos.) La declaración de esta probabilidad es, desde luego, una declaración empírica. Supongamos, también, que la segunda premisa es conocida: (2)  $Pa$ . Ahora podemos hacer la declaración (4'), que dice que la probabilidad lógica de (3)  $Qa$ , con respecto a las premisas (1') y (2), es 0.8. Pero si la primera premisa no es una declaración de probabilidad estadística, sino la declaración de una frecuencia relativa observada en una muestra, entonces debemos considerar el tamaño de la muestra. Aún podemos calcular la probabilidad lógica, o el grado de confirmación, expresado en la declaración (4), pero no será exactamente 0.8. Se desviará en las formas que discuto en la monografía mencionada en la nota al pie anterior.

Cuando se hace una inferencia inductiva de esta forma, de una muestra a la población, de una muestra a una muestra futura desconocida, o de una muestra a un caso futuro desconocido, estamos hablando de una “inferencia de probabilidad indirecta”, o de una “inferencia inductiva indirecta”, distinta a la inferencia inductiva que va de la población a la muestra o al caso. Como dije antes, *si* el conocimiento de la probabilidad estadística real en la población está dado en (1'), es correcto imponer, en (4), el mismo valor numérico para el grado de confirmación. Tal inferencia no es deductiva; ocupa una posición un tanto intermedia entre los otros tipos de inferencias inductivas y deductivas. Algunos autores la han llamado una “inferencia de probabilidad deductiva”, pero yo prefiero hablar de ella como inductiva y no como deductiva. Siempre que esté dada la probabilidad estadística para una población, y queramos determinar la probabilidad para una muestra, los valores dados por mi lógica inductiva son los mismos que daría un estadístico. Pero si hacemos una inferencia indirecta de una muestra a la población, o de una muestra a un único caso futuro, o a una muestra finita futura (a estos últimos casos los llamo “inferencias predictivas”), entonces creo que los métodos utilizados en la estadística no son muy adecuados. En mi monografía *The Continuum of Inductive Methods* ofrezco, a detalle, las razones para mi escepticismo.

Los principales puntos que quiero subrayar aquí son los siguientes: ambos tipos de probabilidad - estadística y lógica - pueden ocurrir juntos en la misma cadena de razonamiento. La probabilidad estadística es parte del lenguaje objeto de la ciencia. A las declaraciones sobre probabilidad estadística podemos aplicar la probabilidad lógica, que es parte del metalenguaje de la ciencia. Estoy convencido de que este punto de vista

ofrece una imagen mucho más clara de la inferencia estadística de la que comúnmente se encuentra en los libros sobre estadística, y que suministra un trabajo preparatorio esencial para la construcción de una adecuada lógica inductiva de la ciencia.

## CAPÍTULO 4

### El método experimental

Una de las grandes señas de identidad de la ciencia moderna, comparada con la ciencia de periodos anteriores, es su énfasis en lo que se llama “método experimental”. Como hemos visto, todo el conocimiento empírico descansa, en última instancia, en observaciones, pero éstas pueden obtenerse de dos formas esencialmente distintas. En la forma no experimental, desempeñamos un papel pasivo. Simplemente miramos las estrellas o algunas flores, notamos similitudes y diferencias, e intentamos descubrir regularidades que puedan ser expresadas como leyes. En la forma experimental, desempeñamos un papel activo. En lugar de ser meros espectadores, *hacemos* algo que produzca mejores resultados de observación que aquellos que encontramos simplemente observando la naturaleza. En vez de esperar hasta que la naturaleza nos proporcione situaciones para observar, intentamos crearlas. En resumen, hacemos experimentos.

El método experimental ha sido enormemente fructífero. El gran progreso de la física en los últimos doscientos años, especialmente en las últimas décadas, habría sido imposible sin él. Si esto es así, uno podría preguntar, ¿por qué el método experimental no es utilizado en todos los campos de la ciencia? En algunos campos no es tan fácil de utilizar como en la física. En la astronomía, por ejemplo, no podemos empujar un planeta hacia alguna dirección para ver qué ocurre. Los objetos astronómicos están fuera de nuestro alcance; sólo podemos observarlos y describirlos. A veces los astrónomos pueden crear condiciones en el laboratorio similares a las que ocurren, digamos, sobre la superficie del Sol o de la Luna, y después observar qué sucede, en el laboratorio, bajo esas condiciones. Pero esto no es realmente un experimento astronómico. Es un experimento físico que tiene cierta relevancia para el conocimiento astronómico.

Razones totalmente distintas impiden a los científicos sociales hacer experimentos con grandes grupos de personas. Los científicos sociales sí hacen experimentos con grupos, pero por lo general son muy pequeños. Si queremos averiguar cómo reaccionarán las personas cuando sean incapaces de conseguir agua, podemos tomar dos o tres personas, someterlas a una dieta sin este líquido, y observar sus reacciones. Pero esto no nos dice mucho acerca de cómo es que reaccionará una gran

comunidad si se le cortase el suministro de agua. Sería un experimento interesante cortar el suministro de agua de Nueva York, por ejemplo. ¿La gente se volverá frenética o apática? ¿Intentarían organizar revueltas en contra del gobierno de la ciudad? Claro está que ningún científico social sugeriría hacer un experimento así, porque sabe que la comunidad no lo permitiría. Las personas no permitirían a los científicos sociales que jugaran con sus necesidades esenciales.

Incluso cuando no está supuesta una verdadera crueldad hacia una comunidad, a menudo existen fuertes presiones sociales en contra de experimentos con grupos. Por ejemplo, en México existe una tribu que realiza un cierto baile ritual siempre que hay un eclipse de Sol. Los miembros de esta tribu están convencidos de que sólo de esta forma pueden aplacar al dios que está causando el eclipse. Finalmente, la luz del Sol regresa. Supongamos que un grupo de antropólogos intenta convencer a estas personas de que su baile ritual no tiene nada que ver con la vuelta del Sol. Los antropólogos proponen a la tribu que no realice el baile la siguiente vez que se vaya la luz del Sol y vea qué sucede. Los miembros de la tribu responderán con indignación. Para ellos, significaría correr el riesgo de vivir el resto de sus vidas en la oscuridad. Creen tan fuertemente en su teoría, que no quieren ponerla a prueba. Así que, como ven, existen determinados obstáculos a los experimentos en las ciencias sociales incluso cuando los científicos están convencidos de que los experimentos realizados no causarían ningún daño social. El científico social está, por lo general, restringido a lo que pueda aprender de la historia y de experimentos con individuos y con grupos pequeños. En una dictadura, sin embargo, a menudo se hacen experimentos con grandes grupos, no sólo para probar una teoría, sino porque el gobierno cree que un nuevo procedimiento podrá funcionar mejor que uno viejo. El gobierno experimenta, a gran escala, en la agricultura, la economía, etc. En una democracia, no es posible llevar a cabo experimentos tan audaces porque, si no resultan tan bien como se pensaba, el gobierno tendrá que enfrentar a un público enfadado en la siguiente elección.

El método experimental es especialmente fructífero en campos en donde existen conceptos cuantitativos que pueden ser medidos con precisión. ¿Cómo planea el científico un experimento? Es difícil describir la naturaleza general de los experimentos porque éstos son de muy distintos tipos, pero sí pueden señalarse unas cuantas características generales.

Antes que nada, intentamos determinar los factores relevantes involucrados en el fenómeno a investigar. Algunos factores - aunque no muchos - deben dejarse de lado

por su irrelevancia. En un experimento en mecánica, por ejemplo, que suponga ruedas, palancas, etc., podríamos decidir ignorar la fricción. Sabemos que la fricción está involucrada, pero pensamos que su influencia es demasiado pequeña como para justificar complicar el experimento al considerarla. Similarmente, en un experimento con cuerpos de movimiento lento, podríamos elegir descuidar la resistencia del aire. Si estamos trabajando con velocidades muy altas, como un misil moviéndose a una velocidad supersónica, ya no podemos desatender la resistencia del aire. En resumen, el científico descarta sólo aquellos factores cuya influencia sobre su experimento será, así lo piensa él, insignificante. A veces, con el fin de no hacer un experimento demasiado complicado, el científico puede incluso descartar factores que piensa pueden tener efectos importantes.

Después de haber hecho la elección sobre los factores relevantes, diseñamos un experimento en donde algunos de estos factores se mantengan constantes mientras que a otros se les permita variar. Supongamos que estamos tratando con un gas en un recipiente, y queremos mantener la temperatura del gas tan constante como nos sea posible. Entonces sumergimos el recipiente en un baño de agua de mucho mayor volumen. (El calor específico del gas es tan pequeño en relación con el calor específico del agua que, incluso si la temperatura del gas varía momentáneamente, como por compresión o expansión, rápidamente volverá a su temperatura anterior.) O quizá queramos mantener una cierta corriente eléctrica a una tasa de flujo constante. Es posible que esto se consiga con un amperímetro de tal forma que, si observamos un aumento o una disminución en la corriente, podamos alterar la resistencia y mantener la corriente constante. En tales formas como éstas, podemos mantener ciertas magnitudes constantes mientras observamos qué sucede cuando varían otras magnitudes.

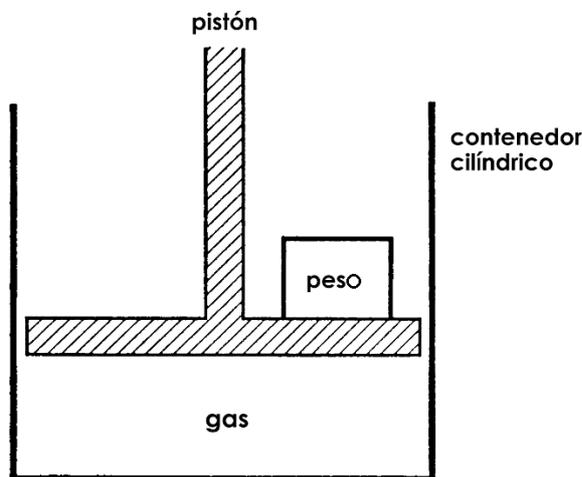
Nuestro objetivo final es encontrar leyes que conecten *todas* las magnitudes relevantes; pero, si están involucrados muchos factores, esta puede ser una tarea difícil. Al principio, por tanto, restringimos nuestro objetivo a leyes de nivel inferior que conecten *algunos* de los factores. El primer y más simple paso, si están involucradas  $k$  magnitudes, es arreglar el experimento de tal forma que se mantengan constantes  $k - 2$  magnitudes. Esto nos deja dos magnitudes,  $M_1$  y  $M_2$ , que podemos hacer variar libremente. Cambiamos una de ellas y observamos cómo se comporta la otra. Quizá  $M_2$  desciende siempre que se incrementa  $M_1$ . O quizá, a medida que se incrementa  $M_1$ ,  $M_2$  primero asciende y luego desciende. El valor de  $M_2$  es una función del valor de

$M_1$ . Podemos trazar esta función como una curva sobre una hoja de papel cuadriculado y posiblemente determinar la ecuación que expresa la función. Tendremos entonces una ley restringida: si se mantienen constantes las magnitudes  $M_3, M_4, M_5, \dots$ , y se incrementa  $M_1$ ,  $M_2$  varía en una forma expresada por una ecuación determinada. Pero esto es sólo el principio. Continuamos con nuestro experimento, controlando otros conjuntos de  $k - 2$  factores, de tal suerte que podamos ver cómo es que otros pares de magnitudes están funcionalmente relacionados. Más tarde, experimentamos, de la misma forma, con triples, manteniendo todo constante excepto tres magnitudes. En algunos casos, podemos conjeturar, a partir de nuestras leyes que se relacionan con los pares, algunas o todas las leyes concernientes a los triples. Después nos proponemos leyes todavía más generales que involucren cuatro magnitudes, y finalmente las leyes más generales, a veces sumamente complicadas, que cubran todos los factores relevantes.

Como un ejemplo sencillo, consideremos el siguiente experimento con un gas. Hemos realizado las observaciones en bruto de que la temperatura, el volumen, y la presión de un gas a menudo varían simultáneamente. Queremos saber, de manera exacta, cómo están relacionadas estas tres magnitudes. Un cuarto factor relevante es qué gas estamos utilizando. Podemos experimentar con otros gases más tarde, pero primero decidimos mantener este factor constante al utilizar únicamente hidrógeno puro. Ponemos el hidrógeno en un recipiente cilíndrico (véase la figura 4-1) con un pistón movable sobre el cual puede ponerse un peso. Fácilmente podemos medir el volumen del gas, y podemos hacer variar la presión al cambiar el peso sobre el pistón. La temperatura se regula y se mide por otros medios.

Antes de proceder con experimentos para determinar cómo es que los tres factores - temperatura, volumen, y presión - están relacionados, necesitamos hacer algunos experimentos preliminares para estar seguros de que no haya otros factores relevantes. Algunos factores que podríamos sospechar como irrelevantes podrían resultar no serlo. Por ejemplo, ¿es relevante la forma del recipiente que contiene al gas? Sabemos que, en algunos experimentos (por ejemplo, en la distribución de una carga eléctrica y su potencial de superficie), la forma del objeto involucrado sí es importante. Aquí no es difícil determinar que la forma del recipiente es irrelevante; sólo el volumen es importante. Podemos sacar, a partir de nuestro conocimiento de la naturaleza, muchos otros factores. Un astrólogo podría entrar al laboratorio y preguntar: “¿Has

contemplado el lugar en donde se encuentran los planetas hoy? Sus posiciones podrían tener alguna influencia sobre tu experimento.” Consideramos esto como un factor irrelevante porque creemos que los planetas están demasiado lejos como para tener influencia alguna.



**Figura 4-1.**

Nuestra suposición sobre la irrelevancia de los planetas es correcta, pero sería un error pensar que automáticamente podemos excluir varios factores simplemente porque creemos que no tienen influencia. No hay forma de estar realmente seguros hasta que se hayan realizado pruebas experimentales. Imaginemos vivir antes de la invención del radio. Alguien pone una caja sobre una mesa y nos dice que, si alguien canta en cierto lugar que se encuentra a mil kilómetros, escucharás que el aparato en esta caja reproduce exactamente la misma canción, con los mismos tono y ritmo. ¿Lo creerías? Quizá le responderías: “¡Es imposible! No hay cables conectados a esta caja. Sé, por mi experiencia, que nada que suceda a mil kilómetros puede tener algún efecto sobre lo que está pasando en este cuarto.”

¡Este es exactamente el mismo razonamiento por el cual decidimos que las posiciones de los planetas no podrían afectar nuestros experimentos con el hidrógeno! Es evidente que debemos ser muy cautelosos, porque a veces hay influencias sobre las que no podemos saber hasta que son descubiertas. Por esta razón, el primer paso en nuestro experimento - determinar los factores relevantes - es a veces difícil. Además, es un paso que, con frecuencia, no es explícitamente mencionado en los reportes de investigación. Un científico describe solamente el aparato que utilizó, el experimento

que llevó a cabo, y lo que descubrió sobre las relaciones entre ciertas magnitudes. No añade, “además, encontré que tales y cuales factores no tienen influencia sobre los resultados”. En la mayoría de los casos, cuando se conoce lo suficiente sobre el campo en donde se realiza la investigación, el científico dará por sentado que otros factores son irrelevantes. Puede que esté en lo cierto, pero en nuevos campos, uno debe ser extremadamente cuidadoso. Desde luego, nadie pensaría que un experimento de laboratorio pudiera verse afectado por si vemos al aparato desde una distancia de diez centímetros o de un metro, o por si estamos en una disposición amable o colérica cuando lo observamos. Estos factores son probablemente irrelevantes, pero no podemos estar absolutamente seguros. Si alguien tiene la sospecha de que estos son factores relevantes, entonces debe hacer un experimento para descartarlos.

Las consideraciones prácticas nos previenen, claro está, de comprobar cada factor que pudiese ser relevante. Pueden comprobarse miles de posibilidades remotas, y sencillamente no hay tiempo para examinarlas todas. Debemos proceder de acuerdo con el sentido común, y corregir nuestras suposiciones únicamente cuando suceda algo inesperado que nos fuerce a considerar como relevante un factor que previamente habíamos descartado. ¿Tendrá alguna influencia sobre la longitud de onda de la luz utilizada en un experimento el color de las hojas de los árboles fuera del laboratorio? ¿Funcionará distinto la pieza de un aparato dependiendo de si su propietario legal está en Nueva York o en Chicago, o de cómo se sienta respecto al experimento? Obviamente, no tenemos tiempo para comprobar tales factores. Asumimos que la actitud mental del dueño del aparato no tiene influencia física alguna sobre el experimento, aunque los miembros de ciertas tribus podrían diferir. Podrían creer que los dioses asistirán al experimento sólo si el dueño del aparato así lo desea, y no lo harán si el presunto dueño no lo desea. De esta forma, las creencias culturales influyen en lo que se considera relevante. En casi todos los casos, un científico piensa sobre el problema, hace una suposición de sentido común sobre qué factores vale la pena considerar, y quizá lleve a cabo unos pocos experimentos preliminares para descartar factores sobre los que tiene alguna duda.

Supongamos que hemos decidido que los factores relevantes para nuestro experimento con el hidrógeno son la temperatura, la presión, y el volumen. En nuestro recipiente, tanto la naturaleza como la cantidad total de gas continúan siendo las mismas porque mantenemos al gas en un recipiente cerrado. Somos libres, por tanto, de poner a prueba las relaciones entre los tres factores. Si mantenemos una temperatura constante

pero aumentamos la presión, descubrimos que el volumen varía inversamente con la presión. Esto es, si duplicamos la presión, el volumen disminuirá a la mitad de su cantidad inicial. Si triplicamos la presión, el volumen disminuirá a un tercio. Este es el célebre experimento realizado en el siglo XVII por el físico irlandés Robert Boyle. La ley que descubrió, conocida como la ley de Boyle, establece que si la temperatura de un gas confinado permanece la misma, el producto del volumen y la presión es constante.

Después, mantenemos constante la presión (al dejar el mismo peso sobre el pistón) y hacemos variar la temperatura. Entonces descubrimos que el volumen aumenta cuando el gas es calentado y disminuye cuando es enfriado; y, al medir el volumen y la temperatura, encontramos que el volumen es proporcional a la temperatura. (A esto a veces se le llama la ley de Charles, en honor al científico francés Jacques Charles.) Debemos tener cuidado en no utilizar ni la escala de Fahrenheit, ni la escala de grados centígrados, sino una escala en donde cero sea “cero absoluto” o  $-273^{\circ}$  en la escala de grados centígrados. Esta es la “escala absoluta”, o la “escala de Kelvin”, introducida por Lord Kelvin, un físico escocés del siglo XIX. Ahora es fácil pasar a la verificación experimental de una ley general que cubra los tres factores. Tal ley está, en realidad, sugerida por las dos leyes que ya hemos obtenido, pero la ley general tiene más contenido empírico que las dos leyes tomadas en conjunto. Esta ley general establece que, si la cantidad de un gas confinado permanece constante, el producto de la presión y el volumen es igual al producto de la temperatura y  $R$  ( $P \cdot V = T \cdot R$ ). En esta ecuación,  $R$  es una constante que varía con la cantidad de gas bajo consideración. Esta ley general da las relaciones entre las tres magnitudes, y es, por lo tanto, de una eficiencia significativamente mayor al hacer predicciones que las otras dos leyes combinadas. Si conocemos el valor de cualesquiera dos de las tres magnitudes variables, fácilmente podemos predecir la tercera.

Este ejemplo de un experimento sencillo muestra cómo es posible mantener ciertos factores constantes con el fin de estudiar dependencias entre otros factores. También muestra - y esto es muy importante - la fecundidad de los conceptos cuantitativos. Las leyes determinadas por este experimento presuponen la habilidad para medir las distintas magnitudes involucradas. Si esto no fuese así, las leyes tendrían que formularse de forma cualitativa; tales leyes serían mucho más débiles, menos útiles para hacer predicciones. Sin escalas numéricas para la presión, el volumen, y la temperatura, lo más que podríamos decir sobre una de las magnitudes es que permaneció la misma, o que aumentó o disminuyó. Así, podríamos formular la ley de Boyle diciendo: si la

temperatura de un gas confinado permanece la misma, y la presión aumenta, entonces el volumen disminuye; cuando la presión disminuye, el volumen aumenta. Esta es sin duda una ley. Incluso es similar, en algunos aspectos, a la ley de Boyle. Pero es mucho más débil que la ley de Boyle, porque no nos permite predecir cantidades específicas de la magnitud. Únicamente nos permite predecir que una magnitud aumentará, disminuirá, o permanecerá constante.

Los defectos de las versiones cualitativas de las leyes para los gases resultan más evidentes si consideramos la ley general expresada por la ecuación:  $P \cdot V = T \cdot R$ . Escribamos esto en la forma:

$$V = \frac{T}{P} \cdot R.$$

De esta ecuación general, interpretada cualitativamente, podemos derivar débiles versiones de las leyes de Boyle y Charles. Supongamos que a las tres magnitudes - presión, volumen, temperatura - se les permite variar simultáneamente, y sólo permanece constante la cantidad de gas ( $R$ ). Encontramos, a partir de un experimento, que tanto la temperatura como la presión están aumentando. ¿Qué podemos decir sobre el volumen? En este caso, no podemos siquiera decir si aumenta, disminuye, o permanece constante. Para determinar esto, tendríamos que conocer las proporciones por las cuales incrementaron la temperatura y la presión. Si la temperatura aumentó en una proporción mayor que la presión, entonces se sigue, de la fórmula, que el volumen aumentará. Pero si no podemos dar valores numéricos a la presión y a la temperatura, no podemos predecir, en este caso, absolutamente nada acerca del volumen.

Vemos, pues, qué tan poco puede conseguirse en la forma de predicción y qué tan crudas serían las explicaciones de los fenómenos si las leyes de la ciencia estuvieran limitadas a leyes cualitativas. Las leyes cuantitativas son enormemente superiores. Para tales leyes debemos, claro está, tener conceptos cuantitativos. Este es el tema que exploraremos a detalle en el capítulo 5.

## Parte II

# MEDICIÓN Y LENGUAJE CUANTITATIVO

## CAPÍTULO 5

### Tres tipos de conceptos en la ciencia

Los conceptos de la ciencia, así como los de la vida cotidiana, pueden ser convenientemente divididos en tres grupos principales: clasificatorio, comparativo, y cuantitativo.

Por un “concepto clasificatorio”, me refiero simplemente a un concepto que pone un objeto dentro de una cierta clase. Todos los conceptos de la taxonomía en la botánica y en la zoología - las distintas especies, familias, géneros, etc. - son conceptos clasificatorios. La cantidad de información que nos ofrecen sobre un objeto varía ampliamente. Por ejemplo, si digo que un objeto es azul, o caliente, o cúbico, estoy haciendo declaraciones relativamente débiles sobre el objeto. Al poner el objeto en una clase más estrecha, la información sobre él aumenta, incluso cuando aún sea relativamente modesta. La declaración de que un objeto es un organismo vivo nos dice mucho más acerca de él que la declaración de que es caliente. “Es un animal”, dice un poco más. “Es un vertebrado”, dice todavía más. A medida que las clases se hacen más estrechas - mamífero, perro, caniche, etc. -, tenemos más cantidad de información, aunque ésta sigue siendo relativamente poca. Los conceptos clasificatorios son los que nos resultan más familiares. Las primeras palabras que aprende un niño - “perro”, “gato”, “casa”, “árbol” - son de este tipo.

Más efectivos en transmitir información son los “conceptos comparativos”. Desempeñan una especie de papel intermedio entre los conceptos clasificatorios y los cuantitativos. Pienso que es conveniente prestarles atención porque, incluso entre los científicos, el valor y el poder de tales conceptos a menudo se pasan por alto. Un científico bien puede decir: “Sería muy deseable introducir conceptos cuantitativos, conceptos que puedan ser medidos sobre una escala, en mi campo. Desafortunadamente, esto no puede hacerse aún. El campo está apenas en su infancia, y todavía no hemos

desarrollado técnicas de medición, de tal suerte que nos tenemos que restringir a un lenguaje no cuantitativo, cualitativo. Quizá en el futuro, cuando el campo esté más avanzado, seremos capaces de desarrollar un lenguaje cuantitativo.” El científico puede tener razón en hacer esta declaración, pero está equivocado si concluye que, como tiene que hablar en términos cualitativos, debe limitar su lenguaje a conceptos clasificatorios. A menudo es el caso que, antes de que los conceptos cuantitativos puedan ser introducidos en un campo de la ciencia, están precedidos por conceptos comparativos que resultan ser herramientas mucho más efectivas para describir, predecir, y explicar que los crudos conceptos clasificatorios.

Un concepto clasificatorio, como “caliente” o “frío”, simplemente pone un objeto en una clase. Un concepto comparativo, como “más caliente” o “más frío”, nos dice cómo está relacionado un objeto, en términos de más o menos, con otro objeto. Mucho antes de que la ciencia desarrollara el concepto de temperatura, que puede medirse, era posible decir: “Este objeto está más caliente que tal objeto.” Los conceptos comparativos de este tipo pueden ser de una utilidad enorme. Supongamos, por ejemplo, que treinta y cinco hombres que aplican para un trabajo requieren ciertos tipos de habilidades, y que la empresa tiene un psicólogo cuya tarea es determinar qué tan bien califican los solicitantes. Los juicios clasificatorios son, desde luego, mejor que ningún juicio en absoluto. El psicólogo podría determinar que cinco de los solicitantes tienen buena imaginación, diez de ellos tienen una imaginación más bien pobre, y que el resto no tiene ni buena ni mala imaginación. De manera similar, podría ser capaz de hacer toscas clasificaciones de los treinta y cinco hombres en términos de sus habilidades manuales, sus capacidades matemáticas, su estabilidad emocional, etc. En cierto sentido, desde luego, estos conceptos pueden ser utilizados como conceptos comparativos débiles; podemos decir que una persona con “buena imaginación” es mayor en esta habilidad que una persona con “imaginación pobre”. Pero si el psicólogo es capaz de desarrollar un método comparativo que ponga a todos los treinta y cinco hombres en un orden de rango con respecto a cada habilidad, entonces sabrá mucho más acerca de ellos que lo que sabía cuando estaban clasificados sólo en las tres clases de fuerte, débil, y medio.

Nunca debemos subestimar la utilidad de los conceptos comparativos, especialmente en los campos en donde el método científico y los conceptos cuantitativos aún no han sido desarrollados. La psicología recurre cada vez más a conceptos cuantitativos, pero todavía existen grandes áreas de la psicología en donde

sólo es posible aplicar conceptos comparativos. La antropología casi no tiene conceptos cuantitativos. Trata principalmente con conceptos clasificatorios, y tiene mucha necesidad de criterios empíricos con los cuales desarrollar conceptos comparativos útiles. En estos campos, es importante desarrollar tales conceptos, que resultan mucho más poderosos que los clasificatorios, incluso cuando todavía no sea posible hacer mediciones cuantitativas.

Me gustaría llamar la atención sobre una monografía escrita por Carl G. Hempel y Paul Oppenheim, *Der Typusbegriff im Lichte der neuen Logik*. Aparecida en 1936, su título significa “El concepto de tipo a la luz de la lógica moderna”. Los autores están especialmente interesados en la psicología y en campos afines, en donde los conceptos de tipo son, como ellos mismos lo enfatizan, más bien pobres. Cuando los psicólogos se toman el tiempo para clasificar individuos en, digamos, extrovertidos, introvertidos, y un término medio entre extrovertidos e introvertidos, o en otros tipos, en realidad no están haciendo lo mejor que podrían. Aquí y allá encontramos esfuerzos por introducir criterios empíricos que puedan conducir a valores numéricos (como en la tipología corporal de William Sheldon), pero en el tiempo en que Hempel y Oppenheim escribieron su monografía, había muy poco de esto. Casi todo psicólogo interesado en el carácter, la constitución, y el temperamento tenía su propio sistema de tipo. Hempel y Oppenheim señalaron que todas estas distintas tipologías eran poco más que conceptos clasificatorios. Destacaron el hecho de que, aunque sería prematuro introducir conceptos cuantitativos y de medición, se daría un gran paso adelante si los psicólogos pudieran idear conceptos comparativos factibles.

A menudo sucede que un concepto comparativo después se convierte en la base para un concepto cuantitativo. Un ejemplo clásico es el concepto “más caliente”, que eventualmente se convirtió en el concepto de “temperatura”. Antes de entrar en detalles sobre la forma en la que se establecen criterios empíricos para los valores numéricos, resultaría útil ver cómo se establecen los criterios para los conceptos comparativos.

Para ilustrar lo anterior, consideremos el concepto de peso antes de que fuese posible darle valores numéricos. Sólo contamos con los conceptos comparativos de más pesado, más ligero, e igual en peso. ¿Cuál es el procedimiento empírico por el cual podemos tomar cualquier par de objetos y determinar cómo se comparan en términos de estos tres conceptos? Únicamente necesitamos una balanza y estas dos reglas:

- (1) Si dos objetos se equilibran entre sí sobre la balanza, son iguales en peso.

(2) Si los objetos no se equilibran, el objeto sobre el platillo [de la balanza] que baja es más pesado que el objeto sobre el platillo que sube.

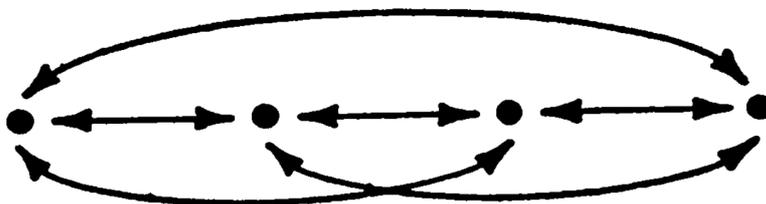
Estrictamente hablando, aún no podemos decir que un objeto tiene “mayor peso” que el otro porque todavía no hemos introducido el concepto cuantitativo de peso; pero en la práctica, tal lenguaje puede resultar útil, aun cuando no dispongamos de método alguno para asignar valores numéricos al concepto. Hace un momento, por ejemplo, hablamos de un hombre con “mayor imaginación” que otro, aunque no pueden asignarse valores numéricos a la imaginación.

En el ejemplo de la balanza, así como también en todos los otros procedimientos empíricos para establecer conceptos comparativos, es importante distinguir entre los aspectos del procedimiento que son puramente convencionales y aquellos que no son convencionales porque dependen de hechos de la naturaleza o de leyes lógicas. Para ver esta distinción, establezcamos de manera más formal las dos reglas por las que definimos los conceptos comparativos de igualmente pesados, más pesado que, y más ligero que. Para la igualdad, necesitamos una regla para definir una relación observable correspondiente a la igualdad, a la que aquí llamaremos “ $T$ ”. Para los otros dos conceptos, necesitamos una regla para definir una relación que llamaremos “menos que”, y la simbolizaremos por “ $M$ ”.

Las relaciones  $I$  y  $M$  están definidas a partir de procedimientos empíricos. Ponemos dos cuerpos sobre los dos platillos de una balanza. Si observamos que la balanza se mantiene en equilibrio, decimos que la relación  $I$ , con respecto a la propiedad de peso, se mantiene entre los dos cuerpos. Si observamos que un platillo sube y el otro baja, decimos que la relación  $M$ , con respecto al peso, se mantiene entre los dos cuerpos.

Podría parecer que estamos adoptando un procedimiento totalmente convencional para definir  $I$  y  $M$ , pero no es el caso. A menos que se satisfagan ciertas condiciones por las dos relaciones que elegimos, no pueden servir, adecuadamente, como  $I$  y  $M$ . No son, por tanto, relaciones arbitrariamente elegidas. Nuestras dos relaciones se aplican a todos los cuerpos que tienen peso. Este conjunto de objetos es el “dominio” de nuestros conceptos comparativos. Debe ser posible arreglar todos los objetos del dominio en un tipo de estructura estratificada a la que a veces se conoce como “arreglo cuasi serial”. Esto puede explicarse mejor al utilizar algunos términos de la lógica de relaciones. La relación  $I$ , por ejemplo, debe ser “simétrica” (si se mantiene entre cualesquiera objetos  $a$  y  $b$ , también debe mantenerse entre  $b$  y  $a$ ). También debe

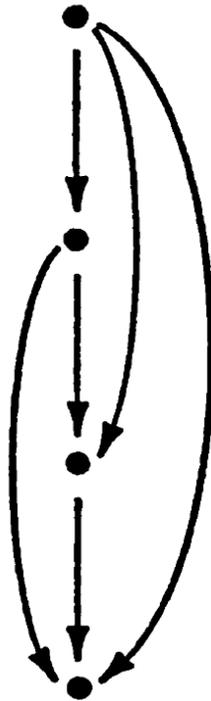
ser “transitiva” (si se mantiene entre  $a$  y  $b$  y entre  $b$  y  $c$ , también debe mantenerse entre  $a$  y  $c$ ). Podemos diagramar esto utilizando puntos para representar cuerpos y flechas dobles para indicar la relación de igualdad.



Es claro que si para  $I$  eligiésemos una relación que no sea simétrica, no sería adecuada para nuestros propósitos. Tendríamos que decir que un objeto tuvo exactamente el mismo peso que otro pero que este otro objeto no tuvo el mismo peso que el primero. Esta no es, desde luego, la forma en la que queremos usar el término “mismo peso”. El equilibrio de la balanza es, pues, una relación simétrica. Si dos objetos se equilibran entre sí, continúan equilibrándose después de haber intercambiado sus posiciones sobre los platillos.  $I$  debe, por tanto, ser una relación simétrica. Similarmente, encontramos que, si  $a$  se equilibra con  $b$  sobre los platillos, y  $b$  se equilibra con  $c$ , entonces  $a$  se equilibrará con  $c$ ; la relación  $I$  es también, por lo tanto, transitiva. Si  $I$  es tanto transitiva como simétrica, también debe ser “reflexiva”, esto es, todo objeto es igual, en peso, a sí mismo. En la lógica de relaciones, una relación que es tanto simétrica como transitiva es llamada una relación de “equivalencia”. Nuestra elección de la relación  $I$  no es, obviamente, arbitraria. Elegimos como  $I$  el equilibrio de las balanzas porque se observa que esta relación es una relación de equivalencia.

La relación  $M$  no es simétrica, sino asimétrica. Si  $a$  es más ligero que  $b$ ,  $b$  no puede ser más ligero que  $a$ .  $M$  es transitiva: si  $a$  es más ligero que  $b$  y  $b$  es más ligero que  $c$ , entonces  $a$  es más ligero que  $c$ . Esta transitividad de  $M$ , al igual que las propiedades de la relación  $I$ , nos resulta tan familiar que olvidamos que debemos hacer una prueba empírica para estar seguros de que aplica al concepto de peso. Ponemos  $a$  y  $b$  sobre los dos platillos de la balanza, y  $a$  baja. Ponemos  $b$  y  $c$  sobre los platillos, y  $b$  baja. Si ponemos  $a$  y  $c$  sobre los platillos, esperamos que  $a$  baje. En un mundo distinto, en donde no se mantengan nuestras leyes de naturaleza,  $a$  podría subir. Si esto sucediera, entonces la relación que estábamos probando no podría llamarse transitiva y por tanto no podría servir como  $M$ .

Podemos diagramar la relación  $M$ , transitiva y asimétrica, con flechas simples de un punto a otro:



Si entre cada par de objetos en el dominio se mantiene una u otra de las relaciones  $I$  y  $M$ , es posible arreglar todos los objetos en el orden cuasi serial diagramado en la figura 5-1.

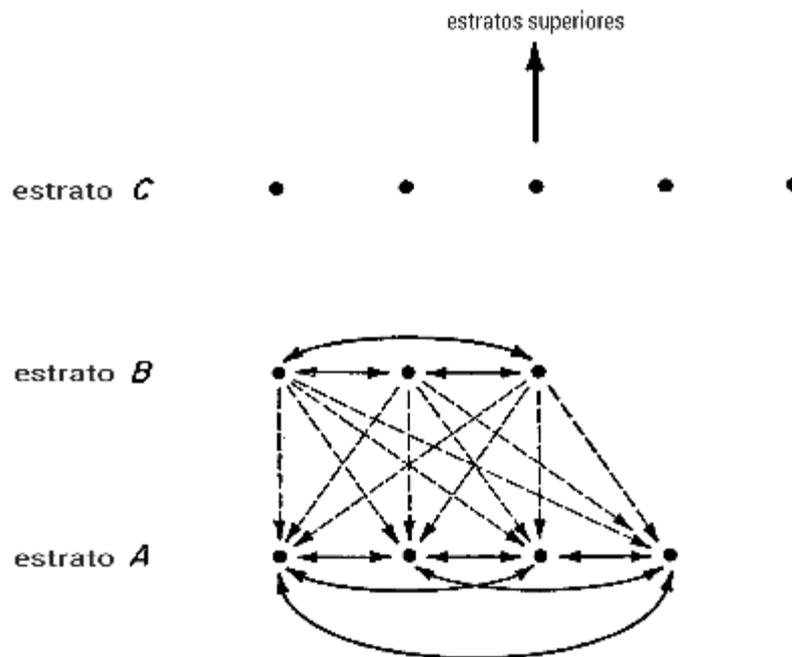


Figura 5-1.

En el nivel más bajo, el estrato A, tenemos todos aquellos objetos que son iguales en peso pero más ligeros que todos los objetos que no se encuentran en este estrato. Podría haber sólo uno de tales objetos, o podría haber miles. La figura 5-1

muestra cuatro. En el estrato  $B$ , tenemos otro conjunto de objetos igualmente pesados, todos relacionados entre sí por  $I$ , y todos más pesados que los objetos en el estrato  $A$  y más ligeros que todos los objetos que no se encuentran en  $A$  o en  $B$ . Estos estratos continúan subiendo hasta que finalmente llegamos al estrato de los objetos más pesados. A menos que ciertas pruebas empíricas muestren que los objetos del dominio pueden ser puestos en este arreglo cuasi serial, las relaciones  $I$  y  $M$  no serán relaciones apropiadas para definir, respectivamente, los conceptos comparativos de igual peso y de menos peso.

Todo esto se discute con gran detalle en las secciones diez y once de la monografía de Hempel, *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*.<sup>6</sup> Hempel dice que hay cuatro condiciones que  $I$  y  $M$  deben satisfacer:

1.  $I$  debe ser una relación de equivalencia.
2.  $I$  y  $M$  deben excluirse mutuamente. Ningún par de objetos puede ser igualmente pesado y, al mismo tiempo, estar relacionado de tal forma que uno sea más ligero que el otro.
3.  $M$  debe ser transitiva.
4. Para cualesquiera dos objetos  $a$  y  $b$ , debe mantenerse uno de los siguientes tres casos. (En realidad, es suficiente con decir que por lo menos uno se mantiene. Entonces se sigue, de las otras condiciones, que exactamente uno se mantendrá.)
  - (a)  $I$  se mantiene entre los dos objetos.
  - (b)  $M$  se mantiene entre  $a$  y  $b$ .
  - (c)  $M$  se mantiene entre  $b$  y  $a$ .

En otras palabras, cualesquiera dos objetos  $a$  y  $b$  que tengan peso son, o bien iguales en peso, o  $a$  es más ligero que  $b$ , o  $b$  es más ligero que  $a$ .

Si cualesquiera dos relaciones  $I$  y  $M$  satisfacen estos cuatro requerimientos, podemos decir que constituyen un orden cuasi serial, que puede diagramarse a la manera estratificada mostrada en la figura 5-1. Por medio de la relación de equivalencia  $I$ , podemos clasificar todos los objetos en clases de equivalencia; después, con la ayuda de la relación  $M$ , podemos poner estas clases en un orden serial y, de esta forma, desarrollar todo el esquema de estratos ordenados. El punto que quiero destacar aquí es

---

<sup>6</sup> *International Encyclopedia of Unified Science* (Chicago: University of Chicago Press, 1952), vol. 2, n. 7.

que los conceptos comparativos, independientemente de la cuestión de si aplican o no a los hechos de la naturaleza, están unidos por una estructura lógica de relaciones.

Ese no es el caso con los conceptos clasificatorios. Al definir un concepto de clase, podemos especificar cualesquiera condiciones que queramos. Claro está que si incluimos condiciones lógicamente contradictorias, tales como hablar de objetos que pesen tres kilos y que al mismo tiempo pesen menos que un kilo, entonces estamos definiendo una clase que *no* contiene miembros en ningún mundo posible. Aparte de esto, somos libres de definir una clase en cualquier forma consistente que queramos, sin importar si tal clase tiene o no miembros en nuestro mundo. El ejemplo clásico es el concepto del unicornio. Lo definimos como un animal con la forma de un caballo pero con un cuerno recto sobre su frente. Esta es una definición perfectamente aceptable en el sentido de que da significado al término “unicornio”. Define una clase. No es una clase que resulte útil para un zoólogo, porque está vacía en el sentido empírico - no tiene miembros -, pero esta no es una cuestión que debe decidir el lógico.

Con respecto a los conceptos comparativos, la situación es muy distinta. A diferencia de los conceptos de clase, implican una compleja estructura de relaciones lógicas. Si los introducimos, no somos libres de rechazar o modificar esta estructura. Los cuatro requerimientos establecidos por Hempel deben ser satisfechos. Así, vemos que hay dos formas en las que los conceptos comparativos de la ciencia no son completamente convencionales: deben aplicar a hechos de la naturaleza, y deben ajustarse a una estructura lógica de relaciones.

Ahora llegamos a los “conceptos cuantitativos”. Cada concepto cuantitativo tiene un par correspondiente de conceptos comparativos que, durante el desarrollo de un campo de la ciencia, por lo general sirve como un primer paso hacia el [concepto] cuantitativo. En los ejemplos que hemos venido utilizando, los conceptos comparativos de menos peso y de igual peso conducen, fácilmente, a un concepto de peso que puede ser medido y expresado por números. Discutiremos la naturaleza de los conceptos cuantitativos, por qué son tan útiles, en qué campos pueden ser aplicados, y si hay campos en donde no pueden ser aplicados. Este último punto es sumamente importante en la metodología de la ciencia, y por esa razón lo trataremos con mucho detalle. Antes de abordar estas cuestiones, haré algunas observaciones preliminares generales que se verán más claramente en el curso de nuestra discusión, pero que debo establecer ahora.

Primero, debemos recalcar que la diferencia entre lo cualitativo y lo cuantitativo no es una diferencia en la naturaleza, sino una diferencia en nuestro sistema conceptual

- en nuestro lenguaje, podríamos decir, si por lenguaje entendemos un sistema de conceptos -. Aquí utilizo “lenguaje” como lo hacen los lógicos, y no en el sentido de que el inglés es un lenguaje y el chino otro. Tenemos el lenguaje de la física, el lenguaje de la antropología, el lenguaje de la teoría de conjuntos, etc. En este sentido, un lenguaje está constituido por ciertas reglas para un vocabulario, reglas para construir oraciones, reglas para deducciones lógicas desde tales oraciones, y otras reglas. Los tipos de conceptos que tienen lugar en un lenguaje científico son extremadamente importantes. Lo que quiero dejar en claro es que la diferencia entre lo cualitativo y lo cuantitativo es una diferencia entre lenguajes.

El lenguaje cualitativo está restringido a los predicados (por ejemplo, “el pasto es verde”), mientras que el lenguaje cuantitativo introduce lo que se llama símbolos funtores, esto es, símbolos para funciones que tienen valores numéricos. Esto es importante, porque está muy extendido el punto de vista, especialmente entre los filósofos, de que hay dos tipos de rasgos en la naturaleza, el cualitativo y el cuantitativo. Algunos filósofos sostienen que la ciencia moderna, debido a que limita su atención a rasgos cada vez más cuantitativos, descuida los aspectos cualitativos de la naturaleza y ofrece así una imagen totalmente distorsionada del mundo. Este punto de vista es totalmente erróneo, y podemos ver que es erróneo si introducimos la distinción en el lugar adecuado. Cuando nos fijamos en la naturaleza, no podemos preguntar: “¿Son los fenómenos que observo cualitativos o cuantitativos?” Esa no es la pregunta correcta. Si alguien describe estos fenómenos en ciertos términos, definiendo tales términos y ofreciendo reglas para su uso, entonces podemos preguntar: “¿Son estos los términos de un lenguaje cuantitativo, o los términos de un lenguaje precuantitativo, cualitativo?”

Otro punto importante es que las convenciones desempeñan un papel muy importante en la introducción de los conceptos cuantitativos, y no debemos subestimar este papel. Por otra parte, también debemos tener cuidado con no subestimar el lado convencional. No es común que se haga esto, aunque unos cuantos filósofos sí lo han hecho. En Alemania, Hugo Dingler es un ejemplo. Alcanzó una perspectiva totalmente convencionalista, que considero como errónea. Llegó a decir que todos los conceptos, e incluso las leyes de la ciencia, son una cuestión de convención. En mi opinión, esto es ir demasiado lejos. A Poincaré también se le ha acusado de un convencionalismo en este sentido radical, pero pienso que esto obedece a una mala interpretación de sus escritos. En efecto, destacó el importante papel que desempeñan las convenciones en la ciencia, pero era muy consciente de los componentes empíricos que entran en juego. Sabía que

no siempre somos libres de hacer elecciones arbitrarias al construir un sistema científico; debemos acomodar nuestro sistema a los hechos de la naturaleza tal como los encontramos. La naturaleza proporciona factores, en la situación, que se encuentran fuera de nuestro control. A Poincaré puede llamársele un convencionalista sólo si lo que se quiere decir es que fue un filósofo que enfatizó, más que cualquier otro filósofo anterior, el gran papel de la convención. No fue un convencionalista radical.

Antes de considerar el papel de la medición en el desarrollo de los conceptos cuantitativos, debemos mencionar que existe un método cuantitativo más simple y básico, a saber, el método de contar. Si no hubiésemos tenido la habilidad para contar, seríamos incapaces de medir. El contar no supone más que los números enteros no negativos. Digo “enteros no negativos” y no “enteros positivos” porque el cero también es el resultado de contar si consideramos al contar en un sentido suficientemente amplio. Dada una clase finita - digamos, la clase de todas las sillas en este cuarto -, contar es el método por el cual determinamos el número cardinal de tal clase. Contamos las sillas - una, dos, tres, y así sucesivamente - hasta que terminamos por contar veinte. Supongamos que queremos contar el número de pianos en una habitación. Observamos y notamos que no hay piano alguno, así que decimos que el número cardinal es cero. Esto puede considerarse un caso degenerado de contar. Sea como fuere, cero es un entero y puede aplicarse a una clase como su número cardinal. En tales casos, comúnmente la llamamos una clase nula.

El mismo procedimiento de contar nos da el número cardinal de una clase finita de eventos consecutivos. Contamos el número de veces que escuchamos truenos durante una tormenta, o el número de veces que un reloj da la hora. Es probable que este tipo de contar haya tenido lugar antes en la historia que el contar las clases de cosas simultáneas, tales como las sillas en un cuarto. En realidad, es la forma en la que un niño aprende a contar. Entra en un cuarto, tocando cada silla individual mientras que dice las palabras de los números. Realmente, lo que está contando es una serie de eventos de tocar. Si se le pide a un niño que cuente un grupo de árboles a lo lejos, encuentra difícil hacerlo porque no le resulta tan fácil señalar los árboles, uno por uno, y llevar a cabo una forma de este procedimiento de tocar. Pero si es cuidadoso al contar los eventos de señalar, estando seguro de que a cada árbol lo señala una y sólo una vez, entonces decimos que hay un isomorfismo entre el número de árboles y el número de eventos que señalan. Si el número de estos eventos es ocho, adscribimos el mismo número cardinal a la clase de árboles a lo lejos.

Un niño mayor o un adulto puede ser capaz de contar los árboles sin señalar. Pero, a menos que sea un número pequeño - como tres o cuatro, que pueden reconocerse de un vistazo -, primero concentra su atención sobre un árbol, después sobre otro, y así sucesivamente. El procedimiento es todavía el de contar eventos consecutivos. Puede mostrarse, a partir de una prueba formal, que el número cardinal obtenido de esta forma es en realidad el número cardinal de la clase, pero no entraremos en detalles aquí. El punto es que, al contar una clase de objetos, en realidad contamos algo más, i. e., una serie de eventos. Después hacemos una inferencia, sobre la base de un isomorfismo (una correlación de uno a uno entre eventos y objetos), y concluimos que el número cardinal de los eventos es el número cardinal de la clase.

¡Los lógicos siempre encuentran tantas complicaciones en cosas tan simples! Incluso el contar, el más simple de todos los métodos cuantitativos, resulta no ser, en el análisis, tan simple como parece. Pero, una vez que podemos contar, podemos pasar a aplicar reglas para la medición, como lo explicaremos en el capítulo 6.

## CAPÍTULO 6

### La medición de conceptos cuantitativos

Si los hechos de la naturaleza han de ser descritos por conceptos cuantitativos - conceptos con valores numéricos -, debemos tener procedimientos para llegar a tales valores. El más simple de ellos, como ya vimos en el capítulo anterior, consiste en contar. En este capítulo, examinaremos el procedimiento más refinado de la medición. Contar sólo da valores que son expresados en números enteros. La medición va más allá de esto. No sólo da valores que pueden ser expresados por números racionales (enteros y fracciones), sino también valores que pueden ser expresados por números irracionales. Esto permite aplicar poderosas herramientas matemáticas, como el cálculo, y el resultado es un enorme incremento en la eficiencia del método científico.

El primer punto importante que debemos comprender claramente es que, para poder dar significado a términos como “longitud” y “temperatura”, debemos tener reglas para el proceso de medición. Estas reglas no son otras que las reglas que nos dicen cómo asignar un cierto número a un cierto cuerpo o proceso, de tal forma que podamos decir que este número representa el valor de la magnitud para tal cuerpo. Como ejemplo de esto, tomemos el concepto de temperatura, junto con un esquema de cinco reglas. Las reglas establecerán el procedimiento por el cual la temperatura puede ser medida.

Las primeras dos reglas de este esquema son las mismas dos reglas que discutimos en el último capítulo como reglas para definir conceptos comparativos, sólo que ahora las consideraremos como reglas para definir un concepto cuantitativo, al que llamaremos magnitud  $G$ .

La regla 1, para la magnitud  $G$ , especifica una relación empírica  $I$ . La regla establece que, si se mantiene la relación  $I_G$  entre los objetos  $a$  y  $b$ , los dos objetos tendrán valores iguales de la magnitud  $G$ . En forma simbólica:

$$\text{Si } I_G(a,b), \text{ entonces } G(a) = G(b).$$

La regla 2 especifica una relación empírica  $M_G$ . Esta regla dice que, si se mantiene la relación  $M_G$  entre  $a$  y  $b$ , el valor de la magnitud  $G$  será menor para  $a$  que para  $b$ . En forma simbólica:

Si  $M_G(a,b)$ , entonces  $G(a) < G(b)$ .

Antes de pasar a las otras tres reglas de nuestro esquema, veamos cómo es que estas dos reglas fueron primeramente aplicadas al concepto comparativo, precientífico, de temperatura, dominado después por procedimientos cuantitativos. Imaginemos que estamos viviendo en un tiempo anterior a la invención de los termómetros. ¿Cómo decidimos que dos objetos están igualmente calientes o que uno está menos caliente que otro? Tocamos cada objeto con nuestra mano. Si ninguno se siente más caliente que el otro (relación  $I$ ), decimos que están igualmente calientes. Si  $a$  se siente menos caliente que  $b$  (relación  $M$ ), decimos que  $a$  está menos caliente que  $b$ . Pero estos son métodos subjetivos, muy imprecisos, sobre los cuales es difícil llegar a un acuerdo entre distintos observadores. Una persona podría sentir que  $a$  está más caliente que  $b$ , y otra podría tocar los mismos dos objetos y pensar que lo contrario es cierto. Las memorias de las sensaciones de calor son tan vagas que para una persona podría resultar imposible decidir si un objeto se siente más caliente ahora que lo que se sentía hace tres horas. Por estas razones, los métodos subjetivos de establecer las relaciones “igualmente calientes” ( $I$ ) y “menos caliente” ( $M$ ) resultan de poco uso en una búsqueda empírica por leyes generales. Lo que se necesita es un método objetivo de determinar la temperatura (un método más preciso que nuestras sensaciones de calor, y uno sobre el cual, por lo general, estén de acuerdo distintas personas).

El termómetro proporciona justamente este método. Supongamos que queremos determinar los cambios en la temperatura del agua en un recipiente. Sumergimos un termómetro de mercurio en el agua. Cuando calentamos el agua, el mercurio se expande y se eleva en el tubo; cuando la enfriamos, el mercurio se contrae y desciende. Si se pone una marca sobre el tubo para indicar la altura del mercurio, es tan fácil ver si el mercurio pasa por encima o por debajo de la marca que no es probable que dos observadores tengan un desacuerdo al respecto. Si hoy observo que el líquido está por encima de la marca, no tengo dificultad alguna en recordar que ayer se encontraba por debajo. Puedo afirmar, con la máxima confianza, que hoy el termómetro está registrando una temperatura más alta que la que registró ayer. Es fácil ver cómo pueden definirse las relaciones  $I_T$  y  $M_T$ , para la magnitud  $T$  (temperatura), a partir de este instrumento. Simplemente ponemos el termómetro en contacto con el cuerpo  $a$ , esperamos hasta que ya no haya cambio alguno en la altura del líquido, y marcamos el nivel de éste. De la misma forma, aplicamos el termómetro al objeto  $b$ . La relación  $I$

está definida por el líquido subiendo a la misma marca. La relación  $M$  se establece entre  $a$  y  $b$  si el líquido sube a un punto más bajo, cuando se aplica el termómetro a  $a$ , que cuando se aplica a  $b$ .

Las primeras dos reglas para definir la temperatura ( $T$ ) pueden expresarse, simbólicamente, como sigue:

Regla 1: Si  $I_T(a,b)$ , entonces  $T(a) = T(b)$ .

Regla 2: Si  $M_T(a,b)$ , entonces  $T(a) < T(b)$ .

Observemos que no es necesario, para establecer las dos relaciones  $I$  y  $M$ , tener una escala de valores marcada sobre el tubo. Sin embargo, si pretendemos utilizar el termómetro para asignar valores numéricos a  $T$ , evidentemente necesitamos más que estas dos reglas.

Las tres reglas restantes de nuestro esquema satisfacen las necesarias condiciones adicionales. La regla 3 nos dice cuándo asignar un valor numérico seleccionado, comúnmente cero, a la magnitud que intentamos medir. Esto lo hace especificando un estado fácilmente reconocible, y a veces fácilmente reproducible, y diciéndonos que debemos asignar el valor numérico seleccionado a un objeto si se encuentra en tal estado. Por ejemplo, en la escala de temperatura centígrada, la regla 3 asigna el valor cero al agua cuando ésta se encuentra en un estado de congelación. Más tarde añadiremos algunos requisitos sobre las condiciones bajo las cuales esta regla es adecuada, pero ahora debemos aceptarla tal y como está.

La regla 4, comúnmente llamada la regla de la unidad, asigna un segundo valor seleccionado de la magnitud a un objeto al especificar otro estado, de nuevo fácilmente reconocible y reproducible, de ese objeto. Este segundo valor es usualmente 1, aunque puede ser cualquier número distinto al número especificado por la regla 3. En la escala centígrada es 100, y se asigna al agua en un estado de ebullición. Una vez asignado el segundo valor, tenemos a nuestra disposición una base para definir las unidades de la temperatura. Ponemos el termómetro en agua helada, marcamos la altura del mercurio, y la etiquetamos como cero. Después ponemos el termómetro en agua hirviendo, marcamos la altura del líquido, y la etiquetamos como cien. Aún no tenemos una escala, pero sí tenemos una base para hablar de unidades. Si el mercurio se eleva desde la marca cero hasta la marca cien, podemos decir que la temperatura ha aumentado 100 grados. Si hubiésemos etiquetado la marca más alta con el número 10, en lugar de con 100, diríamos que la temperatura ha aumentado diez grados.

El último paso es determinar la forma precisa de la escala. Esto se hace a partir de la regla 5, la más importante de las cinco reglas. Especifica las condiciones empíricas  $ID_G$  bajo las cuales diremos que dos diferencias ( $D$ ) en los valores de la magnitud ( $G$ ) son iguales. Notemos que no estamos hablando de dos valores, sino de dos *diferencias* entre dos valores. Queremos especificar las condiciones empíricas bajo las cuales diremos que la diferencia entre cualesquiera dos valores de las magnitudes para  $a$  y para  $b$  es la misma que la diferencia entre dos otros valores, digamos, para  $c$  y para  $d$ . Esta quinta regla tiene la siguiente forma simbólica:

$$\text{Si } ID_G(a,b,c,d), \text{ entonces } G(a) - G(b) = G(c) - G(d).$$

La regla nos dice que si se obtienen ciertas condiciones empíricas, representadas por " $ID_G$ " en la formulación simbólica, para cuatro valores de la magnitud, podemos decir que la diferencia entre los primeros dos valores es la misma que entre los otros dos valores.

En el caso de la temperatura, las condiciones empíricas conciernen al volumen de la sustancia empleada en el termómetro, en nuestro ejemplo, el mercurio. Debemos construir el termómetro de tal forma que, cuando la diferencia entre cualesquiera dos volúmenes del mercurio,  $a$  y  $b$ , sea igual a la diferencia entre otros dos volúmenes,  $c$  y  $d$ , la escala dé diferencias iguales de temperatura.

Si el termómetro tiene una escala centígrada, el procedimiento para satisfacer las condiciones de la regla 5 es muy simple. El mercurio está confinado dentro de un bulbo en el extremo de un tubo muy delgado. La delgadez del tubo no es esencial, pero tiene un gran valor práctico porque hace más fácil observar cambios extremadamente pequeños en el volumen del mercurio. El tubo de vidrio debe hacerse con un cuidado tal que su diámetro interno sea uniforme. Como resultado de lo anterior, aumentos iguales en el volumen del mercurio pueden observarse como distancias iguales entre las marcas a lo largo del tubo. Si denotamos la distancia entre las marcas cuando el termómetro está en contacto con el cuerpo  $a$  y con el cuerpo  $b$  como " $d(a,b)$ ", entonces la regla 5 puede expresarse, simbólicamente, como sigue:

$$\text{Si } d(a,b) = d(c,d), \text{ entonces } T(a) - T(b) = T(c) - T(d).$$

Ahora aplicamos las reglas 3 y 4. El termómetro es puesto en agua helada, y se emplea "0" para marcar el nivel del mercurio en el tubo. El termómetro es puesto en agua hirviendo, y el nivel del mercurio se marca con "100". Sobre la base de la regla 5, ahora puede marcarse el tubo en cien intervalos espaciales iguales entre las marcas del

cero y del 100. Estos intervalos pueden continuar por debajo del cero hasta que se alcance un punto en donde el mercurio se congela. De igual forma, pueden continuar por encima del 100 hasta el punto en donde el mercurio hierve y se evapora. Si dos físicos construyen sus termómetros de esta manera, y concuerdan con todos los puntos especificados por las cinco reglas, llegarán a resultados idénticos cuando midan la temperatura del mismo objeto. Expresamos este acuerdo al decir que ambos físicos están utilizando la misma escala de temperatura. Las cinco reglas determinan una escala única para la magnitud para la cual son aplicadas.

¿Cómo es que los físicos deciden sobre el tipo exacto de escala a ser utilizada para medir una magnitud? Sus decisiones son parcialmente convencionales, especialmente aquellas decisiones que suponen la elección de puntos en las reglas 3 y 4. La unidad de longitud, el metro, ahora está definida como la longitud, en un vacío, de 1,656,763.83 longitudes de onda de un cierto tipo de radiación de un átomo de criptón 86. La unidad de masa o peso, el kilogramo, está basada sobre un cuerpo kilogramo prototipo preservado en París. Con respecto a la temperatura, medida a partir de una escala centígrada, cero y 100 se asignan, por razones de conveniencia, al agua helada e hirviendo, respectivamente. En la escala de Fahrenheit y en la así llamada escala absoluta, o escala de Kelvin, se eligen otros estados de las sustancias para los puntos cero y 100. Pero las tres escalas descansan, esencialmente, sobre los mismos procedimientos de cinco reglas y, por tanto, pueden considerarse, de nuevo esencialmente, como las mismas formas de escala. Un termómetro construido para medir una temperatura en la escala de Fahrenheit se construye exactamente de la misma forma que un termómetro para medir una temperatura centígrada, y únicamente difieren en la forma en que son calibrados. Por esta razón, no es difícil traducir valores de una escala a otra.

Si dos físicos adoptan procedimientos totalmente distintos para su quinta regla - digamos que un físico correlaciona la temperatura con la expansión del volumen del mercurio y el otro con la expansión de una barra de hierro o con el efecto del calor sobre el flujo de electricidad a través de un cierto dispositivo -, entonces sus escalas serán totalmente distintas en forma. Claro está que ambas escalas pueden concordar en cuanto a las reglas 3 y 4 se refiere. Si cada físico ha elegido las temperaturas del agua helada e hirviendo como los dos puntos que determinan sus unidades, entonces es obvio que concordarán cuando midan la temperatura del agua helada o hirviendo. Pero cuando apliquen sus respectivos termómetros a una determinada cacerola de agua caliente, es

probable que obtengan resultados distintos, y puede que no haya una forma sencilla de traducir de una escala a la otra.

Las leyes basadas sobre dos distintas formas de escala no tendrán la misma forma. Una escala puede conducir a leyes que puedan expresarse con ecuaciones muy sencillas, mientras que la otra escala puede conducir a leyes que requieran ecuaciones muy complejas. Es este último punto el que hace que la elección de los procedimientos de la quinta regla sea tan importante, en contraste con el carácter más arbitrario de las reglas 3 y 4. Un científico elige estos procedimientos con el objetivo de simplificar, tanto como sea posible, las leyes básicas de la física.

En el caso de la temperatura, es la escala absoluta, o la escala de Kelvin, la que conduce a una simplificación máxima de las leyes de la termodinámica. Las escalas centígradas y de Fahrenheit pueden pensarse como variantes de la escala absoluta, difiriendo solamente en la calibración, y fácilmente traducibles a esta escala absoluta. En los primeros termómetros, se utilizaron líquidos como el alcohol y el mercurio como sustancias de prueba, así como gases que se mantuvieron bajo una presión constante para que los cambios en la temperatura alteraran su volumen. Se descubrió que, sin importar qué sustancias se utilizaban, podían establecerse formas de escala más o menos idénticas, aunque cuando se fabricaron instrumentos más precisos, sí se observaron pequeñas diferencias. No me refiero solamente a que las sustancias se expandan a distintas velocidades cuando son calentadas, sino a que la propia forma de escala es un tanto distinta dependiendo de si se recurre al mercurio o al hidrógeno como la sustancia de prueba. Eventualmente, los científicos eligieron la escala absoluta como aquella que conducía a las leyes más simples. Lo sorprendente es que esta forma de escala no fue especificada por la naturaleza de una sustancia de prueba particular. Está más cerca a la escala del hidrógeno (o de cualquier otro gas) que a la del mercurio, pero no es exactamente igual a ninguna escala de gas. A veces se habla de ella como una escala basada sobre un “gas ideal”, pero eso es sólo una forma de hablar.

En la práctica, desde luego, los científicos continúan utilizando termómetros que contienen mercurio u otros líquidos de prueba que tengan escalas extremadamente cercanas a la escala absoluta. Después convierten las temperaturas, basadas sobre estas escalas, a la escala absoluta por medio de ciertas fórmulas de corrección. La escala absoluta permite la formulación de leyes termodinámicas en la forma más sencilla posible, porque sus valores expresan cantidades de energía, y no cambios en el volumen

de distintas sustancias. Las leyes que suponen a la temperatura serían mucho más complicadas si se usara cualquier otra forma de escala.

Es importante comprender que realmente no podemos saber qué queremos decir por cualquier magnitud cuantitativa hasta que hayamos formulado ciertas reglas para medirla. Podría pensarse que primero la ciencia desarrolla un concepto cuantitativo, y que después busca formas para medirlo. En realidad, el concepto cuantitativo se desarrolla a partir del proceso de medición. No fue hasta que se inventaron los termómetros que se le pudo dar al concepto de temperatura un significado preciso. Einstein hizo hincapié en este punto en las discusiones que condujeron a la teoría de la relatividad. Le interesaba, principalmente, la medición del espacio y del tiempo, y enfatizó que no podemos saber exactamente qué se quiere decir por conceptos como “igualdad de duración”, “igualdad de distancia (en el espacio)”, “simultaneidad de dos eventos en distintos lugares”, etc., sin especificar los dispositivos y las reglas por las cuales se miden tales conceptos.

En el capítulo 5, vimos que, para los procedimientos adoptados para las reglas 1 y 2, había tanto aspectos convencionales como no convencionales. Una situación similar se presenta respecto a las reglas 3, 4, y 5. Existe una cierta latitud de elección al decidir sobre los procedimientos para estas reglas; en esa medida, estas reglas son cuestiones de convención. Pero no son completamente convencionales. Es necesario un conocimiento fáctico para decidir qué tipos de convenciones pueden llevarse a cabo sin entrar en conflicto con los hechos de la naturaleza, y deben aceptarse varias estructuras lógicas para evitar inconsistencias lógicas.

Por ejemplo, decidimos tomar el punto de congelación del agua como el punto cero sobre nuestra escala de temperatura porque sabemos que el volumen del mercurio en nuestro termómetro siempre será el mismo cuando pongamos el bulbo del instrumento en agua congelada. Pero si hubiésemos descubierto que el mercurio se elevaba a una altura cuando utilizábamos agua congelada obtenida de Francia y a otra altura cuando utilizábamos agua de Dinamarca, o que la altura variaba con la cantidad de agua que estuviésemos congelando, entonces el agua congelada no sería una buena opción para aplicar la tercera regla.

Un elemento empírico similar entra claramente en nuestra elección del agua hirviendo para marcar el punto 100 [sobre el termómetro]. Es un hecho de la naturaleza, no una cuestión de convención, que la temperatura de toda agua hirviendo es la misma. (Asumimos ya haber establecido las reglas 1 y 2, de tal suerte que tenemos una forma

para medir la igualdad de la temperatura.) Pero aquí debemos introducir una reserva. La temperatura del agua hirviendo es la misma en la misma localidad, pero sobre una montaña alta, donde es menor la presión del aire, hierve a una temperatura un poco menor que al pie de la montaña. Con el fin de poder utilizar el punto de ebullición del agua para satisfacer las demandas de la cuarta regla, debemos, o bien añadir que tenemos que utilizar el agua hirviendo a determinada altitud, o bien aplicar un factor de corrección si no se encuentra a tal altitud. Estrictamente hablando, incluso en la altitud especificada debemos estar seguros, por medio de un barómetro, de que tenemos una cierta presión de aire especificada, o también deberá aplicarse una corrección aquí. Estas correcciones dependen de hechos empíricos. No son factores convencionales, introducidos arbitrariamente.

Al encontrar criterios empíricos para aplicar la regla 5, que determina la forma de nuestra escala, buscamos una forma que nos ofrezca las leyes más simples posibles. Aquí, de nuevo, entra un aspecto no convencional en la elección de la regla, porque los hechos de la naturaleza determinan las leyes que buscamos simplificar. Y por último, el uso de números como valores sobre nuestra escala implica una estructura de relaciones lógicas que no son convencionales porque no podemos abandonarlas sin vernos envueltos en contradicciones lógicas.

# CAPÍTULO 7

## Magnitudes extensivas

La medición de la temperatura requiere, como vimos en el capítulo 6, de un esquema de cinco reglas. ¿Existen conceptos en la física que puedan medirse por esquemas más simples? Sí, un gran número de magnitudes, llamadas “magnitudes extensivas”, son mensurables con la ayuda de esquemas de tres reglas.

Los esquemas de tres reglas se aplican a situaciones en donde de alguna manera pueden combinarse o unirse dos cosas para producir una nueva cosa, y el valor de una magnitud  $M$  para esta nueva cosa será la suma de los valores de  $M$  para las dos cosas que fueron unidas. El peso, por ejemplo, es una magnitud extensiva. Si ponemos juntos un objeto de cinco kilos y un objeto de dos kilos, el peso de los objetos combinados será de siete kilos. La temperatura, por otra parte, no es una magnitud de este tipo. No hay una operación sencilla por la cual podamos tomar un objeto con, digamos, una temperatura de 60 grados, combinarlo con un objeto que tenga una temperatura de 40 grados, y producir un nuevo objeto con una temperatura de 100 grados.

Las operaciones por las cuales se combinan las magnitudes extensivas varían enormemente de magnitud a magnitud. En los casos más simples, la operación consiste simplemente en poner juntos dos cuerpos y después pegarlos o atarlos, o quizá sólo en ponerlos uno al lado del otro, como dos pesos sobre el mismo platillo de una balanza. En la vida cotidiana abundan ejemplos de esto. El ancho de una fila de libros sobre un estante es la suma de las anchuras individuales de los libros. Podemos tomar un libro y leer diez páginas. Después, leer diez páginas más. En total, habremos leído veinte páginas. Después de haber llenado parcialmente una tina de baño, descubrimos que el agua está demasiado caliente, así que añadimos un poco de agua fría. El volumen total del agua en la tina será la suma de las cantidades de agua caliente y fría que salió de los grifos. No es común que el procedimiento exacto para combinar cosas con respecto a cierta magnitud extensiva sea explícitamente establecido. Esta es una práctica riesgosa y puede llegar a causar grandes confusiones y malentendidos. Debido a que existen muchas formas distintas en que pueden combinarse las cosas, es importante no asumir como entendido el método de combinar. Éste debe ser explícitamente establecido y

claramente definido. Una vez hecho esto, puede medirse una magnitud al emplear un esquema de tres reglas.

La primera regla establece lo que se llama el principio de adición, o “aditividad”. Esta regla instituye que, cuando se hace un objeto combinado a partir de dos componentes, el valor de la magnitud de tal objeto es la suma aritmética de los valores de la magnitud para los dos componentes. Cualquier magnitud que se ajusta a esta regla es llamada una “magnitud aditiva”. El peso es un ejemplo familiar. La operación de unión en este caso consiste simplemente en poner juntos dos objetos y pesarlos como un único objeto. Ponemos el objeto  $a$  sobre una escala de resorte y constatamos su peso. Lo reemplazamos por el objeto  $b$  y constatamos su peso. Después ponemos ambos objetos sobre la escala. Este nuevo objeto, que no es otra cosa que  $a$  y  $b$  tomados juntos, tendrá, desde luego, un peso que es la suma aritmética de los pesos de  $a$  y  $b$ .

Si esta es la primera vez que el lector se encuentra con esta regla, podrá parecerle extraño que siquiera mencionemos una regla tan trivial. Pero en el análisis lógico del método científico debemos hacer todo explícito, incluyendo cuestiones que el hombre común da por sentadas y rara vez pone en palabras. Naturalmente, nadie pensaría que, si se pone una piedra de cinco kilos sobre una escala de resorte junto con una piedra de siete kilos, la escala registrará un peso total de 70 o de tres kilos. Damos por sentado que el peso combinado será de doce kilos. Pero es concebible que en algún otro mundo la magnitud del peso no se comporte en una manera tan conveniente como la aditiva. Debemos, por tanto, hacer explícita la aditividad del peso introduciendo esta regla aditiva: si dos cuerpos son unidos y pesados como si fuesen uno solo, el peso total será la suma aritmética de los pesos componentes.

Deben introducirse reglas similares para cada magnitud extensiva. La longitud espacial es otro ejemplo familiar. Un cuerpo tiene un borde recto  $a$ . Otro cuerpo tiene un borde recto  $b$ . Ponemos ambos cuerpos juntos de tal forma que los dos bordes estén de extremo a extremo y yaciendo sobre una línea recta. Esta nueva entidad física - la línea recta formada al combinar  $a$  y  $b$  - tendrá una longitud que es la suma de las longitudes de  $a$  y  $b$ .

Las primeras formulaciones de la regla aditiva para la longitud eran, a menudo, muy poco satisfactorias. Por ejemplo, algunos autores dijeron que si se añadían dos segmentos lineales  $a$  y  $b$ , la longitud del nuevo segmento se obtenía añadiendo la longitud de  $a$  y la longitud de  $b$ . Esta es una manera extremadamente pobre de formular la regla, porque en la misma oración se utiliza la palabra “añadir” de dos formas

totalmente distintas. Primero se utiliza en el sentido de unir dos objetos físicos al ponerlos juntos en una forma específica, y después se utiliza en el sentido de la operación aritmética de la adición. Aparentemente, estos autores no eran conscientes de que los dos conceptos son distintos, porque cuando pasaron a simbolizar la regla, la escribieron de esta forma:

$$L(a + b) = L(a) + L(b).$$

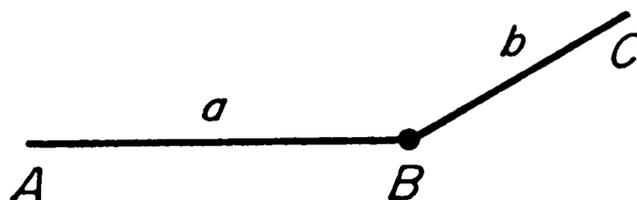
Algunos autores, a quienes por lo demás admiro, fueron culpables de esta torpe formulación, una formulación que traslada a los símbolos el mismo uso doble de la palabra “añadir”. El segundo símbolo “+” indica una operación aritmética, pero el primer “+” no es una operación aritmética en absoluto. Uno no puede añadir dos líneas aritméticamente. Lo que se añade no son las líneas, sino los números que representan las longitudes de las líneas. Las líneas no son números; son configuraciones en un espacio físico. Siempre he recalcado que debe hacerse una distinción entre la adición aritmética y el tipo de adición que constituye la operación física de combinar. Para tener esta distinción en mente puede ayudarnos seguir a Hempel (quien ha escrito mucho sobre magnitudes extensivas) e introducir un símbolo especial, un pequeño círculo “o”, para la operación física de unir. Esto proporciona una forma mucho más satisfactoria de simbolizar la regla aditiva para la longitud:

$$L(a \circ b) = L(a) + L(b).$$

La combinación de longitudes puede ser diagramada como sigue:

$$\begin{array}{c} \underbrace{a \quad b} \\ \underbrace{L(a) \quad L(b)} \\ \underbrace{L(a \circ b)} \quad \text{[no "L(a+b)"]} \end{array}$$

Aunque en el caso del peso no importe exactamente cómo sean puestos juntos los dos cuerpos sobre la escala, *sí* importa en el caso de la longitud. Supongamos que dos segmentos lineales son puestos como sigue:



Están de un extremo a otro, pero no en una línea recta. La distancia entre los puntos A y C no es la suma de las longitudes de *a* y *b*. Siempre debemos tener cuidado, por tanto, en especificar exactamente qué queremos decir por la operación de unir.

Ahora podemos simbolizar el principio general de aditividad, con respecto a cualquier magnitud extensiva  $M$ , al escribir:

$$M(a \circ b) = M(a) + M(b).$$

En esta declaración, el símbolo " $\circ$ " indica un procedimiento especificado para unir  $a$  y  $b$ . Será mejor si llamamos a esto la segunda regla para nuestro esquema de tres reglas, y no la primera regla. La primera regla, que es más simple, es la regla de igualdad. Es la misma que la primera regla del esquema de cinco reglas para medir la temperatura. Especifica el procedimiento por el cual definimos la igualdad de la magnitud. En el caso del peso, decimos que dos cuerpos tienen el mismo peso si, cuando son puestos sobre dos lados de la balanza, ésta permanece en equilibrio.

La tercera regla corresponde a la regla 4 del esquema para la temperatura. Especifica la unidad de valor para la magnitud. Esto comúnmente se hace eligiendo un objeto o un proceso natural que pueda ser fácilmente reproducido, y después definiendo la unidad de valor en términos de tal objeto o proceso. Antes mencioné dos ejemplos: el metro, basado sobre tantas longitudes de onda de un cierto tipo de luz, y el kilogramo, basado sobre un prototipo internacional que se encuentra en París. El metro y el kilogramo son las unidades de longitud y de peso estándar en el sistema métrico de mediciones.

Para resumir, nuestro esquema para la medición de cualquier magnitud extensiva consiste en las siguientes tres reglas:

1. La regla de igualdad.
2. La regla de aditividad.
3. La regla de unidad.

Si este es un esquema más simple que el esquema de cinco reglas, ¿por qué no se usa siempre? La respuesta, claro está, es que para muchas magnitudes no hay operación de unión alguna que proporcione una base para el principio aditivo. Ya hemos visto que la temperatura es una magnitud no aditiva. El tono del sonido y la dureza de los cuerpos son otros dos ejemplos. Con respecto a estas magnitudes, no podemos encontrar una operación de unión que sea aditiva, y a tales magnitudes se les llama “magnitudes no extensivas” o “magnitudes intensivas”. No obstante, existe un gran número de magnitudes aditivas en la física, y, con respecto a todas ellas, el esquema triple propuesto arriba provee una base adecuada para la medición.

Muchos científicos y filósofos de la ciencia consideran los términos “magnitudes extensivas” y “magnitudes aditivas” como sinónimos, pero hay algunos autores que

hacen una distinción entre ellos. Si hacemos tal distinción, debe ser de esta forma. Llamamos a una magnitud extensiva si podemos pensar en una operación que parezca ser una operación de unir natural, y para la cual pueda idearse una escala. Si después descubrimos que, con respecto a la escala y a la operación elegidas, se mantiene el principio aditivo, la llamamos una magnitud aditiva así como una magnitud extensiva. Podríamos decir que es una magnitud aditiva-extensiva. Pero si el principio aditivo no se mantiene, entonces la llamamos una magnitud no aditiva-extensiva.

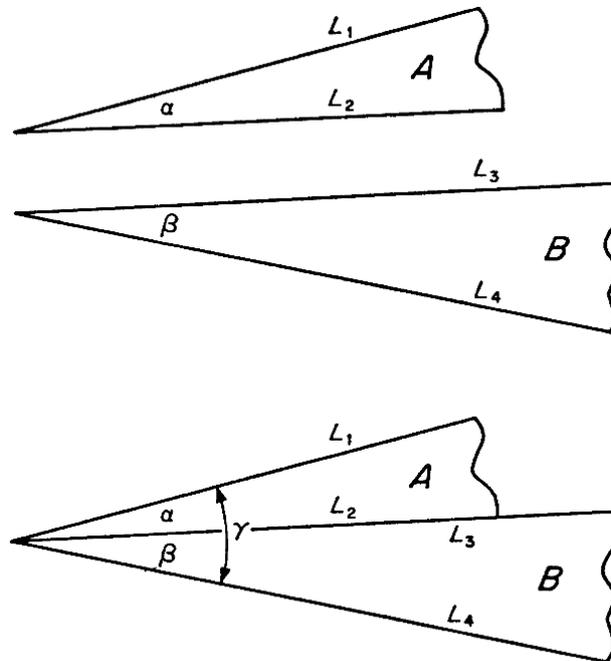
Casi todas las magnitudes extensivas de la física son aditivas, pero hay algunas excepciones. Un ejemplo notable es la velocidad relativa en la teoría de la relatividad especial. En la física clásica, las velocidades relativas a lo largo de una línea recta son aditivas en el siguiente sentido. Si los cuerpos  $A$ ,  $B$ ,  $C$  se mueven sobre una línea recta en la misma dirección, y la velocidad de  $B$  relativa a  $A$  es  $V_1$  y la velocidad de  $C$  relativa a  $B$  es  $V_2$ , entonces, en la física clásica, la velocidad  $V_3$  de  $C$  relativa a  $A$  se tomaba simplemente como igual a  $V_1 + V_2$ . Si uno camina hacia adelante a lo largo del pasillo central de un avión que vuela hacia el oeste, ¿cuál es la velocidad hacia el oeste de uno relativa al suelo? Antes de la teoría de la relatividad, esto se habría respondido simplemente añadiendo la velocidad del avión a la velocidad de caminar hacia adelante dentro del avión. Hoy sabemos que las velocidades relativas no son aditivas, y que debe utilizarse una fórmula especial en donde uno de los términos sea la velocidad de la luz. Cuando las velocidades son pequeñas en relación con la [velocidad] de la luz, pueden manejarse como si fuesen aditivas; pero cuando las velocidades son extremadamente grandes, debe recurrirse a la siguiente fórmula, donde  $c$  es la velocidad de la luz:

$$V_3 = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{V_1 V_2}{c^2}}.$$

Imaginemos, por ejemplo, que una astronave  $B$  se mueve en línea recta y pasa el planeta  $A$  con una velocidad relativa  $V_1$ . La astronave  $C$ , viajando en la misma dirección, pasa la astronave  $B$  con una velocidad  $V_2$  (relativa a  $B$ ). ¿Cuál es la velocidad relativa,  $V_3$ , de la astronave  $C$  con respecto al planeta  $A$ ? Si las velocidades  $V_1$  y  $V_2$  de las astronaves son pequeñas, entonces el valor de la fracción a ser añadida a 1, debajo de la línea a la derecha de la fórmula, será tan pequeño que puede ignorarse. Obtenemos  $V_3$  simplemente añadiendo  $V_1$  y  $V_2$ . Pero si las astronaves viajan a grandes velocidades, la

velocidad de la luz,  $c$ , se convierte en un factor a tomar en cuenta.  $V_3$  se desviará, significativamente, de la simple suma de  $V_1$  y  $V_2$ . Si uno estudia la fórmula, verá que no obstante qué tanto se acerquen las velocidades relativas de las astronaves a la velocidad de la luz, la suma de las dos velocidades no puede superar la velocidad de la luz. Podemos concluir, entonces, que la velocidad relativa en la teoría de la relatividad especial es extensiva (porque puede especificarse una operación de unión) pero no aditiva.

Otros ejemplos de magnitudes extensivas-no aditivas son las funciones trigonométricas de los ángulos. Supongamos un ángulo  $\alpha$  entre los bordes rectos  $L_1$  y  $L_2$  de la pieza de una chapa de metal  $A$  (véase la Figura 7-1).



**Figura 7-1.**

Otra pieza de chapa de metal  $B$  tiene un ángulo  $\beta$  entre los bordes  $L_3$  y  $L_4$ . Unimos los dos ángulos al ponerlos juntos sobre una mesa de tal forma que sus vértices coincidan, y que la parte  $L_2$  de  $A$  coincida con la parte  $L_3$  de  $B$ . El ángulo  $\gamma$  entre  $L_1$  y  $L_4$  es claramente el resultado de unir los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ . Podemos decir, por tanto, que cuando unimos los ángulos de esta manera y los medimos de la forma habitual, sus valores son aditivos. El ángulo  $\gamma$  tiene un valor que es la suma de los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ . Pero sus valores *no* son aditivos si tomamos, como nuestra magnitud, una de las funciones trigonométricas, como el seno, de cada ángulo. Si así lo queremos, podemos llamar extensiva a la magnitud del seno (porque tenemos una operación de unión), pero no

aditiva. Por otra parte, podríamos no querer llamar extensivo al seno porque la operación de unión en realidad no une senos. Une los ángulos, pero esto no es lo mismo que poner juntos los senos. Desde este segundo punto de vista, el seno no es extensivo.

El criterio sugerido para decidir si una magnitud es o no extensiva no es, como podemos ver, exacto. Como ustedes recordarán, dijimos que si podemos pensar en una operación que nos *parezca* una operación de unir natural con respecto a la magnitud dada, entonces podemos llamar extensiva a tal operación. Una persona podría decir que, para ella, la operación de poner dos ángulos juntos es una manera completamente natural de unir senos. Para esta persona, pues, el seno es una magnitud no aditiva-extensiva. Alguien más podría decir que es una operación perfectamente válida para unir ángulos, pero no para unir senos. Para esta última persona, el seno no es extensivo. En otras palabras, existen casos límite en donde llamar o no extensiva a una magnitud es una cuestión subjetiva. Como estos casos de magnitudes extensivas pero no aditivas son relativamente raros e incluso cuestionables (cuestionables porque podríamos no estar dispuestos a aceptar la operación propuesta como una operación de unión legítima), es muy comprensible que muchos autores utilicen las palabras “extensivo” y “aditivo” como sinónimos, y no hay razón para criticar tal uso. Para estos autores, “extensivo” se aplica a una magnitud sólo si hay una operación de unión en donde se mantenga el principio aditivo, como se mantiene para la longitud, el peso, y muchas otras magnitudes comunes de la física.

Ahora están en regla algunas observaciones sobre la medición de intervalos temporales y longitudes espaciales, porque, en cierto sentido, ambas magnitudes son básicas en la física. Una vez que podemos medirlas, pueden definirse muchas otras magnitudes. Podrá no ser posible definir explícitamente aquellas otras magnitudes, pero por lo menos pueden ser introducidas a partir de reglas operacionales que hagan uso de los conceptos de distancia en el espacio o en el tiempo. Ustedes recordarán, por ejemplo, que en las reglas para medir la temperatura hicimos uso del concepto del volumen del mercurio y de la longitud de una columna de mercurio en un tubo. En ese ejemplo, supusimos que ya sabíamos cómo medir la longitud. Al medir muchas otras magnitudes de la física, hacemos una referencia similar a las mediciones de la longitud en el espacio y de la duración en el tiempo. En este sentido, la longitud y la duración pueden ser consideradas como magnitudes primarias. En los capítulos 8 y 9 discutiremos los procedimientos por los cuales medimos el tiempo y el espacio.

# CAPÍTULO 8

## Tiempo

¿Qué tipo de operación de unión puede utilizarse para combinar intervalos de tiempo? Inmediatamente nos enfrentamos a una grave dificultad. No podemos manipular los intervalos de tiempo de la misma forma que manipulamos los intervalos del espacio, o, de manera más precisa, los bordes de los cuerpos sólidos que representan los intervalos espaciales. No hay tal cosa como bordes duros de tiempo que puedan juntarse para formar una línea recta.

Consideremos estos dos intervalos: la longitud de una cierta guerra desde el primer disparo hasta el último, y la duración de una cierta tormenta eléctrica desde el primer trueno hasta el último. ¿Cómo podemos unir esas dos duraciones? Tenemos dos eventos separados, cada uno con una determinada longitud de tiempo, pero no hay forma de unirlos. Claro está que si dos eventos ya están juntos en el tiempo, podemos reconocer este hecho, pero no podemos desplazar eventos como sí podemos desplazar los bordes de los objetos físicos.

Lo mejor que podemos hacer es representar los dos intervalos de tiempo sobre una escala conceptual. Supongamos un evento  $a$  que ocurrió desde el punto de tiempo  $A$  hasta el punto de tiempo  $B$ , y un segundo evento  $b$  que ocurrió desde el punto de tiempo  $B$  hasta el punto de tiempo  $C$ . (Véase la figura 8-1.) El punto inicial de  $b$  es el mismo que el punto terminal de  $a$ , así que los dos eventos son adyacentes en el tiempo. No los llevamos a esta posición; así fue como ocurrieron. La longitud del tiempo desde el punto  $A$  al punto  $C$  ahora puede ser considerada como el resultado de combinar  $a$  y  $b$ , pero no en la forma física en que las longitudes son combinadas, sino en una forma conceptual, esto es, por la forma en la que vemos esta situación. La operación conceptual, simbolizada por " $\circ$ ", nos permite formular la siguiente regla de aditividad para la medición de la longitud temporal  $T$ :

$$T(a \circ b) = T(a) + T(b).$$

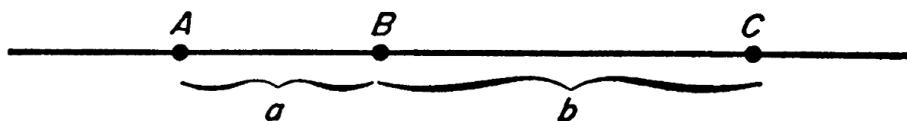


Figura 8-1.

En otras palabras, si tenemos dos eventos, uno comenzando justo cuando el otro termina, entonces la longitud del evento total será la suma aritmética de las longitudes de los dos eventos. Esto no es tan convincente como la regla de aditividad para las longitudes espaciales porque sólo podemos aplicarlo a eventos que sean adyacentes en el tiempo, y no a cualquier par de eventos. Más tarde, después de que hayamos desarrollado un esquema de tres reglas para medir el tiempo, seremos capaces de medir las longitudes combinadas de eventos no adyacentes. Por ahora sólo buscamos una operación de unión que nos proporcione la base para una regla aditiva, y la encontramos en la ocurrencia de eventos adyacentes en el tiempo.

Para completar nuestro esquema, necesitamos dos reglas más: una regla de igualdad, y una regla que defina una unidad. Ambas reglas están comúnmente basadas sobre algún tipo de proceso periódico: un péndulo, la rotación de la Tierra, y así sucesivamente. Un reloj es simplemente un instrumento para crear un proceso periódico. En algunos relojes, esto se consigue a partir de un péndulo, en otros, a partir de un volante regulador. El reloj de Sol mide el tiempo por el movimiento periódico del Sol a través del cielo. Por miles de años, los científicos basaron sus unidades de tiempo sobre la longitud del día, es decir, sobre la rotación periódica de la Tierra. Pero como la velocidad gítoria de la Tierra está cambiando ligeramente, en 1956 se llegó a un acuerdo internacional para basar las unidades de tiempo sobre el movimiento periódico de la Tierra alrededor del Sol en un año específico. Así, el segundo fue definido como  $1/31,556,925.9747$  del año 1900. Para obtener aún más precisión, esta convención fue abandonada en 1964, y se pasó a basar al segundo sobre la razón de vibración periódica del átomo de cesio. Este concepto de “periodicidad”, tan esencial para definir unidades de tiempo, debe ser muy bien entendido antes de que pasemos a considerar cómo es que una regla de igualdad y una regla de unidad pueden basarse sobre él.

Primero, debemos distinguir claramente los dos significados de “periodicidad”: uno débil y otro fuerte. En el sentido débil, un proceso es periódico simplemente si se repite una y otra y otra vez. Un latido es periódico. Un péndulo es periódico. Pero lo es también, en un sentido débil, la salida del Sr. Smith de su casa. Ocurre una y otra vez, cientos de veces, durante la vida del Sr. Smith. Es claramente periódico en el sentido débil de repetirse. A veces, periódico viene a significar que un ciclo total de distintas fases se repite en el mismo orden cíclico. Un péndulo, por ejemplo, oscila desde su punto más bajo hasta su punto más alto a la derecha, después hacia su punto más bajo, hasta su punto más alto a la izquierda, y de nuevo hasta su punto más bajo; después se

repite todo el ciclo. No se repite sólo un evento, sino una secuencia de eventos. Pero esto no es necesario para llamar periódico a un proceso. Es suficiente si una fase del proceso continúa repitiéndose. Un proceso tal es, pues, periódico en el sentido débil.

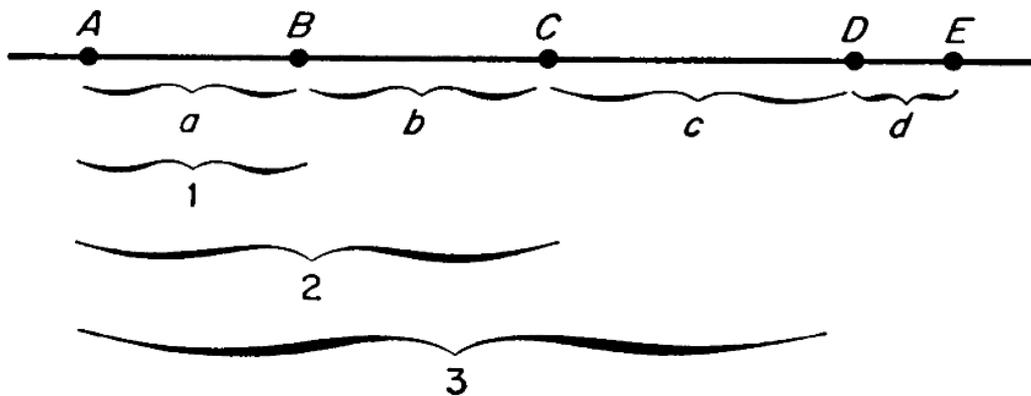
Con frecuencia, cuando alguien dice que un proceso es periódico, se refiere a éste en un sentido mucho más fuerte: que, además de ser débilmente periódico, también es verdad que los intervalos entre las sucesivas ocurrencias de una cierta fase son iguales. Con respecto a las salidas del Sr. Smith de su casa, es obvio que esta condición no se satisface. Algunos días podrá quedarse muchas horas en su casa; en otros, podrá salir de su casa varias veces en una hora. Por el contrario, los movimientos del volante regulador de un reloj bien construido son periódicos en el sentido fuerte. Hay claramente una enorme diferencia entre los dos tipos de periodicidad.

¿Qué tipo de periodicidad debemos tomar como la base para medir el tiempo? En un primer momento, nos inclinamos a responder que, obviamente, debemos elegir un proceso que sea periódico en el sentido fuerte. No podemos basar la medición del tiempo sobre la salida del Sr. Smith de su casa porque es muy irregular. Tampoco podemos basarla sobre un latido, porque, aunque un latido se acerca mucho más a ser periódico en el sentido fuerte que la salida del Sr. Smith, no es lo suficientemente regular. Si uno ha estado corriendo o tiene una fiebre alta, sus latidos serán más rápidos que otras veces. Lo que necesitamos es un proceso que sea periódico en el sentido más fuerte posible.

Pero hay algo erróneo en el razonamiento anterior. ¿No podemos saber que un proceso es periódico en el sentido fuerte a menos que contemos con un método para determinar intervalos de tiempo iguales! Es precisamente un método así el que estamos intentando establecer a partir de nuestras reglas. ¿Cómo podemos salir de este círculo vicioso? Sólo podemos salir si prescindimos, por completo, del requerimiento de periodicidad en el sentido fuerte. Nos vemos forzados a abandonarlo, porque aún no tenemos base alguna para reconocerlo. Nos encontramos en la posición de un físico ingenuo abordando el problema de medir el tiempo sin siquiera contar con la ventaja de tener a su disposición nociones precientíficas de intervalos de tiempo iguales. Careciendo de toda base para la medición del tiempo, busca un proceso periódico observable en la naturaleza que le proporcione tal base. Como no tiene forma de medir intervalos de tiempo, tampoco tiene forma de descubrir si un proceso en particular es o no periódico en el sentido fuerte.

Esto es lo que debemos hacer. Primero, encontramos un proceso que sea periódico en el sentido débil. (También podrá resultar ser periódico en el sentido fuerte, pero esto aún no lo podemos saber.) Después tomamos, como nuestra operación de unión, dos intervalos de tiempo que sean consecutivos en el sentido de que uno comienza justo cuando el otro termina, y afirmamos, como nuestra regla de aditividad, que la longitud del intervalo total será la suma aritmética de las longitudes de los dos intervalos componentes. Después podemos aplicar esta regla al proceso periódico elegido.

Para completar nuestro esquema, debemos encontrar reglas para la igualdad y para la unidad. La duración de cualquiera de los periodos del proceso elegido puede servir como nuestra unidad de tiempo. En la figura 8-2, estos periodos están diagramados como las longitudes  $a, b, c, d, \dots$  entre los puntos de tiempo  $A, B, C, D, E, \dots$ . Decimos que cada uno de estos segmentos tiene una longitud de una unidad. Alguien podría objetar: “Pero el periodo  $b$  duró mucho más que el periodo  $a$ .” Y nosotros podemos responder: “No sabemos qué quieres decir por “mucho más”. Estamos intentando establecer reglas para la medición del tiempo para que podamos dar significado al término “mucho más.”



**Figura 8-2.**

Ahora que hemos especificado nuestra unidad (es simplemente la longitud de cada periodo del proceso elegido), nuestra regla aditiva nos proporciona una base para medir longitudes temporales. Esta regla nos dice que el intervalo de tiempo del punto A al punto C es 2, del punto A al punto D es 3, etc. Ahora podemos medir cualquier intervalo de tiempo, incluso cuando estemos basando nuestro procedimiento sobre un proceso débilmente periódico. Simplemente contamos el número de veces que ocurre nuestra unidad de periodo mientras está teniendo lugar el evento que queremos medir.

Este número será la longitud del evento. La regla para la igualdad es evidente. Dice que dos intervalos de tiempo (que posiblemente pueden estar muy distantes en el tiempo) son iguales si ambos contienen el mismo número de periodos elementales del proceso periódico. Esto completa nuestro esquema de tres reglas. Tenemos una regla de igualdad, una regla de aditividad, y una regla de unidad. Sobre la base de este esquema, tenemos un método para medir el tiempo.

Pero podría haber objeciones a lo anterior. ¿Podrá un esquema así realmente estar basado sobre cualquier proceso débilmente periódico? Por ejemplo, ¿puede estar basado sobre las salidas del Sr. Smith de su casa? La sorprendente respuesta es que sí, aunque, como explicaré en un momento, las leyes de la física son mucho más sencillas si elegimos otros procesos. El punto importante a comprender ahora es que, una vez establecido un esquema para medir el tiempo, incluso si está basado sobre un proceso tan irregular como las salidas del Sr. Smith, hemos adquirido un medio para determinar si un proceso periódico es equivalente a otro.

Asumamos haber adoptado como nuestra base para la medición del tiempo el proceso periódico  $P$ . Ahora podemos comparar  $P$  con otro proceso débilmente periódico  $P'$  para ver si son “equivalentes”. Supongamos, por ejemplo, que  $P$ , nuestro proceso periódico elegido, es la oscilación de cierto péndulo corto. Queremos compararlo con  $P'$ , la oscilación de un péndulo más largo. Ante el hecho de que los periodos de los dos péndulos no son iguales, ¿cómo es que los comparamos? Lo hacemos contando las oscilaciones de ambos péndulos durante un intervalo de tiempo más largo. Podríamos descubrir que diez oscilaciones del péndulo corto coinciden con seis oscilaciones del largo. Esto ocurre siempre que repetimos la prueba. Todavía no somos capaces de tratar con fracciones de periodos, así que debemos hacer nuestra comparación en términos de números enteros de oscilaciones. Pero podríamos llegar a observar que la coincidencia no es exacta. Después de diez oscilaciones del péndulo corto, el péndulo largo ya ha comenzado su séptima oscilación. Entonces refinamos nuestra comparación al tomar un intervalo de tiempo más largo, como cien periodos del péndulo corto. Descubrimos, cada vez que repetimos la prueba, que durante este intervalo el péndulo largo tiene sesenta y dos periodos. De esta forma, podemos afinar nuestra comparación tanto como queramos. Si encontramos que un cierto número de periodos del proceso  $P$  siempre iguala un cierto número de periodos del proceso  $P'$ , decimos que las dos periodicidades son iguales.

Es un hecho de la naturaleza que hay una clase muy grande de procesos periódicos que son equivalentes unos con otros en este sentido. Esto no es algo que podríamos saber a priori, sino que lo descubrimos observando el mundo. No podemos decir que estos procesos equivalentes son fuertemente periódicos, pero podemos comparar cualesquiera de ellos y encontrar que son equivalentes. Todos los péndulos pertenecen a esta clase, así como los volantes reguladores de los relojes, el movimiento aparente del Sol a través del cielo, y así sucesivamente. En la naturaleza, encontramos una enorme clase de procesos en donde cualesquiera dos procesos resultan ser equivalentes cuando los comparamos de la forma explicada en el párrafo anterior. Por lo que sabemos, sólo hay *una* gran clase de este tipo.

¿Qué sucede si decidimos basar nuestra escala de tiempo sobre un proceso periódico que no pertenezca a esta gran clase de procesos equivalentes, como el latido? Los resultados serían un tanto extraños, pero queremos dejar en claro que la elección de un latido para la base de la medición del tiempo no llevará a contradicción lógica alguna. No hay ningún sentido en donde sea “falso” medir el tiempo sobre tal base.

Imaginemos que vivimos en una fase muy anterior al desarrollo de los conceptos para la medición. No contamos con instrumento alguno para medir el tiempo, como un reloj, de tal suerte que no tenemos ninguna forma de determinar cómo puede variar nuestro latido bajo distintas circunstancias fisiológicas. Buscamos, por primera vez, desarrollar reglas operacionales para medir el tiempo, y decidimos utilizar mi latido como la base para la medición.

Tan pronto como comparamos mi latido con otros procesos periódicos en la naturaleza, descubrimos que todos los tipos de procesos, que pudimos haber pensado como uniformes, resultan no serlo. Por ejemplo, descubrimos que al Sol le toma tantos latidos de tiempo atravesar el cielo en los días en que me siento bien, pero le toma mucho más tiempo hacerlo en los días en que tengo fiebre. Esto nos parece extraño, pero no hay nada lógicamente contradictorio en nuestra descripción de todo el mundo sobre esta base. No podemos decir que la elección del péndulo como la base para nuestra unidad de tiempo es la “correcta” y que mi latido es la elección “errónea”. Aquí no están involucrados ni lo correcto ni lo erróneo porque no hay contradicción lógica alguna en ningún caso. Es simplemente una elección entre una descripción del mundo simple y una compleja.

Si basamos el tiempo sobre mi pulso, tenemos que decir que todos los tipos de procesos periódicos en la naturaleza tienen intervalos de tiempo que varían dependiendo

de lo que estoy haciendo o de cómo me sienta. Si corro durante un tiempo y luego me detengo, y medimos estos procesos naturales a partir de mi pulso, encontramos que, mientras estoy corriendo y por un corto periodo después de eso, las cosas en el mundo se ralentizan. En unos pocos minutos, regresan a su estado normal. Deben ustedes recordad que estamos suponiendo que nos encontramos en una época anterior a haber adquirido conocimiento alguno sobre las leyes de la naturaleza. No tenemos libros de física que nos digan que tal o cual proceso es uniforme. En nuestro primitivo sistema de física, la revolución de la Tierra, la oscilación de los péndulos, etc., son muy irregulares. Tienen una velocidad cuando me encuentro bien, y otra cuando tengo fiebre.

De esta forma, tenemos ante nosotros una genuina elección. No es una elección entre un procedimiento de medición correcto y uno erróneo, sino una elección basada sobre la simplicidad. Descubrimos que, si elegimos al péndulo como nuestra base de tiempo, el sistema de leyes físicas resultante será infinitamente más simple que si elegimos mi latido. Ya es lo suficientemente complicado si utilizamos mi latido, pero será mucho peor si elegimos las salidas del Sr. Smith de su casa, a menos que nuestro Sr. Smith fuese como Immanuel Kant, de quien se dice salía de su casa exactamente al mismo tiempo cada mañana, y que sus vecinos ajustaban sus relojes a partir de su aparición en la calle. Pero ningún movimiento de cualquier mortal ordinario será una base apropiada para la medición del tiempo.

Por “apropiada” quiero decir, desde luego, conveniente en el sentido de conducir a leyes sencillas. Cuando basamos nuestra medición del tiempo sobre la oscilación de un péndulo, nos encontramos con que todo el Universo se comporta con una gran regularidad, y que puede ser descrito con leyes sumamente simples. Puede ser que el lector no haya encontrado simples a tales leyes cuando aprendió física, pero son simples en el sentido relativo de que serían mucho más complicadas si adoptásemos al latido como nuestra unidad de tiempo. Constantemente los físicos expresan su sorpresa ante la simplicidad de nuevas leyes. Cuando Einstein descubrió su principio de relatividad general, expresó asombro ante el hecho de que tal principio relativamente simple gobernase todos los fenómenos a los que se aplicaba. Esta simplicidad desaparecería si basásemos nuestro sistema de medición del tiempo sobre un proceso que no perteneciese a la gran clase de procesos mutuamente equivalentes.

Mi latido pertenece, por otra parte, a una clase sumamente pequeña de procesos equivalentes. Los únicos otros miembros son probablemente los eventos de mi propio cuerpo que están fisiológicamente conectados con el latido del corazón. El pulso en mi

muñeca izquierda es equivalente al pulso en mi muñeca derecha. Pero, aparte de los eventos que tienen que ver con mi corazón, sería difícil encontrar otro proceso dondequiera en la naturaleza que sea equivalente con mi pulso. Así, tenemos una clase extremadamente pequeña de procesos equivalentes si la comparamos con la clase muy exhaustiva que incluye al movimiento de los planetas, la oscilación de los péndulos, etc. Por lo tanto, es aconsejable elegir un proceso, que sirva como la base para la medición del tiempo, que pertenezca a esta gran clase.

No importa mucho qué proceso de esta clase elijamos, porque aún no nos preocupa una gran precisión en la medición. Una vez hecha la elección, podemos decir que el proceso elegido es periódico en el sentido fuerte. Esto es, desde luego, simplemente una cuestión de definición. Realizamos pruebas empíricas y descubrimos, a partir de la observación, que son fuertemente periódicas en el sentido de que muestran una gran uniformidad en sus intervalos de tiempo. Como resultado de esto, somos capaces de describir los procesos de la naturaleza en una forma relativamente sencilla. Este es un punto tan importante que lo enfatizo repitiéndolo muchas veces. Nuestra elección de un proceso como la base para la medición del tiempo no es una cuestión de correcto o incorrecto, ya que cualquier elección es lógicamente posible. Cualquier elección conducirá a un conjunto consistente de leyes naturales, pero si basamos nuestra medición del tiempo sobre procesos tales como la oscilación de un péndulo, encontramos que conduce a una física mucho más sencilla que si usásemos otros procesos.

Históricamente, nuestro sentido fisiológico del tiempo, nuestra intuitiva sensación de regularidad, sin duda entraron en la consideración de elecciones anteriores sobre qué procesos adoptar como una base para la medición del tiempo. El Sol parece salir y ocultarse de manera regular, así que los relojes de Sol fueron una forma conveniente de medir el tiempo (mucho más conveniente, por ejemplo, que los movimientos de las nubes). Similarmente, las culturas tempranas encontraron conveniente basar sus relojes sobre el tiempo en que caía la arena, o el agua, o sobre cualquier otro proceso que fuese más o menos equivalente al movimiento del Sol. Pero el punto básico sigue siendo este: una elección de este tipo se hace en términos de conveniencia y simplicidad.

# CAPÍTULO 9

## Longitud

Pasemos ahora del concepto de tiempo al otro concepto básico de la física, la longitud, y examinémoslo de manera más cercana que como lo hicimos antes. Ustedes recordarán que en el capítulo 7 vimos que la longitud era una magnitud extensiva, mensurable por medio de un esquema triple. La regla 1 define la igualdad: un segmento marcado sobre un borde recto tiene igual longitud que otro segmento, marcado sobre otro borde recto, si los puntos finales de los dos segmentos pueden ser puestos en una coincidencia simultánea uno con otro. La regla 2 define la aditividad: si unimos dos bordes en una línea recta, su longitud total es la suma de sus longitudes separadas. La regla 3 define la unidad: elegimos una barra con un borde recto, marcamos dos puntos en este borde, y elegimos el segmento entre tales dos puntos como nuestra unidad de longitud.

Sobre la base de estas tres reglas podemos ahora aplicar el procedimiento de medición habitual. Supongamos que queremos medir la longitud de un borde largo  $c$ , digamos, el borde de una valla. Tenemos una barra de medir sobre la cual está marcada nuestra unidad de longitud  $a$  por sus puntos finales  $A$  y  $B$ . Ponemos la barra junto a  $c$ , en la posición  $a_1$  (véase la figura 9-1), de tal forma que  $A$  coincida con el punto final  $C_0$  de  $c$ . En el borde  $c$  marcamos el punto  $C_1$  que coincide con el punto final  $B$  de nuestra barra. Después movemos la barra  $a$  hacia la posición adyacente  $a_2$ , y marcamos el punto  $C_2$  sobre  $c$ , y así sucesivamente, hasta que lleguemos al otro extremo de  $c$ . Supongamos que la décima posición  $a_{10}$  de la barra es tal que su punto final  $B$  coincide toscamente con el punto final  $C_{10}$  de  $c$ . Sean  $c_1, c_2, \dots, c_{10}$  los segmentos marcados de  $c$ . Tenemos, por la regla 3:

$$L(a) = L(a_1) = L(a_2) = \dots = L(a_{10}) = 1.$$

Por lo tanto, por la regla 1, de igualdad:

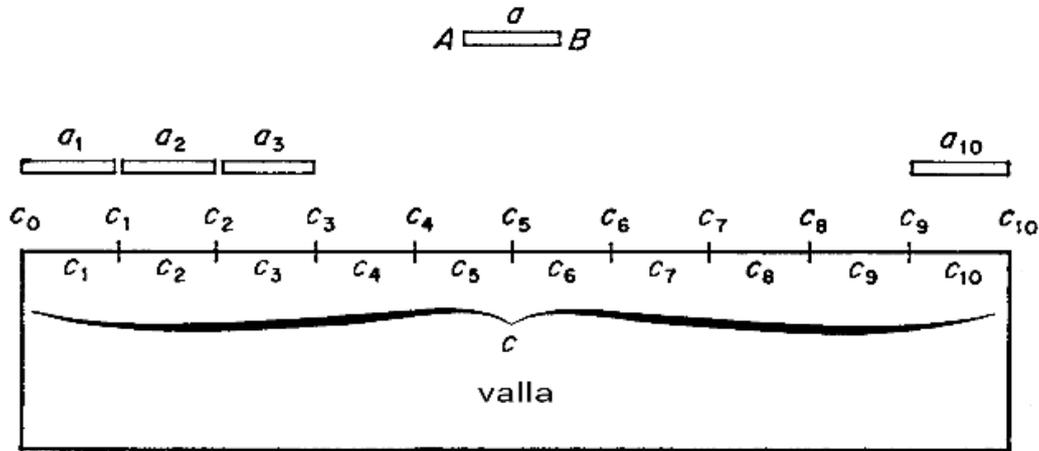
$$L(c_1) = 1, L(c_2) = 1, \dots, L(c_{10}) = 1.$$

Por la regla 2, de aditividad:

$$L(c_1 \circ c_2) = 2, L(c_1 \circ c_2 \circ c_3) = 3, \dots$$

Por consiguiente:

$$L(c) = L(c_1 \circ c_2 \circ \dots \circ c_{10}) = 10.$$



**Figura 9-1.**

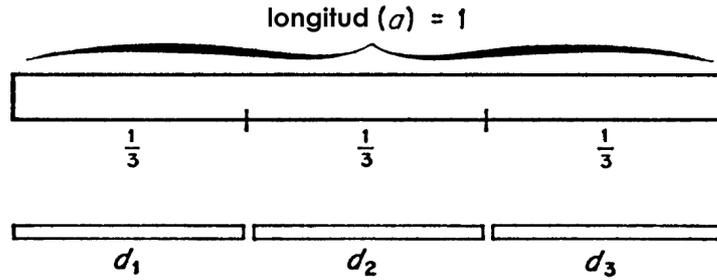
Este procedimiento, el procedimiento básico para medir la longitud, produce sólo números enteros como valores de la longitud medida. El refinamiento obvio se logra al dividir la unidad de longitud en  $n$  partes iguales. (Tradicionalmente, la pulgada se divide en una forma binaria: primero en dos partes, después en cuatro, ocho, etc. El metro se divide decimalmente: primero en diez partes, después en cien, etc.) De esta manera, somos capaces de construir, por prueba y error, una barra de medir auxiliar con un segmento marcado de longitud  $d$ , de tal forma que  $d$  pueda ser puesto en  $n$  posiciones adyacentes  $d_1, d_2, \dots, d_n$  a lo largo de la unidad de borde  $a$  (véase la figura 9-2). Ahora podemos decir que:

$$n \times L(d) = L(a) = 1$$

Por lo tanto:

$$L(d) = \frac{1}{n}.$$

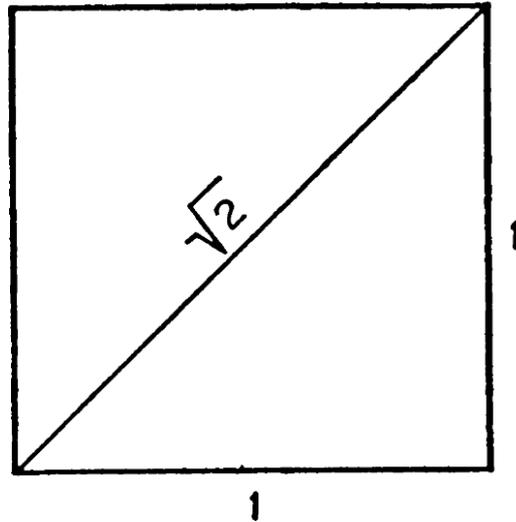
Con estos segmentos parciales marcados sobre  $a$ , podemos medir la longitud de un borde dado con mayor precisión. Cuando, siguiendo con el ejemplo anterior, volvemos a medir la longitud de la valla  $c$ , la longitud podría resultar no ser 10, sino, más precisamente, 10.2. De esta forma, introducimos fracciones en las mediciones, y ya no estamos limitados a los números enteros. Un valor medido puede ser cualquier número racional positivo.



**Figura 9-2.**

Es importante comprender que, al hacer estos refinamientos en la medición, podemos introducir fracciones cada vez más pequeñas, pero nunca podremos llegar a números que no sean racionales. Por otra parte, la clase de los posibles valores de una magnitud en la física es comúnmente considerada como conteniendo todos los números reales (o todos los números reales de un intervalo específico) que incluye tanto los números irracionales como los racionales. Estos números irracionales, sin embargo, son introducidos en una etapa posterior a la medición. La medición directa sólo puede dar valores expresados como números racionales, aun cuando, una vez formuladas las leyes y hechos los cálculos con la ayuda de tales leyes, entren en el cuadro los números irracionales. Son introducidos en un contexto teórico, no en el contexto de la medición directa.

Para aclarar esto, consideremos el teorema de Pitágoras que establece que el cuadrado de la hipotenusa de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los otros dos lados. Este es un teorema en la geometría matemática, pero, cuando es aplicado a los segmentos físicos, se convierte también en una ley de la física. Supongamos que cortamos, de una tabla de madera, un cuadrado con un lado de unidad de longitud. El teorema pitagórico nos dice que la longitud de la diagonal de este cuadrado (véase la figura 9-3) es la raíz cuadrada de 2. La raíz cuadrada de 2 es un número irracional. Estrictamente, no puede medirse con una regla basada sobre nuestra unidad de medición, sin importar qué tan pequeñas marquemos las subdivisiones fraccionales. Sin embargo, cuando calculamos la longitud de la diagonal, utilizando el teorema de Pitágoras, obtenemos, indirectamente, un número irracional. Similarmente, si medimos el diámetro de un disco de madera circular y descubrimos que es 1, calculamos la longitud del perímetro del disco como el número irracional pi.



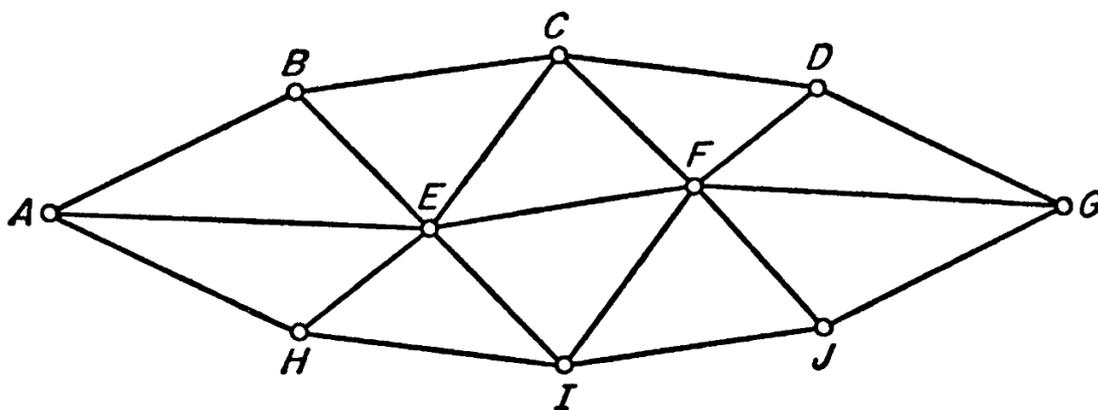
**Figura 9-3.**

Ya que los números irracionales son siempre el resultado de cálculos, y nunca el resultado de mediciones directas, ¿no sería posible, en la física, abandonar por completo los números irracionales y trabajar sólo con números racionales? Esta es ciertamente una posibilidad, aunque supondría un cambio revolucionario. Ya no seríamos capaces, por ejemplo, de trabajar con ecuaciones diferenciales, porque éstas requieren del continuo de los números reales. Los físicos aún no han encontrado razones suficientemente importantes como para hacer tal cambio. No obstante, es cierto que, en la física cuántica, está en boga una tendencia hacia la discrecionalidad. La carga eléctrica, por ejemplo, se mide sólo en cantidades que sean múltiplos de una carga eléctrica mínima. Si tomamos esta carga eléctrica como la unidad, todos los valores de las cargas eléctricas son números enteros. La mecánica cuántica aún no es totalmente discreta, pero tanto de ella es discreto que algunos físicos están comenzando a especular con la posibilidad de que todas las magnitudes físicas, incluyendo las del espacio y del tiempo, sean discretas. Todo esto es sólo una especulación, pero es una especulación sumamente interesante.

¿Qué tipo de leyes serían posibles en una física así? Probablemente habría un valor mínimo para cada magnitud, y todos los valores más grandes serían expresados como múltiplos de este valor básico. Se ha sugerido que el valor mínimo para la longitud sea llamado “hodón”, y que el valor mínimo para el tiempo sea llamado “cronón”. El tiempo discreto consistiría en saltos de minutos inconcebibles, como el movimiento de la manecilla de un reloj eléctrico cuando salta de un segundo al

siguiente. No podría ocurrir evento físico alguno dentro de ningún intervalo entre los saltos.

El espacio discreto podría consistir en puntos del tipo mostrado en la figura 9-4. Las líneas de conexión en el diagrama indican qué puntos son “puntos vecinos” (por ejemplo,  $B$  y  $C$  son vecinos,  $B$  y  $F$  no lo son). En la geometría de continuidad habitual, diríamos que hay una infinitud de puntos entre  $B$  y  $C$ , pero en la geometría discreta, si la física adoptase esta perspectiva del espacio, diríamos que *no* hay puntos intermedios entre  $B$  y  $C$ . Ningún fenómeno físico, de ningún tipo, podría tener una posición “entre”  $B$  y  $C$ . Un electrón, por ejemplo, tendría que estar en alguno de los puntos sobre la red, y nunca en cualquier otro lado sobre el diagrama. La longitud estaría definida como la longitud mínima de un camino que conecta dos puntos. Podríamos estipular que la distancia entre cualesquiera dos puntos vecinos es 1. Entonces la longitud del camino  $ABCDG$  sería 4, la de  $AEFG$  sería 3, etc. Diríamos que la distancia de  $A$  a  $G$  es 3, porque esa es la longitud del camino más corto de  $A$  a  $G$ . Toda longitud estaría expresada como un número entero. No se ha construido ningún sistema real de este tipo para la física, aunque se han hecho muchas insinuaciones sugestivas. Algunos físicos incluso han especulado sobre el tamaño de estas magnitudes mínimas.



**Figura 9-4.**

En algún tiempo futuro, cuando se sepa mucho más sobre el espacio y el tiempo y otras magnitudes de la física, podríamos llegar a descubrir que todas ellas son discretas. Entonces las leyes de la física tratarían únicamente con números enteros que serían, desde luego, números de un tamaño estupendo. En cada milímetro de longitud, por ejemplo, habría miles de millones de la unidad mínima. Los valores asumidos por una magnitud estarían tan cerca unos de otros que, en la práctica, procederíamos como si tuviésemos un continuo de números reales. Prácticamente, los físicos probablemente

continuarían utilizando el cálculo y formulando leyes en la forma de ecuaciones diferenciales, al igual que antes. Lo más que podemos decir ahora es que algunos rasgos de la física se simplificarían al adoptar escalas discretas, mientras que otros se volverían más complejos. Nuestras observaciones nunca pueden decidir si un valor debe expresarse como un número racional o irracional, así que la cuestión aquí es completamente convencional: ¿será una escala numérica discreta la más útil para formular ciertas leyes físicas, o será una escala continua?

En nuestra descripción de cómo son medidas las longitudes, aún no hemos considerado una cuestión extremadamente importante: ¿qué tipo de cuerpo debemos tomar como nuestra vara de medir estándar? Para los propósitos del día a día, sería suficiente con tomar una barra de hierro, o incluso una varilla de madera, porque aquí no es necesario medir longitudes con gran precisión. Pero si buscamos mayor precisión, inmediatamente vemos que nos enfrentamos a una dificultad similar a la de la periodicidad.

Como recordarán, tuvimos el aparente problema de basar nuestra unidad de tiempo sobre un proceso periódico con periodos iguales. Aquí tenemos el problema análogo de basar nuestra unidad de longitud sobre un “cuerpo rígido”. Nos vemos inclinados a pensar que necesitamos un cuerpo que siempre permanezca con exactamente la misma longitud, así como antes necesitábamos un proceso periódico con intervalos de tiempo que siempre fueran iguales. Obviamente, pensamos, no queremos basar nuestra unidad de longitud sobre una barra de caucho o sobre una barra de cera, que se deforman fácilmente. Asumimos que necesitamos una barra rígida, una que no altere su forma o tamaño. Quizá definamos la “rigidez” de esta manera: una barra es rígida si la distancia entre cualesquiera dos puntos marcados sobre la barra permanece constante en el curso del tiempo.

Pero, ¿exactamente qué queremos decir con “permanece constante”? Para explicarlo, tendríamos que introducir el concepto de longitud. A menos que tengamos un concepto de longitud y un medio para medirlo, ¿qué significaría decir que, en realidad, la distancia entre dos puntos sobre una barra permanece constante? Y si no podemos determinar esto, ¿cómo podemos definir la rigidez? Así, estamos atrapados en el mismo tipo de circularidad en donde ya nos encontramos atrapados cuando buscamos una manera de identificar un proceso periódico más fuerte antes de haber desarrollado un sistema de medición del tiempo. Una vez más, ¿cómo escapamos de este círculo vicioso?

La salida es similar a la forma en la que escapamos de la circularidad al medir el tiempo: el uso de un concepto relativo en lugar de uno absoluto. Podemos, sin circularidad alguna, definir el concepto de “rigidez relativa” de un cuerpo con respecto a otro. Tomemos un cuerpo  $M$  y otro cuerpo  $M'$ . En aras de la simplicidad, asumamos que cada uno de estos cuerpos tiene un borde recto. Podemos poner los bordes juntos y comparar los puntos marcados a lo largo de ellos. (Véase la figura 9-5.)

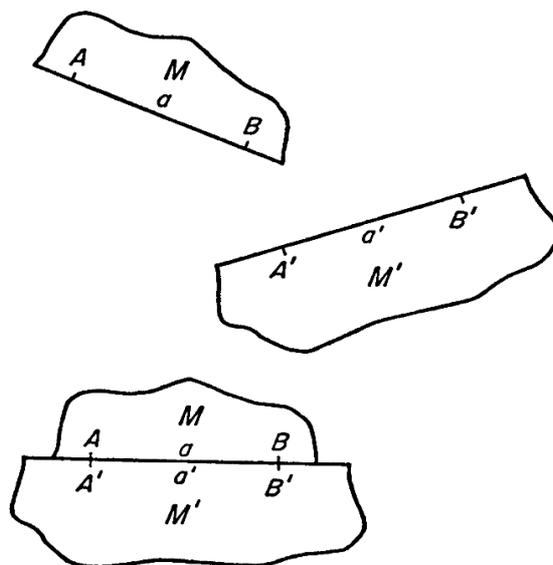


Figura 9-5.

Consideremos un par de puntos  $A, B$  marcados sobre  $M$  que determinan el segmento  $a$ . De igual forma, sobre  $M'$  un par de puntos  $A', B'$  que determinan el segmento  $a'$ . Decimos que el segmento  $a$  es congruente con el segmento  $a'$  si, siempre que los dos bordes sean puestos uno junto al otro, el punto  $A$  coincide con el punto  $A'$ , y el punto  $B$  coincide con  $B'$ . Este es nuestro procedimiento operacional para decidir que los segmentos  $a$  y  $a'$  son congruentes. Descubrimos que, siempre que hacemos esta prueba, los puntos pares coinciden, así que concluimos que, si repetimos el experimento en cualquier tiempo futuro, el resultado será probablemente el mismo. Además, supongamos que *cada* segmento marcado de esta manera sobre  $M$  es congruente, siempre que se hace la prueba, con su segmento correspondiente marcado sobre  $M'$ . Entonces decimos que  $M$  y  $M'$  son *rígidos con respecto al otro*.

Es importante entender que aquí no está supuesta ninguna circularidad. No podemos hablar, y no lo hacemos, de una rigidez absoluta de  $M$ ; no podemos decir que  $M$  siempre permanece constante en cuanto a longitud se refiere. Pero sí tiene sentido decir que los dos cuerpos son *rígidos con respecto al otro*. Si elegimos  $M$  como nuestra vara de medir, encontramos que los segmentos marcados sobre  $M'$  permanecen

constantes en longitud. Si elegimos  $M'$  como nuestra vara de medir, los segmentos sobre  $M$  permanecen constantes. Lo que tenemos aquí es un concepto de rigidez relativa, la rigidez de un cuerpo con respecto a otro.

Cuando examinamos los distintos cuerpos en el mundo, encontramos muchos que no son rígidos unos con respecto a otros. Consideremos, por ejemplo, mis dos manos. Las pongo juntas de tal suerte que coincidan ciertos pares de puntos sobre las puntas de mis dedos. Si las pongo juntas de nuevo, las posiciones de mis dedos han cambiado. Los mismos pares de puntos ya no son congruentes, así que no puedo decir que mis manos han permanecido rígidas una con respecto a la otra. Lo mismo es cierto si comparamos dos cuerpos hechos de cera, o un cuerpo de hierro y uno de goma suave. No son rígidos uno con respecto al otro. Pero, justo como descubrimos que el mundo contiene una gran clase de procesos equivalentes en su periodicidad, así descubrimos otra afortunada circunstancia accidental de la naturaleza. Encontramos, empíricamente, que hay una clase muy exhaustiva de cuerpos que son aproximada y relativamente rígidos unos con otros. Cualesquiera dos cuerpos de metal - hierro, cobre, etc. - son relativamente rígidos unos con otros; también lo son los cuerpos de piedra e incluso de madera, si ésta ha sido bien secada y ya no es verde. Encontramos que un gran número de sustancias sólidas son de un tipo tal que los cuerpos hechos de tales sustancias son rígidos unos con respecto a otros. Desde luego, no son rígidos si los doblamos, o si los expandimos calentándolos, etc. Pero en tanto no interfieran circunstancias anormales, estos cuerpos se comportan de una forma extremadamente regular en cuanto a sus longitudes se refiere. Cuando hacemos comparaciones estimativas entre ellos, descubrimos que son relativamente rígidos.

Recordarán que, en nuestra discusión sobre la periodicidad, vimos que no hay razón lógica alguna que nos impida basar nuestra medición del tiempo sobre uno de los procesos periódicos pertenecientes a la gran clase de procesos equivalentes. Elegimos un proceso específico únicamente por razones de simplicidad en nuestras leyes naturales. Aquí está involucrada una elección similar. No hay una necesidad lógica para basar la medición de la longitud sobre un miembro de la gran clase de cuerpos relativamente rígidos. Elegimos tales cuerpos porque resulta más conveniente hacerlo así. Si decidiésemos elegir un caucho o una varilla de cera como nuestra unidad de longitud, encontraríamos muy pocos cuerpos en el mundo - si acaso alguno - que fuesen relativamente rígidos para nuestro estándar. Nuestra descripción de la naturaleza se volvería, por tanto, enormemente complicada. Tendríamos que decir, por ejemplo, que

los cuerpos de hierro cambian constantemente de longitud, porque, cada vez que los medimos con nuestra flexible vara de goma, obtendríamos un valor distinto. Claro está que ningún científico querría cargar con las complejas leyes físicas que tendrían que ser ideadas para describir tales fenómenos. Por otra parte, si elegimos una barra de metal como nuestro estándar de longitud, encontramos que un gran número de cuerpos en el mundo son rígidos cuando son medidos con ella. Así, introducimos mucha mayor regularidad y simplicidad en nuestra descripción del mundo.

Esta regularidad deriva, obviamente, de la naturaleza del mundo real. Podríamos vivir en un mundo en donde los cuerpos de hierro fuesen relativamente rígidos unos con otros y los cuerpos de cobre igualmente relativamente rígidos unos con otros, pero en donde un cuerpo de hierro no fuese relativamente rígido con uno de cobre. No hay contradicción lógica en lo anterior, ya que es un mundo posible. Si viviésemos en tal mundo y descubriésemos que contiene una gran cantidad de bronce y hierro, ¿cómo elegiríamos entre ambos como una base apropiada para la medición? Cada elección tendría una desventaja. Si otros metales estuviesen igualmente fuera de lugar unos con otros, por así decirlo, nuestra elección sería aún más complicada. Por fortuna, vivimos en un mundo en donde esto no es el caso. Todos los metales son relativamente rígidos unos con otros; por lo tanto, podemos tomar cualquiera de ellos como nuestro estándar. Cuando lo hacemos, encontramos que otros cuerpos metales son rígidos.

Resulta tan evidentemente deseable basar nuestra medición de la longitud sobre un metal y no sobre una barra de caucho, y basar nuestra medición del tiempo sobre un péndulo y no sobre un latido, que tendemos a olvidar que hay un componente convencional en nuestra elección para un estándar. Es un componente sobre el que he hecho hincapié en mi tesis doctoral sobre el espacio,<sup>7</sup> y Reichenbach hizo después lo mismo en su libro sobre el espacio y el tiempo. La elección es convencional en el sentido de que no hay razón lógica alguna que nos impida elegir la barra de caucho y el latido y después pagar el precio de haber hecho esto desarrollando una física fantásticamente compleja para tratar con un mundo enormemente irregular. Esto no significa, desde luego, que la elección es arbitraria, que una elección es tan buena como cualquier otra. Existen fuertes motivos prácticos, siendo el mundo como es, para preferir la barra de hierro y el péndulo.

---

<sup>7</sup> *Der Raum. Ein Beitrag zur Wissenschaftslehre* (Jena: University of Jena, 1921); (Berlín: Verlag von Reuther & Reichard, 1922).

Una vez elegido un estándar de medición, tal como una barra de hierro, nos enfrentamos a otra elección. Podemos decir que la longitud de esta barra particular es nuestra unidad, sin importar los cambios en su temperatura, magnetismo, etc., o podemos introducir factores de corrección dependientes de tales cambios. La primera elección proporciona, obviamente, la regla más simple, pero si la adoptamos, de nuevo nos confrontamos con extrañas consecuencias. Si se calienta la barra y después se utiliza para la medición, encontramos que todos los otros cuerpos en el mundo se reducen. Si después enfriamos la barra, el resto del mundo se expande otra vez. Nos veríamos obligados a formular todo tipo de leyes bizarras y complejas, pero no habría ninguna contradicción lógica para esto. Por esta razón, podemos decir que es una elección posible.

El segundo procedimiento consiste en introducir factores de corrección. En lugar de suponer que el segmento entre las dos marcas siempre será tomado como teniendo la longitud elegida  $l_0$  (digamos, 1 o 100), ahora decretamos que tiene la longitud normal  $l_0$  sólo cuando la barra tiene una temperatura  $T_0$ , que previamente hemos elegido como la temperatura “normal”, mientras que a cualquier otra temperatura  $T$  la longitud del segmento está dada por la ecuación:

$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)],$$

donde  $\beta$  es una constante (llamada “coeficiente de expansión térmica”) característica de la sustancia de la barra. De la misma forma, se introducen correcciones similares para otras condiciones, tales como la presencia de campos magnéticos, que también podrían llegar a afectar la longitud de la barra. Los físicos prefieren por mucho este procedimiento más complicado - la introducción de factores de corrección - por la misma razón que eligen una barra metálica en lugar de una de caucho; la elección conduce a una vasta simplificación de las leyes físicas.

## CAPÍTULO 10

### Magnitudes derivadas y lenguaje cuantitativo

Cuando han sido dadas las reglas de medición para algunas magnitudes, como la longitud espacial, la longitud del tiempo, y la masa, entonces, sobre la base de tales magnitudes “primitivas”, podemos introducir otras magnitudes por definición. A éstas se les llama magnitudes “definidas” o “derivadas”. El valor de una magnitud derivada siempre puede determinarse de manera indirecta, con la ayuda de su definición, a partir de los valores de las magnitudes primitivas supuestas en la definición.

En algunos casos, es posible construir un instrumento que mida tal magnitud de forma directa. Por ejemplo, la densidad es comúnmente considerada una magnitud derivada porque su medición descansa sobre la medición de las magnitudes primitivas de la longitud y la masa. Medimos directamente el volumen y la masa de un cuerpo y después definimos su densidad como el cociente de la masa dividido entre el volumen. Es posible, no obstante, medir la densidad de un líquido de forma directa por medio de un hidrómetro. Éste es, por lo general, un flotador de vidrio, con un gran vástago delgado como el de los termómetros. El vástago está marcado con una escala que indica la profundidad a la que éste se hunde en el líquido a ser probado, y la densidad aproximada del líquido está directamente determinada por la lectura de esta escala. De esta forma, vemos que la distinción entre magnitudes primitivas y derivadas no debe considerarse como una distinción fundamental, sino, más bien, como una distinción que descansa sobre los procedimientos prácticos que adoptan los físicos al hacer mediciones.

Si un cuerpo no es homogéneo, debemos hablar de una “densidad media”. Uno podría estar tentado a decir que la densidad de un cuerpo así, en cualquier punto dado, debe expresarse como el límite del cociente de la masa dividida entre el volumen, pero, como la materia es discreta, el concepto de límite no aplica aquí. En los casos de otras magnitudes derivadas, sí es necesario el enfoque del límite. Por ejemplo, consideremos un cuerpo moviéndose a lo largo de un camino. Durante un intervalo de tiempo de longitud  $\Delta t$ , recorre una longitud espacial de  $\Delta s$ . Entonces definimos su “velocidad”, otra magnitud derivada, como el cociente  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ . Si la velocidad no es constante,

únicamente podemos decir que su “velocidad media” durante este intervalo de tiempo fue  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ . ¿Cuál fue la velocidad del cuerpo en un cierto punto de tiempo durante este intervalo? La pregunta no puede ser respondida definiendo la velocidad como un simple cociente de la distancia dividida entre el tiempo. Debemos introducir el concepto de límite del cociente a medida que el intervalo de tiempo se aproxima a cero. En otras palabras, debemos hacer uso de lo que en el cálculo se conoce como derivada. En lugar del simple cociente  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ , tenemos la derivada:

$$\frac{ds}{dt} = \text{límite} \frac{\Delta s}{\Delta t} \text{ para } \Delta t \rightarrow 0.$$

A esto se le llama “velocidad instantánea” del objeto porque expresa una velocidad en un punto de tiempo particular, y no una velocidad promediada durante un intervalo. Lo anterior es, desde luego, otro ejemplo de magnitud derivada. Al igual que el concepto de densidad, también puede ser medida directamente por medio de determinados instrumentos. Por ejemplo, el velocímetro de un coche proporciona una medición directa de la velocidad instantánea del coche.

También se recurre al concepto de límite para definir la magnitud derivada de aceleración. Tenemos una velocidad  $v$  y un cambio en la velocidad  $\Delta v$ , que tiene lugar de un punto de tiempo a otro. Si el intervalo de tiempo es  $\Delta t$  y el cambio en la velocidad es  $\Delta v$ , entonces la aceleración, o la proporción en que cambia la velocidad, es  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ . Aquí, de nuevo, debemos considerar esto como la “aceleración media” durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Si queremos ser más precisos y hablar de una “aceleración instantánea” en un punto de tiempo dado, debemos abandonar el cociente de dos valores finitos y escribir la siguiente derivada:

$$\frac{dv}{dt} = \text{límite} \frac{\Delta v}{\Delta t} \text{ para } \Delta t \rightarrow 0.$$

La aceleración instantánea, por lo tanto, es la misma que la segunda derivada de  $s$  con respecto a  $t$ :

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}.$$

A veces, un físico podría decir que la densidad de un cierto punto en un cuerpo físico es la derivada de su masa con respecto a su volumen, pero esto es sólo una forma tosca de hablar. Su declaración no puede tomarse literalmente, porque, aunque el

espacio y el tiempo son continuos (en la física de hoy en día), la distribución de la masa en un cuerpo no lo es (por lo menos no en el nivel molecular o atómico). Por esta razón, no podemos hablar, literalmente, de la densidad como una derivada; no es una derivada en el sentido de que este concepto de límite pueda aplicarse a magnitudes genuinamente continuas.

Existen muchas otras magnitudes derivadas en la física, y para introducirlas no tenemos que establecer reglas muy complicadas, tales como las discutidas anteriormente para introducir magnitudes primitivas. Sólo tenemos que definir cómo puede calcularse una magnitud derivada a partir de los valores de las magnitudes primitivas, que pueden medirse directamente.

A veces puede surgir un problema desconcertante referente a las magnitudes primitivas y derivadas. Para que quede claro, imaginemos dos magnitudes  $M_1$  y  $M_2$ . Cuando examinamos la definición de  $M_1$  o las reglas que nos dicen cómo medirla, descubrimos que está involucrada la magnitud  $M_2$ . Cuando nos dirigimos a la definición o a las reglas para  $M_2$ , descubrimos que está involucrada  $M_1$ . A primera vista, esto da una impresión de circularidad en los procedimientos, pero es fácil salir del círculo si aplicamos lo que se conoce como método de aproximación sucesiva.

Ustedes recordarán que, en algún capítulo anterior, consideramos la ecuación que define la longitud de una vara de medir. En esa ecuación, tiene lugar un factor de corrección para la expansión térmica; en otras palabras, la temperatura está involucrada en el conjunto de reglas utilizado para medir la longitud. Por otra parte, también recordarán que, en nuestras reglas para medir la temperatura, nos referimos a la longitud, o, mejor dicho, al volumen de un determinado líquido de prueba empleado en el termómetro; pero, desde luego, el volumen se determina con la ayuda de la longitud. Así que parece que aquí tenemos dos magnitudes, longitud y temperatura, cada una dependiente de la otra para su definición. Parece ser un círculo vicioso, pero en realidad no lo es.

Una salida de este círculo es como sigue. Primero, introducimos el concepto de longitud sin considerar el factor de correlación para la expansión térmica. Este concepto no nos ofrecerá mediciones de gran precisión, pero funcionará lo suficientemente bien si no requerimos una gran precisión. Por ejemplo, si se utiliza una barra de hierro para la medición, la expansión térmica, bajo condiciones normales, es tan pequeña que las mediciones seguirán siendo bastante precisas. Esto proporciona un primer concepto,  $L_1$ ,

de longitud espacial. Ahora podemos hacer uso de este concepto en la construcción de un termómetro. Con la ayuda de la vara de medir de hierro, marcamos una escala a lo largo del tubo que contiene nuestro líquido de prueba. Ya que podemos construir esta escala con suficiente precisión, también obtenemos una precisión razonable cuando medimos la temperatura sobre esta escala. De esta forma introducimos nuestro primer concepto de temperatura,  $T_1$ . Ahora podemos utilizar  $T_1$  para establecer un concepto refinado de longitud  $L_2$ . Hacemos esto introduciendo  $T_1$  en las reglas para definir la longitud. Ahora tenemos a nuestra disposición el concepto refinado de longitud,  $L_2$  (corregido para la expansión térmica de la barra de hierro), para construir una escala más precisa para nuestro termómetro. Esto conduce, evidentemente, a  $T_2$ , un concepto refinado de temperatura.

En el caso de la longitud y la temperatura, el procedimiento recién descrito perfeccionará ambos conceptos hasta el punto en donde los errores sean extremadamente minúsculos. En otros casos, podría resultar necesario ir de ida y vuelta varias veces antes de que los sucesivos refinamientos conduzcan a mediciones lo suficientemente precisas para nuestros propósitos. Debemos admitir que nunca alcanzaremos un método absolutamente perfecto para medir cualquier concepto. Podemos decir, sin embargo, que entre más repitamos este procedimiento - comenzando con dos conceptos vagos y después refinando cada uno con la ayuda del otro -, más precisas serán nuestras mediciones. Por esta técnica de aproximaciones sucesivas, escapamos de lo que en un principio parecía ser un círculo vicioso.

Ahora nos ocuparemos de una cuestión planteada muchas veces por los filósofos: ¿pueden aplicarse las mediciones a cada aspecto de la naturaleza? ¿Es posible que ciertos aspectos del mundo, incluso ciertos tipos de fenómenos, sean, en principio, inmensurables? Por ejemplo, algunos filósofos podrían conceder que todo en el mundo físico es mensurable (aunque algunos filósofos inclusive niegan esto), pero piensan que, en el mundo mental, este no es el caso. Algunos incluso van tan lejos como para afirmar que todo lo que es mental no es mensurable.

Un filósofo que adopta este punto de vista podría argumentar como sigue: “La intensidad de una sensación, o de un dolor corporal, o el grado de intensidad con el que recuerdo un evento pasado no es, en principio, mensurable. Podría sentir que mi memoria de un evento es más intensa que mi memoria de otro, pero no me es posible

decir que una es intensa al grado 17 y otra al grado 12.5. La medición de la intensidad de la memoria es, por tanto, imposible en principio.”

En respuesta a este punto de vista, consideremos primero la magnitud física del peso. Uno toma una piedra. Está pesada. La compara con otra piedra, una mucho más ligera. Si se examinan ambas piedras, uno no llegará a número alguno ni encontrará unidad discreta alguna que pueda contar. El fenómeno, por sí mismo, no contiene nada numérico, sino únicamente nuestras sensaciones privadas de peso. Pero como hemos visto en capítulos anteriores, introducimos el concepto numérico del peso estableciendo un procedimiento para medirlo. Somos *nosotros* quienes asignamos números a la naturaleza. Los fenómenos, por sí mismos, sólo exhiben cualidades que observamos. Todo lo numérico, excepto para los números cardinales que pueden correlacionarse con objetos discretos, lo llevamos nosotros cuando ideamos procedimientos para la medición.

La respuesta a nuestra cuestión filosófica debe plantearse, pienso, de esta manera. Si, en cualquier campo de fenómenos, uno encuentra el suficiente orden como para hacer comparaciones y decir que, en cierto aspecto, una cosa está por encima de otra cosa, y que ésta está por encima de otra, entonces existe, en principio, la posibilidad de medición. Ahora le toca a uno idear reglas por las cuales puedan asignarse números a los fenómenos en una forma útil. Como hemos visto, el primer paso es encontrar reglas comparativas; después, si es posible, encontrar reglas cuantitativas. Cuando asignamos números a los fenómenos, no tiene caso preguntar si son los números “correctos”. Simplemente ideamos reglas que especifican cómo deben asignarse tales números. Desde esta perspectiva, nada es, en principio, inmensurable.

Y es que en la psicología, de hecho, hacemos mediciones. Las mediciones para la sensación fueron introducidas en el siglo XIX; quizá el lector recuerde la ley de Weber-Fechner, en lo que después se llamó el campo de la psicofísica. La sensación a ser medida fue primero correlacionada con algo físico, y después se establecieron reglas para determinar el grado de intensidad de la sensación. Por ejemplo, se midió la sensación de presión que ejercen sobre la piel distintos pesos, o la sensación del tono de un sonido, o la intensidad de un sonido, etc. Una forma de medir el tono - estamos hablando de la sensación, no de la frecuencia de la onda de sonido - consiste en construir una escala basada sobre una unidad que sea la diferencia más pequeña en tono que uno pueda detectar. S. S. Stevens propuso alguna vez otro procedimiento basado sobre la identificación de un tono por parte de un sujeto, que sentiría que aquél se

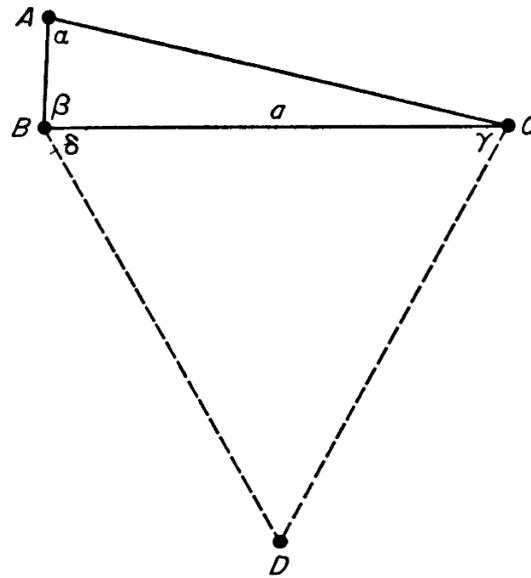
encuentra exactamente a mitad de camino de otros dos tonos. Por lo tanto, ciertamente no es el caso de que haya, en principio, una imposibilidad fundamental de aplicar el método cuantitativo a los fenómenos psicológicos.

En este punto, debemos hacer un comentario referente a una limitación del procedimiento de medición. No existe la menor duda de que la medición es uno de los procedimientos básicos de la ciencia, pero, al mismo tiempo, debemos tener cuidado de no sobreestimar sus alcances. La especificación de un procedimiento de medición no siempre nos da el significado total de un concepto. Mientras más estudiamos una ciencia desarrollada, especialmente una opulentamente desarrollada como la física, más nos damos cuenta del hecho de que el significado total de un concepto no puede darse por un procedimiento de medición. Esto es cierto incluso para los conceptos más simples.

Como ejemplo de lo anterior, consideremos la longitud espacial. El procedimiento de medir la longitud con una barra rígida puede ser aplicado sólo dentro de un cierto rango intermedio de valores que no sean muy grandes ni muy pequeños. Puede aplicarse a una longitud tan pequeña como, quizá, un milímetro o una fracción de milímetro, pero no a una milésima parte de un milímetro. Las longitudes extremadamente pequeñas no pueden medirse de esta forma. Tampoco podemos aplicar una vara de medir a la distancia entre la Tierra y la Luna. Incluso la distancia de los Estados Unidos a Inglaterra no puede medirse por tal procedimiento sin construir primero un puente sólido de aquí a Inglaterra. Desde luego, seguimos hablando de una distancia espacial entre este país e Inglaterra, refiriéndonos a una distancia que *podría* ser medida con una vara de medir si la superficie de la Tierra entre los dos países fuese sólida. Pero la superficie no es sólida, así que, incluso aquí, debemos idear otros procedimientos para medir la longitud.

Un procedimiento como tal consiste en lo siguiente. Por medio de una vara de medir establecemos una cierta distancia sobre la Tierra, por ejemplo, entre los puntos  $A$  y  $B$  (véase la figura 10-1). Con esta línea  $AB$  como base, podemos determinar la distancia de  $B$  a un punto remoto  $C$ , sin utilizar una vara de medir. Por medio de instrumentos de medición, medimos los dos ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ . Los teoremas de la geometría física nos permiten calcular la longitud de la línea  $a$ , que es la distancia entre  $B$  y  $C$ . Conociendo esta distancia, y midiendo los ángulos  $\delta$  y  $\gamma$ , podemos calcular la distancia de  $B$  a un punto todavía más remoto  $D$ . Así, por el proceso llamado

“triangulación”, podemos medir una gran red de distancias y, de esta forma, construir el mapa de una gran región.



**Figura 10-1.**

Los astrónomos también recurren a la triangulación para medir distancias desde la Tierra a estrellas relativamente cercanas dentro de nuestra galaxia. Desde luego, las distancias sobre la Tierra son demasiado cortas como para servir de líneas de base, así que los astrónomos recurren a la distancia de un punto de la órbita terrestre al punto opuesto. Este método no es lo suficientemente preciso para estrellas a distancias muy grandes dentro de nuestra galaxia o para medir distancias a otras galaxias, pero, para distancias tan grandes como éstas, es posible utilizar otros métodos. Por ejemplo, el brillo intrínseco de una estrella puede determinarse a partir de su espectro; al comparar éste con el brillo de la estrella observado desde la Tierra, uno puede estimar su distancia. Hay muchas otras formas de medir distancias que no pueden ser medidas por la aplicación directa de una vara de medir. Observamos ciertas magnitudes y después, sobre la base de leyes que conectan estas magnitudes con otras magnitudes, llegamos a estimaciones indirectas de las distancias.

En este punto, surge una cuestión importante. Si existen una docena de distintas formas para medir una cierta magnitud física, como la longitud, entonces, en lugar de un único concepto de longitud, ¿no deberíamos hablar de una docena de conceptos distintos? Esta fue la opinión expresada por el físico y filósofo de la ciencia P. W. Bridgman en su ya clásico trabajo *The Logic of Modern Physics* (Macmillan, 1927). Bridgman sostenía que todo concepto cuantitativo debe definirse por las reglas involucradas en el procedimiento para medirlo. A esto a menudo se le llama una

“definición operacional” de un concepto. Pero, si tenemos diversas definiciones operacionales de la longitud, no debemos, de acuerdo con Bridgman, hablar de *el* concepto de longitud. Si lo hacemos, entonces debemos abandonar la noción de que los conceptos están definidos a partir de procedimientos de medición explícitos.

Mi punto de vista sobre esta cuestión es el siguiente. Pienso que es mejor considerar los conceptos de la física como conceptos teóricos en proceso de ser especificados de formas cada vez más fuertes, y no como conceptos totalmente definidos por reglas operacionales. En la vida cotidiana, hacemos diversas observaciones de la naturaleza. Describimos tales observaciones en términos cualitativos, como “largo”, “corto”, “caliente”, “frío”, y en términos comparativos, como “más largo”, “más corto”, “más caliente”, “más frío”. Este lenguaje de observación está conectado con el lenguaje teórico de la física por medio de ciertas reglas operacionales. En el lenguaje teórico, introducimos conceptos cuantitativos como los de longitud y masa, pero no debemos pensar en tales conceptos como explícitamente definidos. Más bien, las reglas operacionales, junto con *todos* los postulados de la física teórica, sirven para ofrecer definiciones parciales, o, mejor dicho, interpretaciones parciales de los conceptos cuantitativos.

Sabemos que estas interpretaciones parciales no son definiciones definitivas, completas, porque la física está constantemente fortaleciéndolas por medio de nuevas leyes y nuevas reglas operacionales. Ningún fin a este proceso está a la vista - la física está lejos de haber desarrollado un conjunto completo de procedimientos -, así que debemos admitir que sólo contamos con interpretaciones parciales, incompletas, de todos los términos teóricos. Muchos físicos incluyen términos tales como “longitud” en el vocabulario de observación porque pueden ser medidos por procedimientos simples y directos. Yo prefiero no clasificarlos de esta forma. Si bien es cierto que, en el lenguaje de la vida cotidiana, cuando decimos, “La longitud de este borde de la mesa es de 30 centímetros”, estamos utilizando “longitud” en un sentido que puede ser completamente definido a partir del simple procedimiento de la vara de medir, esto es sólo una pequeña parte del significado total del concepto de longitud. Es un significado aplicable sólo a un cierto rango de valores intermedio al cual puede aplicarse la técnica de la vara de medir. No puede aplicarse a la distancia entre dos galaxias o entre dos moléculas. Aún así es claro que, en estos tres casos, tenemos en mente el mismo concepto. En lugar de decir que tenemos muchos conceptos de longitud, cada uno definido a partir de un procedimiento operacional distinto, prefiero decir que tenemos un concepto de longitud

parcialmente definido por todo el sistema de la física, incluyendo las reglas para todos los procedimientos operacionales utilizados para la medición de la longitud.

Lo mismo es cierto para el concepto de masa. Si restringimos su significado a una definición referente a una balanza, entonces sólo podemos aplicar el término a un pequeño rango de valores intermedio. No podemos hablar de la masa de la Luna o de una molécula, ni siquiera de la masa de una montaña o de una casa. Tendríamos que distinguir entre un número de distintas magnitudes, cada una con su propia definición operacional. En los casos en donde puedan aplicarse al mismo objeto dos métodos de medición distintos, tendríamos que decir que las dos magnitudes tienen el mismo valor. En mi opinión, todo esto conduciría a una forma excesivamente compleja de hablar. Parece que es mejor adoptar la forma de lenguaje empleada por la mayoría de los físicos y considerar a la longitud, la masa, etc., como conceptos teóricos y no como conceptos de observación explícitamente definidos por ciertos procedimientos de medición.

Este enfoque no es más que una cuestión de preferencia en la elección de un lenguaje eficiente. No hay sólo una forma correcta de construir un lenguaje científico. Existen cientos de formas distintas. Solamente puedo decir que, desde mi punto de vista, este enfoque de las magnitudes cuantitativas presenta muchas ventajas. Pero no siempre he mantenido esta perspectiva. En el pasado, y de acuerdo con muchos físicos, consideré conceptos tales como la longitud y la masa como “observables” (términos en el lenguaje de observación). Pero cada vez más me inclino a ampliar el alcance del lenguaje teórico y a incluir en él a tales términos. Más tarde discutiremos los términos teóricos con más detalle. Ahora solamente quiero señalar que, desde mi punto de vista, los diversos procedimientos de medición no deben pensarse como magnitudes definidas en un sentido definitivo. Son simplemente casos especiales de lo que yo llamo “reglas de correspondencia”. Sirven para conectar los términos del lenguaje de observación con los términos del lenguaje teórico.

# CAPÍTULO 11

## Méritos del método cuantitativo

Los conceptos cuantitativos no son dados por la naturaleza; surgen de nuestra práctica de aplicar números a los fenómenos naturales. ¿Cuáles son las ventajas de hacer esto? Si las magnitudes cuantitativas estuviesen suministradas por la naturaleza, no nos preguntaríamos más eso que esto: ¿cuáles son las ventajas de los colores? La naturaleza podría no tener colores, pero es agradable encontrarlos en el mundo. Simplemente están ahí, son parte de la naturaleza. No podemos hacer nada contra ello. La situación no es la misma con respecto a los conceptos cuantitativos. Éstos son parte de nuestro lenguaje, no parte de la naturaleza. Somos *nosotros* quienes los introducimos, y, por lo tanto, es legítimo preguntar *por qué* los introducimos. ¿Por qué pasamos por todos los problemas de idear reglas y postulados complicados para tener magnitudes que puedan ser mensurables sobre escalas numéricas?

Todos conocemos la respuesta. Muchas veces se ha dicho que el gran progreso de la ciencia, especialmente en los últimos siglos, no podría haber ocurrido sin el uso del método cuantitativo. (Primeramente introducido de forma precisa por Galileo; otros ya habían recurrido a tal método anteriormente, pero fue él el primero en ofrecer reglas explícitas.) Donde sea posible, la física intenta introducir conceptos cuantitativos. En las últimas décadas, otros campos de la ciencia han seguido el mismo camino. No tenemos duda alguna de que esta práctica es ventajosa, pero es bueno saber, con mayor detalle, exactamente dónde yace la ventaja.

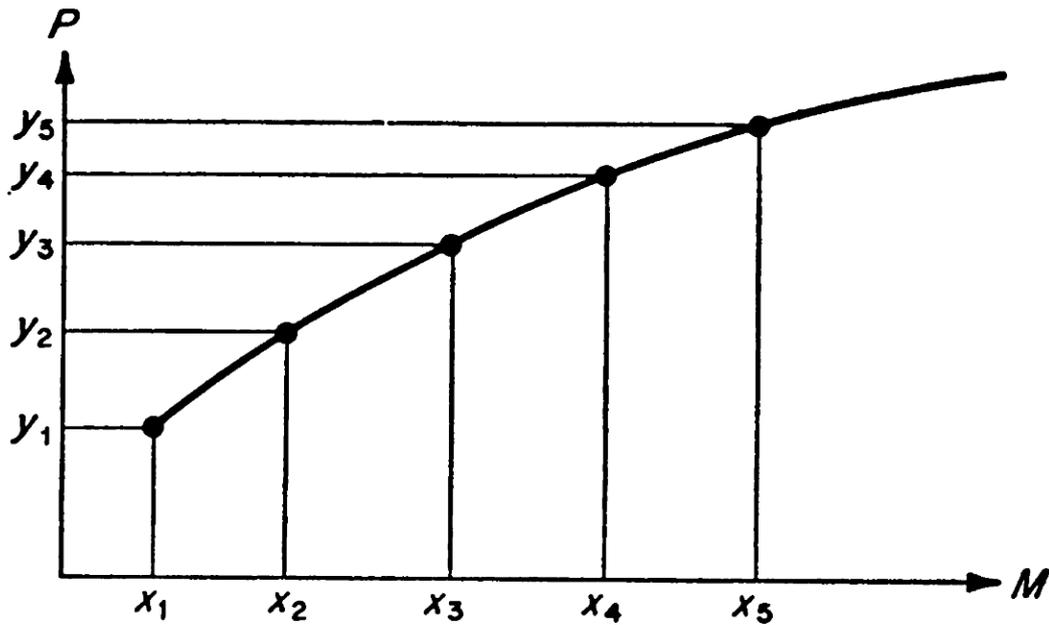
Antes que nada - aunque esta es sólo una ventaja menor -, hay un incremento en la eficiencia de nuestro vocabulario. Antes de la introducción de un concepto cuantitativo, tenemos que utilizar docenas de términos cualitativos distintos o de adjetivos para describir los diversos estados posibles de un objeto con respecto a una magnitud. Sin el concepto de temperatura, por ejemplo, tenemos que hablar de algo como “muy caliente”, “caliente”, “cálido”, “tibio”, “fresco”, “frío”, “helado”, etc. A todos estos los hemos llamado conceptos clasificatorios. Si tuviésemos una centena de tales términos, quizá no sería necesario, para muchos propósitos de la vida diaria, introducir el concepto cuantitativo de temperatura. En lugar de decir, “Hoy hay 25

grados de temperatura”, tendríamos un simpático adjetivo que significase justo esta temperatura, y para 26 grados tendríamos otro, y así sucesivamente.

¿Qué hay de malo en esto? Por un lado, sería extremadamente difícil para nuestra memoria. No sólo tendríamos que conocer un gran número de adjetivos distintos, sino que tendríamos que memorizar su orden, para así poder saber, de manera inmediata, si un determinado término sobre la escala es mayor o menor que otro. Pero si introducimos el concepto único de temperatura, que correlaciona los estados de un cuerpo con números, sólo necesitamos memorizar un término. El orden de la magnitud está inmediatamente suministrado por el orden de los números. Es cierto, obviamente, que antes tuvimos que haber memorizado los números, pero una vez hecho esto, podemos aplicar tales números a cualquier magnitud cuantitativa. De otra forma, tendríamos que memorizar un conjunto de adjetivos distinto para cada magnitud, y, en cada caso, también tendríamos que memorizar su orden específico. Estas son dos ventajas menores del método cuantitativo.

La mayor ventaja, como ya vimos en capítulos anteriores, es que los conceptos cuantitativos nos permiten formular leyes cuantitativas. Tales leyes son infinitamente más poderosas tanto como formas de explicar fenómenos tanto como medios para predecir nuevos fenómenos. Incluso con un lenguaje cualitativo enriquecido, en donde nuestra memoria esté repleta de cientos de adjetivos calificativos, tendríamos gran dificultad para expresar incluso las leyes más sencillas.

Supongamos, por ejemplo, que tenemos una situación experimental en donde observamos que una cierta magnitud  $P$  es dependiente de otra cierta magnitud  $M$ , y representamos esta relación como la curva mostrada en la figura 11-1.



**Figura 11-1.**

Sobre la línea horizontal de esta gráfica, la magnitud  $M$  asume los valores  $x_1, x_2, \dots$ . Para tales valores de  $M$ , la magnitud  $P$  toma los valores  $y_1, y_2, \dots$ . Después de trazar en la gráfica los puntos que se emparejan con estos valores, hacemos encajar una curva suave por estos puntos. Quizá se ajustan a una línea recta; en ese caso, decimos que  $P$  es una función lineal de  $M$ . Esto lo expresamos como  $P = aM + b$ , donde  $a$  y  $b$  son parámetros que permanecen constantes en la situación dada. Si los puntos se ajustan a una curva de segundo grado, entonces tenemos una función cuadrática. Quizá  $P$  es el logaritmo de  $M$ , o podría ser una función más compleja a expresarse en términos de varias funciones más simples. Después de haber decidido sobre la función más probable, probamos, mediante observaciones repetidas, si hemos encontrado una función que represente una ley universal que conecte ambas magnitudes.

¿Qué sucedería en esta situación si no tuviésemos un lenguaje cuantitativo? Asumamos que tenemos un lenguaje cualitativo mucho más rico que el castellano actual. No tenemos palabras como “temperatura” en nuestro lenguaje, sino que tenemos, para cada cualidad, unos cincuenta adjetivos, todos pulcramente ordenados. Nuestra primera observación no sería  $M = x_1$ . En lugar de esto, diríamos que el objeto que observamos es —, utilizando aquí uno de los cincuenta adjetivos que se refieren a  $M$ . Y, en lugar de  $P = y_1$ , tendríamos otra oración en donde emplearíamos uno de los cincuenta adjetivos que tienen referencia con la cualidad  $P$ . Estrictamente hablando, los dos adjetivos no corresponderían a los puntos sobre los ejes de nuestra gráfica -no

podríamos tener suficientes adjetivos que correspondan a *todos* los puntos sobre la línea-, sino más bien a intervalos a lo largo de cada línea. Un adjetivo, por ejemplo, se referiría a un intervalo que contuviese  $x_1$ . Los cincuenta intervalos a lo largo del eje para  $M$ , correspondientes a nuestros cincuenta adjetivos para  $M$ , tendrían que ser límites difusos; incluso podrían llegar a traslaparse. En este lenguaje, no podríamos expresar una ley sencilla de la forma, digamos,  $P = a + bM + cM^2$ . Tendríamos que especificar exactamente cómo cada uno de nuestros cincuenta adjetivos para  $M$  debe emparejarse con uno de los cincuenta adjetivos para  $P$ .

Para ser más específicos, supongamos que  $M$  se refiere a cualidades calientes, mientras que  $P$  se refiere a colores. Una ley que conecte estas dos cualidades consistiría en un conjunto de cincuenta oraciones condicionales de la forma: “Si el objeto está muy, muy, muy caliente (claro está que tendríamos un adjetivo para expresar esto), entonces es de color rojo brillante.” En realidad, en el castellano sí tenemos un gran número de adjetivos para los colores, pero este es prácticamente el único campo de cualidades para el que tenemos tantos adjetivos. En lo que concierne a la mayoría de las magnitudes en la física, hay una gran escasez de adjetivos en el lenguaje cualitativo. Una ley expresada en un lenguaje cuantitativo es mucho más corta y simple que las pesadas expresiones que requeriríamos si intentásemos expresar la misma ley en términos cualitativos. En lugar de una ecuación sencilla, compacta, tendríamos docenas de oraciones del tipo “si-entonces”, cada una emparejando el predicado de una clase con el predicado de otra.

Pero la ventaja más importante de una ley cuantitativa no es su brevedad, sino el uso que puede hacerse de ella. Una vez que tenemos una ley en forma numérica, podemos hacer uso de aquella parte de la lógica deductiva que llamamos matemáticas y, de esta forma, hacer predicciones. Claro está que en el lenguaje cualitativo también podemos recurrir a la lógica deductiva para hacer predicciones. De la premisa “Este cuerpo estará muy, muy, muy caliente” podemos deducir la predicción “Este cuerpo será de color rojo brillante.” Pero este procedimiento sería muy pesado en comparación con los poderosos y eficientes métodos de la deducción que forman parte de las matemáticas. Esta es la mayor ventaja del método cuantitativo. Nos permite expresar leyes en una forma que utiliza funciones matemáticas por las cuales podemos hacer predicciones de la manera más eficiente y precisa posible.

Estas ventajas son tan grandes que, hoy en día, a nadie se le ocurriría proponer que los físicos abandonen el lenguaje cuantitativo y regresen a un lenguaje cualitativo precientífico. Pero en los primeros días de la ciencia, cuando Galileo calculaba las velocidades con las que las pelotas rodaban por planos inclinados y los periodos de un péndulo, probablemente hubo algunos que dijeron: “¿Qué provecho tendrá todo esto? ¿Cómo nos ayudará en la vida cotidiana? Nunca me preocupará lo que sucede a pequeños cuerpos esféricos cuando ruedan por una pista. Es cierto que a veces, cuando estoy pelando chícharos, éstos corren por una mesa inclinada. Pero, ¿cuál es el valor de calcular su aceleración *exacta*? ¿Qué uso práctico podrá tener un conocimiento así?”

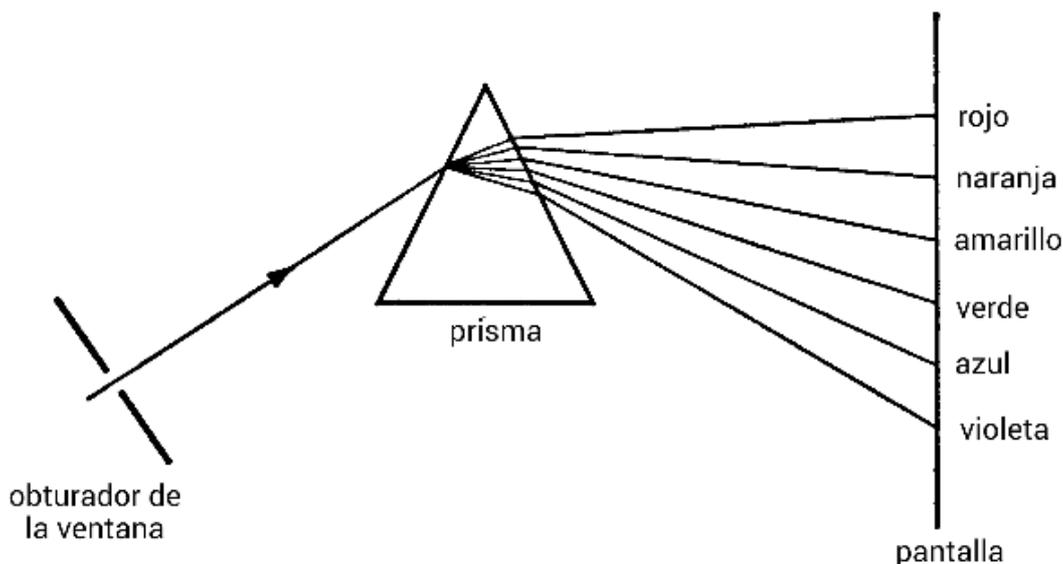
Hoy en día nadie dice esto, porque todos utilizamos docenas de instrumentos complicados - un coche, un refrigerador, una televisión - que sabemos no serían posibles si la física no se hubiese desarrollado como una ciencia cuantitativa. Tengo un amigo que una vez adoptó la actitud filosófica de afirmar que el desarrollo de la ciencia cuantitativa es lamentable porque condujo a una mecanización de la vida. Mi respuesta fue que, si fuera consistente con su actitud, nunca debería subirse a un avión o a un coche, ni utilizar un teléfono. Abandonar la ciencia cuantitativa significaría abandonar todas aquellas comodidades producto de la tecnología moderna. No mucha gente, quiero creer, desearía tal cosa.

En este punto, nos enfrentamos con una crítica emparentada, aunque un tanto distinta, del método cuantitativo. ¿En realidad nos ayuda a *comprender* la naturaleza? Desde luego, podemos describir los fenómenos en términos matemáticos, hacer predicciones, inventar complicadas máquinas, pero, ¿no hay mejores formas de obtener verdaderas revelaciones de los secretos de la naturaleza? Una crítica así al método cuantitativo, como inferior a un enfoque más directo e intuitivo de la naturaleza, fue llevada a cabo por el más grande de los poetas germanos, Göthe. El lector probablemente lo conoce únicamente como un autor de drama y poesía, pero en realidad estaba muy interesado en determinadas partes de la ciencia, en particular la biología y la teoría de los colores, tan es así que llegó a escribir un extenso libro sobre la teoría de los colores y, a veces, consideraba a tal libro como más importante que todos sus trabajos poéticos juntos.

Una parte del libro de Göthe se ocupa de los efectos psicológicos de los colores. Esta parte está sistemáticamente presentada y es realmente muy interesante. Göthe era muy sensible al observar sus experiencias y, por esta razón, estaba bien calificado para discutir cómo están influidos nuestros estados de ánimo por los colores que nos rodean.

Por supuesto, todo decorador de interiores conoce estos efectos. Una gran cantidad de amarillo y rojo en un cuarto es estimulante; los verdes y los azules tienen un efecto calmante, etc. Al momento de elegir colores para nuestros cuartos y nuestras salas de estar, tenemos tales efectos psicológicos en mente. El libro de Göthe también se ocupa de la teoría física del color, y existe una sección histórica en donde discute teorías anteriores, especialmente la teoría de Newton. En principio, Göthe estaba muy poco satisfecho con el enfoque general de Newton. Los fenómenos de la luz en todos sus aspectos, sostenía Göthe, especialmente en los aspectos relativos al color, deben ser observados solamente bajo las condiciones más naturales. Su trabajo en biología lo llevó a concluir que, si uno quiere descubrir el carácter real de un roble o de un zorro, uno debe observar al roble y al zorro en sus hábitats naturales. Göthe transfirió esta noción a la física. Uno observa mejor una tormenta si sale durante una tormenta y mira al cielo. Sucede lo mismo con la luz y los colores. Uno debe verlos tal como ocurren en la naturaleza (la forma en que la luz del Sol se abre paso por las nubes, cómo se alteran los colores del cielo una vez que se pone el Sol, etc.). Al hacer esto, Göthe descubrió algunas regularidades. Pero cuando leyó, en la célebre obra de Newton *Opticks*, la afirmación de que la luz blanca proveniente del Sol es en realidad un compuesto de todos los colores espectrales, Göthe se mostró muy indignado.

¿Por qué se indignó? Porque Newton no hizo sus observaciones de la luz bajo condiciones naturales. En lugar de eso, llevó a cabo su célebre experimento a puerta cerrada, con la ayuda de un prisma. Oscureció su laboratorio y cortó una pequeña rendija en el obturador de su ventana (véase la figura 11-2), una rendija que sólo permitía que un estrecho haz de luz solar entrara en la habitación. Cuando este rayo de luz pasaba por un prisma, Newton observó que emitía, sobre una pantalla, un patrón de distintos colores, que iban desde el rojo hasta el violeta. Newton llamó espectro a este patrón. Al medir los ángulos de refracción en el prisma, concluyó que tales ángulos eran distintos para colores distintos, más pequeños para el rojo, y más grandes para el violeta. Esto lo llevó a la suposición de que el prisma no reproduce los colores, sino que únicamente separa colores contenidos en el haz de luz solar original. Después procedió a confirmar esta suposición a partir de otros experimentos.



**Figura 11-2.**

Göthe planteó varias objeciones al enfoque general de Newton hacia la física, ilustrado en este experimento. Primero, dijo, al intentar comprender la naturaleza, debemos confiar más en las impresiones inmediatas de nuestros sentidos que en el análisis teórico. Como la luz blanca se aparece ante nuestros ojos como perfectamente simple e incolora, debemos aceptarla así, y no representarla como compuesta de distintos colores. También le parecía mal observar un fenómeno natural, como la luz solar, bajo condiciones artificiales, experimentales. Si uno quiere comprender la luz solar, no debe oscurecer su cuarto y después exprimir el haz de luz que pasa por una estrecha rendija. Uno debe salir al cielo abierto y contemplar todos los fenómenos de colores llamativos tal como aparecen en su entorno natural. Por último, Göthe era escéptico sobre la utilidad del método cuantitativo. El hacer mediciones exactas de los ángulos, distancias, velocidades, pesos, etc., y después hacer cálculos matemáticos basados sobre los resultados de tales mediciones, podrá resultar útil, concedía Göthe, para propósitos técnicos, pero tenía serias dudas acerca de si este era el mejor enfoque si queremos obtener una visión real de las formas de la naturaleza.

Hoy en día sabemos, sin lugar a dudas, que en la controversia entre el método analítico, experimental, y cuantitativo de Newton y el enfoque directo, cualitativo, y fenomenológico de Göthe, el primero no sólo ha ganado en la física, sino que está ganando cada vez más terreno en otros campos de la ciencia, incluyendo las ciencias sociales. Ahora resulta obvio, especialmente en la física, que los grandes avances de los últimos siglos no habrían sido posibles sin el uso de métodos cuantitativos.

Aun con todo, no debemos pasar por alto el gran valor que un enfoque intuitivo como el de Göthe podría tener para el descubrimiento de nuevos hechos y para el desarrollo de nuevas teorías, especialmente en campos de conocimiento relativamente nuevos. La vía de imaginación artística seguida por Göthe, junto con sus cuidadosas observaciones, le permitieron descubrir nuevos hechos muy importantes en la morfología comparativa de los organismos vegetales y animales. Algunos de estos descubrimientos fueron posteriormente reconocidos como pasos en la dirección correcta de la teoría de la evolución de Darwin. (Esto fue explicado, en 1853, por el gran físico y fisiólogo alemán Hermann von Helmholtz en una conferencia sobre los estudios científicos de Göthe. Helmholtz elogió altamente el trabajo de Göthe en la biología, aunque criticó su teoría sobre los colores. En 1875, en un comentario final sobre tal conferencia, señaló que algunas de las hipótesis de Göthe, en el ínterin, habían sido confirmadas por la teoría de Darwin.)<sup>8</sup>

Podría ser de algún interés mencionar que, a mediados del último siglo, el filósofo Arthur Schopenhauer escribió un pequeño tratado sobre la visión y los colores (*Über das Sehn und die Farben*), en donde tomó la posición de que Göthe estaba totalmente en lo cierto y Newton totalmente equivocado en su histórica controversia. Schopenhauer condenó no sólo la aplicación de las matemáticas a la ciencia, sino también la técnica de las pruebas matemáticas, hasta el punto de llamarlas “pruebas ratoneras”, citando como ejemplo la prueba del conocido teorema de Pitágoras. Esta prueba, dijo Schopenhauer, es correcta; nadie puede contradecirla y decir que es incorrecta. Pero es una forma absolutamente artificial de razonar. Desde luego, cada paso es convincente, pero en la conclusión de la prueba uno tiene la sensación de haber sido atrapado por una ratonera. El matemático ha obligado a uno a admitir la verdad del teorema, pero no se ha adquirido entendimiento real alguno. Es como si uno hubiese sido llevado a un laberinto. Finalmente, uno sale del laberinto y dice: “Sí, estoy aquí, pero en realidad no sé cómo es que llegué aquí.” Hay algo que decir sobre este punto de vista en la enseñanza de las matemáticas. Debemos prestar más atención a la

---

<sup>8</sup> El trabajo de Göthe *Die Farbenlehre* (“Teoría de los colores”) fue un masivo trabajo de tres partes publicado en Alemania en 1810. Una traducción al inglés de la primera parte, hecha por Charles Eastlake, fue publicada en Londres en 1840. La conferencia de Helmholtz, “On Göthe’s Scientific Researches”, apareció primero en inglés en su *Popular Lectures on Scientific Subjects* (Londres: Longmans, Green, 1881), y fue reimpresa en su *Popular Scientific Lectures* (Nueva York: Dover, 1962). Para una crítica similar del trabajo de Göthe, véase “Göthe’s ‘Farbenlehre’”, un discurso pronunciado por John Tyndall en su *New Fragments* (Nueva York: Appleton, 1892), y la conferencia de Werner Heisenberg, dictada en 1941, “The Teachings of Göthe and Newton on Colour in the Light of Modern Physics”, en *Philosophic Problems of Nuclear Science* (Londres: Faber & Faber, 1952).

comprensión intuitiva de lo que en cada paso estamos haciendo a lo largo de una prueba, y por qué estamos tomando tales pasos. Pero todo esto se da por la misma forma en que abordamos la prueba.

Para ofrecer una respuesta precisa a la cuestión de si perdemos algo cuando describimos el mundo con números, como algunos filósofos creen, debemos distinguir, claramente, entre dos situaciones lingüísticas: un lenguaje que en realidad deja fuera ciertas cualidades de los objetos que describe, y un lenguaje que *parece* dejar fuera ciertas cualidades pero que en realidad no lo hace. Estoy convencido de que muchas de la confusión en el pensamiento de estos filósofos se debe a un malogro en hacer esta distinción.

Aquí, “lenguaje” es utilizado en un sentido extraordinariamente amplio. Se refiere a cualquier método por el cual se comunica información sobre el mundo (palabras, imágenes, diagramas, etc.). Consideremos un lenguaje que deja fuera ciertos aspectos de los objetos que describe. Uno ve en una revista una fotografía en blanco y negro de Manhattan. Quizá la leyenda de la foto dice: “El horizonte de Manhattan, visto desde el oeste.” Esta foto comunica, en el lenguaje de la fotografía en blanco y negro, información sobre Nueva York. Uno aprende algo sobre los tamaños y las formas de los edificios. Esta fotografía es similar a la impresión visual inmediata que uno tendría si estuviera en donde está la cámara y mirase hacia Nueva York. Desde luego, esa es la razón por la cual uno comprende inmediatamente la imagen. No es un lenguaje en el sentido ordinario de la palabra, sino un lenguaje en el sentido más general de que transmite información.

Sin embargo, a la fotografía le falta mucho. No tiene dimensiones de profundidad, y no dice nada acerca de los colores de los edificios. Pero esto no significa que uno no pueda hacer inferencias correctas sobre la profundidad y el color. Si uno ve la fotografía en blanco y negro de una cereza, asume que la cereza probablemente es roja. Pero esto es sólo una inferencia. La imagen, por sí misma, no transmite el color de la cereza.

Regresemos ahora a la situación en donde las cualidades parecen quedar fuera de un lenguaje cuando en realidad no es el caso. Consideremos una partitura. Cuando uno ve por primera vez una partitura, quizá siendo niño, probablemente se pregunta: “¿Qué son estas extrañas cosas aquí? Hay cinco líneas que se extienden por una hoja, y están cubiertas de manchas negras. Algunas de estas manchas tienen colas.”

A uno le dicen: “Esto es música. Es una melodía muy hermosa.” Y uno objeta: “Pero no escucho ninguna música.” En realidad es verdad que esta notación no transmite una melodía de la misma forma en que lo hace, digamos, un disco fonográfico. No hay nada que escuchar. Pero en otro sentido, la notación *sí* transmite el tono y la duración de cada nota. Simplemente no lo transmite en una forma que resulte significativa a un niño. Incluso para un adulto puede ser que la melodía no resulte inmediatamente clara hasta que la haya tocado en un piano o le haya pedido a alguien más que la toque, pero no hay duda de que las notas de la melodía están implícitas en la notación. Desde luego, es necesaria una clave de conversión. Debe haber reglas por las cuales transformar esta notación en sonidos. Pero si estas reglas son conocidas, podemos decir que las cualidades de las notas - su tono, duración, e incluso sus cambios de intensidad - están dadas en la notación. Un músico bien formado incluso podrá ser capaz de escudriñar las notas y “escuchar” la melodía en su mente. Es evidente que aquí tenemos una situación lingüística claramente distinta a la de la fotografía en blanco y negro. La notación musical parece dejar fuera a las notas, pero en realidad no lo hace.

En el caso del lenguaje ordinario, estamos tan acostumbrados a las palabras que a menudo olvidamos que no son signos naturales. Si uno escucha la palabra “azul”, inmediatamente imagina el color azul. Como niños, nos formamos la impresión de que las palabras de los colores de nuestro lenguaje en realidad transmiten el color. Por otro lado, si leemos la declaración, escrita por un físico, de que hay una cierta oscilación electromagnética de determinada intensidad y frecuencia, no nos imaginamos el color que describe. Sin embargo, si uno conoce la clave de conversión, puede determinar el color de una forma tan precisa, y quizá incluso más precisa, como si hubiese escuchado la palabra del color. Si uno ha trabajado con espectroscopios, podrá saber, de memoria, qué colores corresponden con qué frecuencias. En ese caso, la declaración del físico podrá decirle a uno, de manera inmediata, que se trata de un color azul verdoso.

La clave de conversión puede establecerse de muchas formas. Por ejemplo, la escala de frecuencia del espectro visible puede registrarse en una tabla, y se escribe después de cada frecuencia la palabra castellana que le corresponda más estrechamente. O la tabla puede tener, en lugar de las palabras de color, pequeños cuadros que contengan los colores reales. En cualquier caso, cuando uno escucha la declaración cuantitativa del físico, puede inferir, con la ayuda de la clave, exactamente qué color está describiendo. La cualidad, en este caso el color, de ninguna manera se pierde por este método de comunicación. Esta situación es análoga a la de la notación musical;

existe una clave para determinar las cualidades que en principio parecen haber sido omitidas de la notación. No es análoga a la situación de la fotografía en blanco y negro, en donde sí se dejaron fuera ciertas cualidades.

Las ventajas del lenguaje cuantitativo resultan tan evidentes que uno se pregunta por qué es que muchos filósofos han criticado su uso en la ciencia. En el capítulo 12 discutiremos algunas de las razones para esta curiosa actitud.

## CAPÍTULO 12

### La perspectiva mágica del lenguaje

Tengo la impresión de que una de las razones por la que algunos filósofos objetan el énfasis que pone la ciencia en el lenguaje cuantitativo es que nuestra relación psicológica con las palabras de un lenguaje precientífico - palabras que aprendemos cuando somos niños - es muy distinta de nuestra relación psicológica con las complejas notaciones que más tarde tienen lugar en la física. Es comprensible cómo es que un niño cree que ciertas palabras en realidad hacen cumplir, por así decirlo, las cualidades a las que se refieren. No quiero ser injusto con algunos filósofos, pero sospecho que ellos también cometen el mismo error, en lo que respecta a sus reacciones ante las palabras y símbolos científicos, que el de los niños.

En el conocido libro *The Meaning of Meaning*<sup>9</sup>, escrito por C. K. Ogden e I. A. Richards, hay excelentes ejemplos, algunos de ellos bastante divertidos, de lo que los autores llaman “palabra mágica”. Muchas personas tienen una perspectiva mágica del lenguaje, el punto de vista de que existe una misteriosa conexión natural de algún tipo entre ciertas palabras (únicamente, desde luego, las palabras que les resultan familiares) y sus significados. La verdad es que únicamente obedece a un accidente histórico, en la evolución de nuestra cultura, el que la palabra “azul” venga a significar un determinado color. En Alemania a tal color se le llama “blau”, y en otros lenguajes se asocian a él otros sonidos. Para los niños es natural pensar que la *única* palabra “azul”, a la que están acostumbrados por su lengua materna, es la palabra natural, y que otras palabras para azul son completamente erradas o en realidad muy extrañas. A medida que crecen, se vuelven más tolerantes y dicen: “Otras personas podrán utilizar la palabra “blau”, pero la usan para una cosa que *en realidad* es azul.” Un niño pequeño piensa que una casa es una casa, y que una rosa es una rosa, y que eso es todo lo que hay. Después aprende que las extrañas personas en Francia a una casa la llaman “maison”. ¿Por qué dicen “maison” cuando se refieren a una casa? Se le dirá que en Francia la costumbre es decir “maison”. Los franceses la han venido diciendo por cientos de años, y no debe culparlos por ello o pensar que son estúpidos. Finalmente, el niño acepta todo esto. Las personas

---

<sup>9</sup> C. K. Ogden e I. A. Richards, *The Meaning of Meaning* (Londres: Kegan Paul, Trench, Trubner, 1923); (8va edición rev.; Nueva York: Harcourt, Brace, 1946); (Nueva York; Harvest Books, 1960).

extrañas tienen hábitos extraños. Dejémosles que usen la palabra “maison” para aquellas cosas que en realidad son casas. Escapar de esta actitud tolerante y adquirir el conocimiento de que no hay ninguna conexión esencial de ningún tipo entre una palabra y lo que queremos decir por ella parece ser igual de difícil para los adultos que para los niños. Claro está que nunca dicen abiertamente que la palabra en castellano es la palabra correcta, que las palabras de otros lenguajes son incorrectas, pero la perspectiva mágica de su infancia permanece implícita en su pensamiento e incluso a veces en sus observaciones.

Ogden y Richards citan un proverbio inglés: “Lo divino es así llamado con razón”. Esto aparentemente significa que lo divino es realmente divino; por lo tanto, justamente así llamado. Aunque uno podría tener la sensación de que algo es justamente así llamado, el proverbio, en realidad, no dice nada. Es evidentemente vacío. No obstante, las personas lo repiten con una gran emoción, pensando realmente que expresa algún tipo de profunda revelación sobre la naturaleza de lo divino.

Un ejemplo un tanto más sofisticado de la perspectiva mágica del lenguaje se encuentra en un libro escrito por Kurt Riezler, *Physics and Reality: Lectures of Aristotle on Modern Physics at an International Congress of Science, 679 Olympiad, Cambridge, 1940 A. D.*<sup>10</sup> El autor imagina que Aristóteles regresa a la Tierra en nuestro tiempo y presenta su punto de vista - que es también el punto de vista de Riezler y, pienso, sólo el punto de vista de Riezler - con respecto a la ciencia moderna.

Aristóteles comienza alabando la ciencia moderna. Está lleno de admiración por sus grandes logros. Después añade que, siendo honestos, también debe hacer unas cuantas observaciones críticas. Son estas observaciones las que nos interesan. En la página 70 del libro de Riezler, Aristóteles dice a los físicos reunidos:

El día es frío para un negro y caliente para un esquimal. Ustedes resuelven la controversia mediante la lectura de 50° en su termómetro.<sup>11</sup>

Lo que Riezler quiere decir aquí es que, en el lenguaje cualitativo de la vida cotidiana, no tenemos acuerdo alguno sobre palabras como “caliente” y “frío”. Si un esquimal de Groenlandia llega a un punto en donde la temperatura es de 50°, dirá: “Este es un día bastante caluroso.” Un negro proveniente de África, en el mismo punto, dirá:

---

<sup>10</sup> El libro de Kurt Riezler fue publicado en 1940 por Yale University Press, New Haven, quien concedió el permiso para citar directamente de este libro.

<sup>11</sup> Es obvio que Riezler se refiere a grados Fahrenheit, y no a grados Celsius. Nota del Traductor.

“Este es un día frío.” Estos dos hombres no estarán de acuerdo con los significados de “caliente” y “frío”. Riezler imagina a un físico que les dice: “Olvidémonos de las palabras y hablemos en términos de temperatura; después podemos llegar a un acuerdo. Estaremos de acuerdo en que la temperatura de hoy es de 50°.”

La cita continúa:

Ustedes están orgullosos de haber encontrado la verdad objetiva al haber eliminado...

Pido al lector que suponga qué es lo que Riezler piensa que han eliminado los físicos. Esperaríamos que la frase continuara así: “...al haber eliminado las palabras ‘caliente’ y ‘frío’”. Desde luego, el físico no las elimina de ningún lado excepto del lenguaje cuantitativo de la física. Aún querrá que aparezcan en el lenguaje cualitativo de la vida cotidiana. En realidad, incluso para un físico el lenguaje cualitativo es esencial, porque le ayuda a describir lo que ve. Pero Riezler no prosigue diciendo lo que esperamos. Su declaración continúa así:

...al haber eliminado tanto al negro como al esquimal.

Cuando leí por primera vez esto, pensé que estaba diciendo lo que antes supusimos de una manera un tanto distinta, y que quería decir que el físico elimina las formas de hablar del negro y del esquimal. Pero este no es el caso. Riezler quiere decir algo mucho más profundo. Más tarde, establece muy claramente que, desde su punto de vista, la ciencia moderna ha eliminado al hombre, ha olvidado y desatendido la parte más importante de todos los asuntos del conocimiento humano: al hombre mismo.

Ustedes están orgullosos de haber encontrado la verdad objetiva al haber eliminado tanto al negro como al esquimal. Concedo la importancia de lo que han conseguido. Concedo, también, que no habrían podido construir sus maravillosas máquinas sin haber eliminado al negro y al esquimal. Pero, ¿qué hay con la realidad y la verdad? Ustedes identifican la verdad con la certeza. Pero, obviamente, la verdad tiene que ver con el Ser o, si se prefiere, con algo llamado “realidad”. La verdad puede tener un alto grado de certeza, como la verdad matemática ciertamente lo tiene, y, no obstante, tener un bajo grado de “realidad”. ¿Qué hay con sus 50°? Ya que es verdad tanto para el negro como para el esquimal, ustedes la llaman realidad objetiva. Esta realidad suya me parece extremadamente pobre y exigua. No es más que una relación conectando una propiedad llamada temperatura con la expansión de su mercurio. Esta realidad no depende ni del negro ni del esquimal, y no está relacionada con nadie excepto con un observador anónimo.

Un poco más tarde, escribe:

Desde luego, ustedes son muy conscientes de que el calor y el frío describen 50° para el negro o el esquimal.

No estoy muy seguro de qué quiso decir aquí. Quizá quiso decir que, si el negro y el esquimal han de comprender qué se quiere decir con “50°”, debe explicárseles en términos de “caliente” y “frío”.

Ustedes dicen que el sistema bajo observación necesita ser ampliado para incluir los acontecimientos físicos que tienen lugar dentro del negro o del esquimal.

Esta está destinada a ser la respuesta del físico ante el ataque: “¿No omite usted las sensaciones de calor y frío que sienten el esquimal y el negro, respectivamente?” Riezler parece pensar que el físico respondería algo así: “No, no omitimos las sensaciones. También describimos al negro mismo, y al esquimal, como organismos. Los analizamos como sistemas físicos, fisiológicos y físicos. Descubrimos qué acontece dentro de ellos, y de esta forma podemos explicar por qué experimentan sensaciones distintas que los llevan a describir al mismo día como “caliente” y “frío”. El pasaje continúa:

Eso los confronta con dos sistemas en donde se revierte el gradiente de la temperatura: frío en un sistema y caluroso en otro. Pero este frío y este caliente no son aún frío y caliente. En sus sistemas, el negro y el esquimal están representados por un compuesto de acontecimientos físicos o químicos; ya no son seres por sí mismos, son lo que son relativamente al observador anónimo, un compuesto de acontecimientos descrito por las relaciones entre cantidades mensurables. Siento que el negro y el esquimal están representados, en su descripción, de una manera bastante pobre. Ustedes ponen la responsabilidad sobre las enormes complejidades supuestas en tal sistema.

Riezler se refiere aquí al sistema humano, al organismo total que, por supuesto, es enormemente complejo si uno lo analiza físicamente. Riezler continúa:

No, caballeros, ustedes hacen coordinar símbolos, pero nunca describen a lo frío como frío y a lo caliente como caliente.

Aquí hay, ¡por fin!, una ligera sospecha de la magia de las palabras. El físico coordina símbolos artificiales que en realidad no transmiten cualidades. Esto es desafortunado, porque el físico es incapaz de describir al frío como “frío”. Si lo llamase “frío”, nos transmitiría una sensación real, y todos tiritaríamos de sólo imaginar qué tan fría es. O quizá decir “Ayer fue un día terriblemente caluroso” nos daría una sensación real de calor. Esta es mi interpretación de lo que Riezler quiso decir. El lector es libre de hacer una interpretación más benevolente, si así lo desea.

Más adelante (en la página 72), hay otra interesante declaración hecha por el Aristóteles de Riezler:

Permítanme regresar a mi punto. La realidad es la realidad de las sustancias. Ustedes no conocen las sustancias detrás de los acontecimientos que su termómetro representa al indicar 50°. Pero sí saben cómo son el negro y el esquimal...

Riezler quiere decir que uno sabe cómo son el negro y el esquimal porque son humanos. Uno también es humano, así que comparte con ellos sensaciones comunes.

...pregúntenles, pregúntense ustedes mismos, pregunten por su dolor y alegría, por sus interpretaciones y por lo que son interpretados. Entonces sabrán qué significa la realidad. Ahí, las cosas son concretas. Ahí uno sabe que las cosas *son*.

La realidad *real*, según Riezler, sólo puede alcanzarse cuando uno habla de dolor y alegría, de lo caliente y de lo frío. Tan pronto como pasamos a los símbolos de la física, a la temperatura, etc., la realidad se disipa. Este es el juicio de Riezler. Estoy convencido de que no sería el juicio de Aristóteles. Aristóteles fue uno de los hombres más grandes en la historia del pensamiento, y en su tiempo tuvo un respeto supremo por la ciencia. Él mismo llevó a cabo observaciones empíricas y experimentos. Si hubiese podido observar el desarrollo de la ciencia desde sus días hasta los nuestros, estoy seguro de que sería un entusiasta de nuestra forma científica de pensar y hablar. En efecto, probablemente sería uno de los científicos más importantes de la actualidad. Pienso que Riezler comete una injusticia considerable en contra de Aristóteles al atribuirle estas opiniones.

Supongo que es posible que Riezler únicamente haya querido decir que la ciencia no debe poner su atención sobre los conceptos cuantitativos de una forma tal que descuide todos aquellos aspectos de la naturaleza que no encajen pulcramente en las

fórmulas con símbolos matemáticos. Si esto es todo lo que quiso decir, entonces por supuesto que estaríamos de acuerdo con él. Por ejemplo, en el campo de la estética, no ha habido mucho progreso en el desarrollo de conceptos cuantitativos. Pero siempre resulta difícil decir, de antemano, dónde resultaría útil introducir mediciones numéricas. Debemos dejar esto a los expertos en el campo. Si ven que de alguna manera podría ser útil, entonces introducirán mediciones numéricas. Nunca debemos desalentar tales esfuerzos antes de que hayan sido hechos. Claro está que si el lenguaje es empleado con fines estéticos - no como una investigación científica de la estética, sino para ofrecer placer estético -, entonces no hay duda sobre lo inadecuado que resultaría el uso de un lenguaje cuantitativo. Si queremos expresar nuestros sentimientos, por medio de una carta a un amigo o de un poema lírico, elegiremos, naturalmente, un lenguaje cualitativo, porque necesitamos palabras sumamente familiares, que evoquen, de manera inmediata, una variedad de significados y asociaciones.

También es verdad que a veces un científico llega a descuidar aspectos importantes incluso de los fenómenos con los que está trabajando. Pero esto es, a menudo, solamente una cuestión de división del trabajo. Un biólogo realiza todo su trabajo en un laboratorio. Estudia las células bajo un microscopio, hace análisis químicos, etc. Otro biólogo sale a la naturaleza, observa cómo crecen las plantas, bajo qué condiciones construyen sus nidos los pájaros, etc. Ambos hombres tienen intereses distintos, pero todo el conocimiento que adquieren es parte de la ciencia, y no debemos suponer que el trabajo del otro es inútil. Si la intención de Riezler es simplemente advertirnos de que la ciencia debe tener cuidado en no dejar fuera ciertas cosas, uno puede estar de acuerdo con él. Pero si quiso decir, como parece haber querido decir, que el lenguaje cuantitativo de la ciencia realmente omite ciertas cualidades, entonces pienso que está equivocado.

Permítanme citar un comentario del libro de Riezler, hecho por Ernest Nagel:<sup>12</sup> “Las teorías de la física no son sustitutos del Sol, ni de las estrellas, ni de las polifacéticas actividades de las cosas concretas. Pero, ¿por qué alguien razonablemente esperaría ser calentado por el discurso?”

Como ven, Nagel interpreta a Riezler de una manera menos caritativa de lo que yo lo hago. Quizá está en lo cierto, pero no estoy muy seguro. Nagel entiende a Riezler como criticando el lenguaje del físico por no transmitir directamente, en un sentido

---

<sup>12</sup> *Journal of Philosophy*, 37 (1940), 438-439.

fuerte, ciertas cualidades como los colores que, en realidad, están contenidas en una imagen a color. De la misma forma, podríamos transmitir información sobre los olores al rociar perfume (trayendo olores reales, y no sólo nombrándolos). Quizá Riezler quiso decir - Nagel así lo entiende - que el lenguaje debe transmitir cualidades en este sentido fuerte, que realmente debe traernos las cualidades. Parece pensar que de alguna manera una palabra como “frío” lleva consigo la cualidad real de frialdad. Un punto de vista así es ciertamente un ejemplo de la perspectiva mágica del lenguaje.

# Parte III

## LA ESTRUCTURA DEL ESPACIO

### CAPÍTULO 13

#### El postulado de las paralelas de Euclides

La naturaleza de la geometría en la física es un tema de gran importancia en la filosofía de la ciencia - un tema, por cierto, por el que tengo un interés especial -. Escribí mi tesis doctoral sobre este tema y, aunque he publicado poco desde entonces, es un asunto sobre el cual he seguido pensando mucho.

¿Por qué es tan importante? Antes que nada, porque conduce a un análisis del sistema espacio-temporal, la estructura básica de la física moderna. Por otra parte, la geometría matemática y la geometría física constituyen excelentes paradigmas de dos formas fundamentalmente distintas de obtener conocimiento: la apriorística y la empírica. Si comprendemos claramente la distinción entre estas dos geometrías, obtendremos información muy valiosa relativa a los importantes problemas metodológicos presentes en la teoría del conocimiento.

Consideremos, primero, la naturaleza de la geometría matemática. Todo mundo sabe que la geometría fue uno de los primeros sistemas matemáticos en ser desarrollados, aunque sepamos poco de sus orígenes. Lo sorprendente es que estuviese tan bien sistematizada en los tiempos de Euclides. El carácter axiomático de la geometría de Euclides - la derivación de teoremas a partir de axiomas y postulados fundamentales - constituye, por sí mismo, una contribución sumamente sofisticada, que todavía desempeña un papel fundamental en las formas más modernas de presentación de los sistemas matemáticos en su forma exacta. Resulta, pues, asombroso que este procedimiento ya haya sido seguido en los tiempos de Euclides.

Uno de los axiomas de Euclides, el axioma de las paralelas, supuso, por muchos siglos, una gran cantidad de problemas a los matemáticos. Podemos establecer este axioma como sigue: para cualquier plano sobre el cual haya una línea recta  $L$  y un punto  $P$  que no se encuentre sobre  $L$ , hay una y sólo una línea recta  $L'$ , sobre el plano, que

pasa por  $P$  y es paralela a  $L$ . (Dos líneas sobre un plano están definidas como paralelas si no tienen ningún punto en común.)

Este axioma parecía tan obvio que, hasta principios del último siglo, nadie cuestionaba su verdad. El debate en torno a él no era sobre su verdad, sino sobre si era necesario como un *axioma*, ya que parecía ser más simple que los otros axiomas euclidianos. Muchos matemáticos creían que podría ser un *teorema* a ser derivado de los otros axiomas.

Ante esto, se hicieron numerosos intentos para derivar el axioma de las paralelas de otros axiomas, e incluso algunos matemáticos afirmaron haber tenido éxito en esta empresa. Hoy sabemos que estaban equivocados. Pero en ese tiempo no resultaba fácil ver en dónde estaba la falla en cada una de estas supuestas derivaciones porque por lo general estaban basadas - como hoy lo siguen estando en muchos libros de texto de geometría - sobre una apelación a nuestras intuiciones. Supongamos que trazamos un diagrama. Ciertamente es que el diagrama es inexacto. No hay líneas perfectas - las líneas que trazamos tienen un grosor debido a la tiza en la pizarra o a la tinta sobre el papel -, pero el diagrama asiste nuestra imaginación. Nos ayuda a “ver” la verdad de lo que deseamos probar. La filosofía de este enfoque intuitivo fue sistematizada, en su mejor forma, por Immanuel Kant. No es nuestra impresión sensitiva del diagrama físico, sino nuestra intuición interna de las configuraciones geométricas, la que no puede estar equivocada. Kant fue muy claro en esto. Uno nunca puede estar seguro de que dos segmentos lineales sobre un pizarrón sean iguales, o de que una línea de tiza supuesta a ser un círculo sea realmente un círculo. Kant consideraba a tales diagramas únicamente como una ayuda psicológica secundaria. Pero pensaba que nuestro poder de imaginación - lo que llamó *Anschauung*, intuición - era impecable. Si claramente veíamos una verdad geométrica en nuestra mente, y no sólo con nuestros ojos, entonces la veíamos con total certeza.

¿Cómo abordaríamos, en condición de kantianos, la declaración de que dos líneas no pueden tener más de un punto en común? Imaginamos la situación en nuestra mente. Aquí hay dos líneas que se cruzan en un punto. ¿Cómo podría ser posible que se cruzasen en algún otro lugar? Obviamente no pueden, porque las líneas se alejan cada vez más a medida que nos apartamos del cruce. Parece bastante claro, por tanto, que dos líneas, o bien tienen todos sus puntos en común (en cuyo caso coincidirían para volverse una sola línea), o bien tienen, a lo mucho, un punto en común, o bien, posiblemente, ningún punto en común. Estas verdades simples de la geometría, dijo Kant, las *vemos*

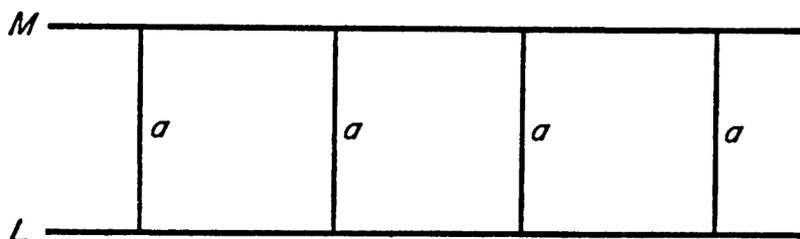
inmediatamente. Comprendemos su verdad de manera intuitiva. El hecho de que no tengamos que confiar en diagramas llevó a Kant a suponer que podemos tener una confianza absoluta en las verdades percibidas intuitivamente. Más tarde regresaremos a este punto de vista. Aquí lo mencionamos sólo para ayudar al lector a entender la forma en que los científicos, a comienzos del siglo XIX, pensaban la geometría. Incluso si nunca leyeron a Kant, tenían la misma perspectiva, ya sea que ésta hubiese derivado de Kant o solamente fuese parte de la atmósfera cultural que Kant hizo explícita. Eso no importa. Todo mundo asumía que eran verdades de la geometría claras, simples, básicas, que se encontraban más allá de toda duda. De estas verdades simples, los axiomas de la geometría, uno podría pasar, paso a paso, a ciertas verdades derivadas, los teoremas.

Como ya dijimos, algunos matemáticos creyeron poder derivar el axioma de las paralelas de los otros axiomas de Euclides. ¿Por qué las fallas en sus pruebas resultaban tan difíciles de detectar? La respuesta está en el hecho de que, en ese tiempo, no existía una lógica lo suficientemente poderosa que proporcionase reglas estrictamente lógicas para las pruebas geométricas. En algún lugar en la derivación se deslizaba una apelación a la intuición, a veces de manera muy explícita, otras de manera oculta. Solamente a partir de la segunda mitad del último siglo, después de haber desarrollado una lógica sistematizada, se contó con un método capaz de distinguir entre una derivación puramente lógica y una derivación que supusiese componentes no lógicos basados en la intuición. El hecho de que esta nueva lógica fuese formulada en símbolos aumentó su eficiencia, pero no era una condición absolutamente esencial. Lo que sí era esencial es que, primero, las reglas podían establecerse con una exactitud completa, y, segundo, que, a lo largo de toda la derivación, no se hacía ninguna declaración que no fuese obtenida de las premisas o de resultados previamente obtenidos a partir de la aplicación de las reglas lógicas de inferencia.

Antes del desarrollo de la lógica moderna, no existía sistema de lógica alguno que contase con un conjunto de reglas apropiadas para hacer frente a la geometría. La lógica tradicional trata únicamente con predicados de un lugar, pero en la geometría tratamos con relaciones entre muchos elementos. Un punto que yace sobre una línea o una línea que yace sobre un plano son ejemplos de relaciones de dos lugares; un punto que yace entre otros dos puntos supone una relación de tres lugares. Podríamos pensar en la congruencia entre dos segmentos lineales como una relación de dos lugares, pero, como no se acostumbra tomar a los segmentos lineales como entidades primitivas, un

segmento está mejor representado como un par de puntos. En este caso, la congruencia entre dos segmentos lineales es una relación entre un punto-par y otro punto-par; en otras palabras, es una relación de cuatro lugares entre puntos. Como ven, la geometría requiere de una lógica de relaciones, y esta lógica no existía en el tiempo que estamos considerando. Cuando estuvo disponible, se revelaron las fallas lógicas en varias de las supuestas pruebas del axioma de las paralelas. En algún punto de cada argumento se apelaba a una premisa que descansaba sobre la intuición, y que no podía derivarse, lógicamente, de los otros axiomas euclidianos. Esto podría haber resultado interesante, excepto por el hecho de que las premisas ocultas, intuitivas, resultaron ser, en cada caso, el propio axioma de las paralelas en forma encubierta.

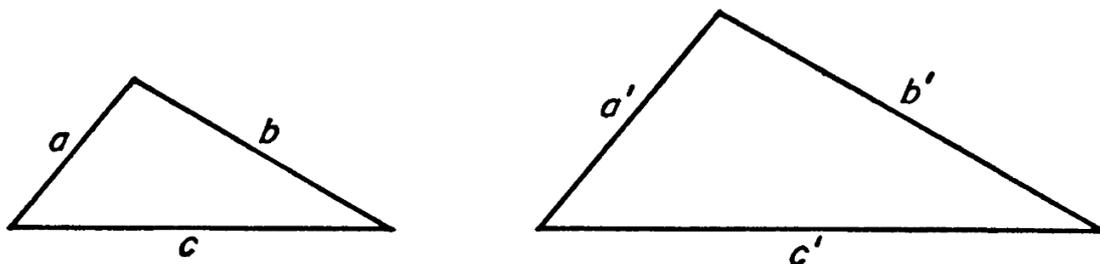
Un ejemplo de un axioma así encubierto, equivalente al axioma de las paralelas, es el siguiente: si en un plano hay una línea recta  $L$  y una curva  $M$ , y si todos los puntos de  $M$  están a la misma distancia de  $L$ , entonces  $M$  es también una línea recta. Esto se muestra en la figura 13-1, donde  $a$  es la distancia constante, desde  $L$ , de todos los puntos sobre  $M$ . Este axioma, que intuitivamente parece verdadero, a veces era tomado como un supuesto tácito en un intento de probar el axioma de las paralelas. Cuando esto se da por asumido, entonces el axioma de las paralelas puede ser, en efecto, probado. Desafortunadamente, la suposición, por sí misma, no puede ser demostrada a menos que asumamos la verdad del axioma de las paralelas o de algún otro axioma equivalente.



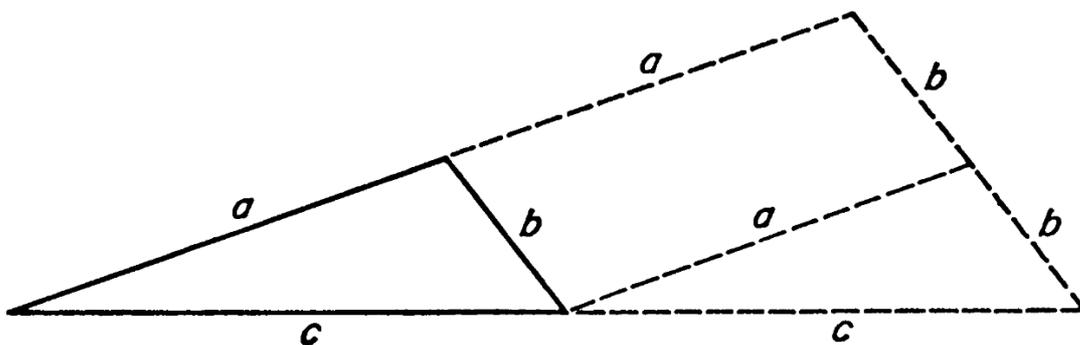
**Figura 13-1.**

Otro axioma equivalente al axioma de las paralelas, aunque quizá no tan intuitivamente obvio como el recién expuesto, es el supuesto de que las figuras geométricas de distintos tamaños pueden ser similares. De dos triángulos, por ejemplo, se dice que son similares si tienen ángulos iguales y lados en la misma proporción. En la figura 13-2 la proporción  $a : b$  es igual a la proporción  $a' : b'$ , y la proporción  $b : c$  es igual a la proporción  $b' : c'$ . Supongamos que primero trazamos solamente el triángulo más pequeño con lados  $a, b, c$ . ¿Existe un triángulo más grande con estos mismos ángulos y con lados  $a', b', c'$  que estén en la misma proporción que  $a, b, c$ ? Parece

evidente que la respuesta es sí. Supongamos que queremos construir el triángulo más grande de tal forma que sus lados sean exactamente lo doble de grandes que los lados del triángulo más pequeño. Esto lo podemos hacer fácilmente, tal como se muestra en la figura 13-3. Simplemente prolongamos el lado  $a$  con otro segmento de la misma longitud, hacemos lo mismo con el lado  $c$ , y después conectamos los puntos finales. Después de pensarlo un poco, parece muy claro que el tercer lado debe tener una longitud de  $2b$ , y que el triángulo grande será similar al pequeño. Si asumimos este axioma sobre triángulos similares, entonces podemos probar el axioma de las paralelas; pero, otra vez más, estamos asumiendo el axioma de las paralelas en forma encubierta. La verdad es que no podemos probar la similitud de los dos triángulos sin recurrir al axioma de las paralelas o a un axioma equivalente. Hacer uso del axioma sobre los triángulos, por lo tanto, equivale a hacer uso del axioma de las paralelas, el mismo axioma que estamos intentando establecer.



**Figura 13-2.**



**Figura 13-3.**

No fue hasta el siglo XIX que en realidad se mostró, a partir de un procedimiento lógicamente riguroso, que el axioma de las paralelas es independiente de los otros axiomas euclidianos. No puede derivarse de ellos. Las declaraciones negativas, tal como ésta, que afirma la imposibilidad de hacer algo, son, por lo general, mucho más difíciles de probar que las declaraciones positivas. Una declaración positiva que afirma

que esto o aquello *puede* derivarse de ciertas premisas se demuestra simplemente mostrando los pasos lógicos de la derivación. Pero, ¿cómo es posible probar que algo *no* es derivable? Si uno no puede derivarlo en cien intentos, puede ser que se rinda, pero eso no supone una prueba de imposibilidad. Bien puede ser que alguien más, quizá de alguna forma insospechada, indirecta, encuentre una derivación. No obstante que tan difícil fue, finalmente se obtuvo una prueba formal de la independencia del axioma de las paralelas.

Explorar las consecuencias de este descubrimiento resultó ser uno de los desarrollos más emocionantes de las matemáticas del siglo XIX. Si el axioma de las paralelas es independiente de los otros axiomas de Euclides, entonces puede sustituirse por él una declaración incompatible con tal axioma de las paralelas sin contradecir, lógicamente, los otros axiomas. Al probar distintas alternativas, se crearon nuevos sistemas axiomáticos, llamados geometrías no euclidianas. ¿Qué debía uno pensar de estos extraños nuevos sistemas, compuestos de teoremas tan contrarios a la intuición? ¿Debían ser considerados como poco más que un inofensivo juego lógico, un jugar con declaraciones para ver cómo éstas pueden ser combinadas sin inconsistencias lógicas? ¿O debían ser considerados como posiblemente “verdaderos”, en el sentido de que podrían aplicarse a la estructura del espacio mismo?

Esta última opción parecía tan absurda que, en aquel entonces, nadie siquiera soñó con plantear la cuestión. En efecto, en el momento en que algunos osados matemáticos comenzaron a estudiar los sistemas no euclidianos, dudaron seriamente en publicar sus investigaciones. Hoy en día uno podría reírse de esto, y preguntarse por qué podría surgir sentimiento alguno con la publicación de cualquier sistema matemático. Pero hoy en día adoptamos un enfoque puramente formalista con respecto a un sistema axiomático. No nos preguntamos por las interpretaciones o aplicaciones que pueda tener, sino sólo por si el sistema de axiomas es lógicamente consistente y por si una determinada declaración es derivable de él. Pero esta no era la actitud de la mayoría de los matemáticos en el siglo XIX. Para ellos, un “punto” en un sistema geométrico significaba una posición en el espacio de la naturaleza; una “línea recta” en el sistema significaba una línea recta en el sentido ordinario. La geometría no era vista como un ejercicio lógico, sino como una investigación del espacio que nos rodea, y no del espacio en el sentido abstracto al que se refieren los matemáticos de hoy cuando hablan de espacio topológico, espacio métrico, espacio de cinco dimensiones, etc.

Hasta donde se sabe, fue Carl Friedrich Gauss, uno de los más grandes matemáticos del siglo XIX - y quizá *el* más grande - el primero en descubrir un sistema geométrico consistente en donde el axioma de las paralelas fuese remplazado por un axioma inconsistente con él. Esto no lo sabemos por ninguna publicación suya, sino por una carta que escribió a un amigo. En esta carta, Gauss habla de haber estudiado tal sistema y de haber derivado algunos teoremas interesantes de él. Añade que no se ocupó de publicar tales resultados porque temía “la protesta de los beocios”. El lector quizá sabrá que, en la Grecia antigua, los beocios, habitantes de la provincia de Beocia, no eran muy bien considerados. Podemos traducir esta declaración a un idioma moderno y decir: “estos paletos se reirán y dirán que estoy loco”. Por “paletos” Gauss no se refería a las personas indoctas, sino a determinados matemáticos y filósofos. Sabía bien que ellos pensarían que estaba loco por haber tomado en serio una geometría no euclidiana.

Si renunciamos al axioma de las paralelas, ¿qué podemos poner en su lugar? La respuesta a esta pregunta, una de las cuestiones más importantes en la historia de la física moderna, será considerada en los capítulos 14 al 17.

# CAPÍTULO 14

## Geometrías no euclidianas

Al buscar un axioma que poner en lugar del axioma de las paralelas euclidianas, podemos movernos en dos direcciones opuestas:

(1) Podemos decir que hay *más de una* paralela. (Resulta que, si hay más de una, habrá un número infinito.)

(2) Podemos decir que sobre un plano, por un punto fuera de una línea, *no* hay paralela alguna. (Euclides había dicho que hay exactamente una.)

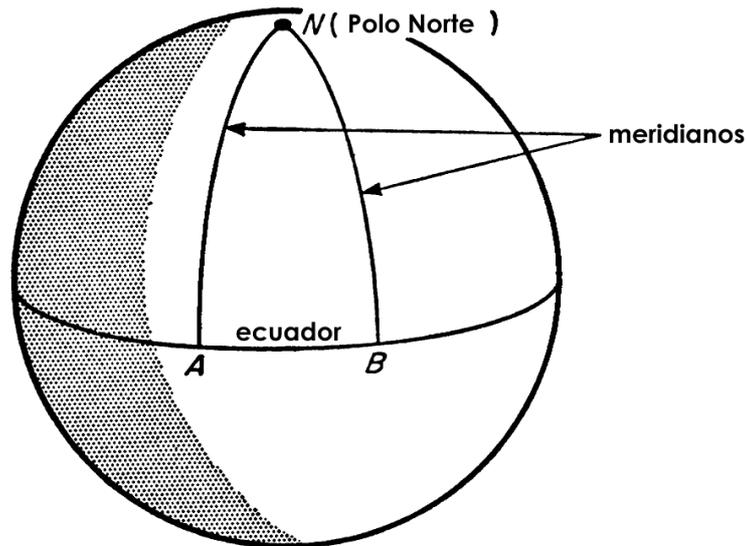
La primera de estas desviaciones fue explorada por el matemático ruso Nikolai Lobachevski; la segunda por el matemático alemán Georg Friedrich Riemann. En la tabla de la figura 14-1 he puesto las dos geometrías no euclidianas en lados opuestos a la euclidiana para enfatizar cómo es que se desvían de la estructura euclidiana en direcciones opuestas.

La geometría de Lobachevski fue descubierta de manera independiente y casi simultáneamente por Lobachevski, quien publicó su trabajo en 1835, y por el matemático húngaro Johann Bolyai, quien publicó sus resultados tres años antes. La geometría de Riemann no fue descubierta sino hasta aproximadamente veinte años después. Si el lector quiere profundizar en el tema de las geometrías no euclidianas, hay varios y buenos libros disponibles. Uno es *Non-Euclidean Geometry*, escrito por el matemático italiano Roberto Bonola. Contiene los dos artículos escritos por Bolyai y Lobachevski, y resulta interesante leerlos en su forma original. Pienso que el mejor libro que discute la geometría no euclidiana desde el punto de vista adoptado aquí, a saber, desde el punto de vista de su relevancia para la filosofía de la geometría y el espacio, es *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, de Hans Reichenbach, publicado en 1928. Si el lector está interesado en la perspectiva histórica, está el libro de Max Jammer, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics*. A veces las discusiones de Jammer son un tanto metafísicas, y no estoy seguro si esto se debe a sus propios puntos de vista o a los de los hombres que estudia. En cualquier caso, es uno de los pocos libros que se ocupa en detalle del desarrollo histórico de la filosofía del espacio.

tipo de geometría	número de paralelas	suma de los ángulos en el triángulo	razón de la circunferencia al diámetro del círculo	medida de la curvatura
Lobachevski	$\infty$	$< 180^\circ$	$> \pi$	$< 0$
Euclides	1	$180^\circ$	$\pi$	0
Riemann	0	$> 180^\circ$	$< \pi$	$> 0$

**Figura 14-1.**

Echemos un vistazo más de cerca a las dos geometrías no euclidianas. En la geometría de Lobachevski, técnicamente llamada geometría hiperbólica, hay un número infinito de paralelas. En la geometría de Riemann, conocida como geometría elíptica, no hay paralelas. ¿Cómo es posible una geometría que no contiene líneas paralelas? Podemos comprender esto girando nuestra atención hacia un modelo que no sea exactamente el modelo de una geometría elíptica, sino uno estrechamente relacionado con él: un modelo de geometría esférica. El modelo es simplemente la superficie de una esfera. Nosotros vemos esta superficie como análoga a un plano. Las líneas rectas sobre un plano están aquí representadas por los grandes círculos de la esfera. En términos más generales, decimos que, en cualquier geometría no euclidiana, las líneas que corresponden a líneas rectas en la geometría euclidiana son “líneas geodésicas”. Estas líneas comparten con las líneas rectas la propiedad de ser la distancia más corta entre dos puntos dados. En nuestro modelo, i. e., la superficie de la esfera, la distancia más corta entre dos puntos, i. e., la geodésica, es la porción de un gran círculo. Los grandes círculos son las curvas que se obtienen al cortar la esfera con un plano por el centro de la esfera. El ecuador y los meridianos de la Tierra son ejemplos familiares de esto.



**Figura 14-2.**

En la figura 14-2 están trazados dos meridianos perpendiculares al ecuador. En la geometría euclidiana, esperaríamos que dos líneas perpendiculares a una línea dada sean paralelas, pero en la esfera estas líneas coinciden tanto en el Polo Norte como en el Polo Sur. Sobre la esfera, no hay dos líneas rectas, o, mejor dicho, líneas cuasirectas, i. e., grandes círculos, que no coincidan. Así pues, aquí tenemos un modelo fácilmente imaginable de una geometría en donde no hay líneas paralelas.

Las dos geometrías no euclidianas también pueden distinguirse por la suma de los ángulos de un triángulo. Esta distinción es importante desde el punto de vista de las investigaciones empíricas sobre la estructura del espacio. Gauss fue el primero en ver claramente que únicamente una investigación empírica del espacio puede revelar la naturaleza de la geometría que mejor lo describe. Una vez conscientes de que las geometrías no euclidianas pueden ser lógicamente consistentes, ya no podemos decir, sin realizar pruebas empíricas, qué geometría tiene la naturaleza. A pesar del prejuicio kantiano prevaleciente en su tiempo, Gauss pudo llevar a cabo un experimento de este tipo.

Es fácil ver que hacer pruebas con triángulos es mucho más sencillo que hacer pruebas con líneas paralelas. Las líneas pensadas como paralelas pueden no coincidir hasta que hayan sido prolongadas millones de kilómetros, pero la medición de los ángulos de un triángulo puede llevarse a cabo en una pequeña región del espacio. En la geometría euclidiana la suma de los ángulos de cualquier triángulo es igual a dos ángulos rectos, o  $180^\circ$ . En la geometría hiperbólica de Lobachevski, la suma de los

ángulos de cualquier triángulo es menor que  $180^\circ$ . En la geometría elíptica riemanniana, la suma es mayor que  $180^\circ$ .

La desviación de  $180^\circ$ , en la geometría elíptica, puede ser fácilmente comprendida con la ayuda de nuestro modelo, la superficie de una esfera. Consideremos el triángulo NAB de la figura 14-2. Está formado por segmentos de los dos meridianos y del ecuador. Los dos ángulos en el ecuador son de  $90^\circ$ , así que ya tenemos un total de  $180^\circ$ . Añadir el ángulo del Polo Norte resultaría en una suma de más de  $180$ . Si movemos los meridianos hasta que se crucen entre sí en ángulos rectos, cada ángulo del triángulo será un ángulo recto, y la suma de los tres será  $270^\circ$ .

Sabemos que Gauss pensó en hacer una prueba de la suma de los ángulos de un enorme triángulo estelar, y existen reportes de que en realidad llevó a cabo una prueba similar, sobre una escala terrestre, al haber triangulado las tres cimas de unas montañas en Alemania. Gauss era profesor en Göttingen, así que se dice que eligió una colina cerca de la ciudad y las dos cimas de montañas que pudiesen ser vistas desde la cima de esta colina. Ya había hecho importantes trabajos en la aplicación de la teoría de la probabilidad a los errores de medición, y esto suponía una oportunidad para hacer uso de tales procedimientos. El primer paso habría sido medir los ángulos ópticamente desde cada cumbre, repitiendo la medición muchas veces. Al tomar la media de estos resultados de observación, y bajo ciertas restricciones, pudo determinar el tamaño más probable de cada ángulo y, por tanto, el valor más probable de su suma. De la dispersión de los resultados, pudo entonces calcular el error probable, esto es, un cierto intervalo alrededor de la media tal que la probabilidad de que el valor real yaciendo dentro del intervalo fuese igual a la probabilidad de que yazca fuera del intervalo. Se dice que Gauss hizo esto, y que descubrió que la suma de los tres ángulos no era exactamente  $180^\circ$ , sino que se desviaba por una cantidad tan pequeña que se encontraba dentro del intervalo del error probable. Un resultado así indicaría, o bien que el espacio es euclidiano, o bien que, si es no euclidiano, su desviación es extremadamente pequeña, menor que el error probable de las mediciones.

Incluso si Gauss realmente nunca hizo esta prueba, como se ha sostenido recientemente, la leyenda, por sí misma, es un hito muy importante en la historia de la metodología científica. Gauss fue ciertamente el primero en plantear una pregunta revolucionaria: ¿qué encontraríamos si hiciésemos una investigación empírica sobre la estructura geométrica del espacio? Nadie más había pensado en hacer una investigación de este tipo. En realidad, se pensaba que era absurdo, como intentar encontrar, por

medios empíricos, el producto de siete y ocho. Imaginemos que tenemos siete canastas, cada una conteniendo ocho pelotas. Contamos muchas veces todas las pelotas, y la mayor parte del tiempo tenemos que son 56, pero ocasionalmente tenemos que son 57 o 55. Tomamos la media de estos resultados para descubrir el valor real de siete veces ocho. El matemático francés P. E. B. Jourdain sugirió alguna vez, en tono de broma, que la mejor forma de hacer esto no sería si uno llevase a cabo la cuenta, porque uno no es experto contando. Los expertos son los jefes de camareros, que constantemente están sumando y multiplicando números. Deben traerse a los jefes de camareros con más experiencia y preguntarles cuánto es siete veces ocho. En sus respuestas, uno no esperaría mucha desviación, pero si se recurre a números grandes, digamos, 23 veces 27, entonces habría alguna dispersión. Tomamos la media de todas sus respuestas, ponderadas de acuerdo con el número de camareros que dieron cada respuesta, y, sobre esta base, obtenemos una estimación científica del producto de 23 y 27.

Cualquier intento por investigar empíricamente un teorema geométrico parecía tan absurdo a los contemporáneos de Gauss como este ejemplo. Veían la geometría de la misma forma que veían la aritmética. Creían, junto con Kant, que nuestra intuición no comete errores geométricos. Cuando “vemos” algo en nuestra imaginación, este algo no puede ser de otra forma. Que alguien midiera los ángulos de un triángulo - no sólo por diversión o para probar la calidad de instrumentos ópticos, sino para encontrar el valor real de su suma - parecía completamente absurdo. Todo mundo podía ver, después de haberse entrenado un poco en geometría euclidiana, que la suma *debe* ser  $180^\circ$ . Es por esta razón, se dice, que Gauss no publicó el hecho de que llevó a cabo tal experimento, y que incluso consideró que no valía la pena llevarlo a cabo. Sin embargo, y como consecuencia de la continua especulación sobre las geometrías no euclidianas, muchos matemáticos comenzaron a darse cuenta de que estas nuevas y extrañas geometrías planteaban un genuino problema empírico. Gauss no encontró una respuesta concluyente, pero proporcionó una fuerte estimulación para pensar, en una forma no kantiana, en el problema de la estructura del espacio en la naturaleza.

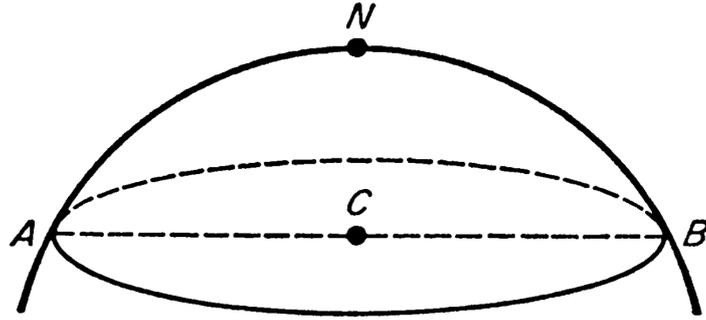
Para ver de manera más clara cómo es que las diversas geometrías no euclidianas difieren entre sí, consideremos de nuevo la superficie de una esfera. Como ya vimos, este es un modelo conveniente que nos ayuda a comprender, intuitivamente, la estructura geométrica de un plano en el espacio riemanniano. (Aquí, espacio riemanniano significa espacio elíptico. El término “espacio riemanniano” también posee un significado más general que será clarificado más adelante.)

Debemos tener cuidado en no extender la analogía entre el plano riemanniano y la superficie de la esfera, porque cualesquiera dos líneas rectas sobre un plano en el espacio riemanniano tienen sólo un punto en común, mientras que las líneas que corresponden a líneas rectas sobre una esfera - los grandes círculos - siempre coinciden en *dos* puntos. Consideremos, por ejemplo, dos meridianos. Ambos coinciden tanto en el Polo Norte como en el Polo Sur. Estrictamente hablando, nuestro modelo corresponde al plano riemanniano únicamente si nos limitamos a una porción de la superficie de la esfera que no contenga puntos opuestos, como los polos Norte y Sur. Si nuestro modelo es toda la esfera, debemos asumir que cada punto sobre el plano riemanniano está representado sobre la superficie de la esfera por un par de puntos opuestos. Comenzar desde el Polo Norte y viajar al Polo Sur correspondería a comenzar desde un punto sobre el plano riemanniano, viajar en una línea recta sobre tal plano, y regresar al mismo punto. Todas las líneas geodésicas en el espacio riemanniano tienen la misma longitud finita y son cerradas, como la circunferencia de un círculo. La desviación extrema de este hecho de nuestra intuición es probablemente la razón por la cual este tipo de geometría fue descubierto después que la geometría de Lobachevski.

Con la ayuda de nuestro modelo esférico, fácilmente podemos ver que, en el espacio riemanniano, la proporción de la circunferencia de un círculo a su diámetro es siempre menor que  $\pi$ . La figura 14-3 muestra un círculo sobre la Tierra que tiene al Polo Norte como su centro. Esto corresponde a un círculo en el plano riemanniano. Su radio no es la línea  $CB$ , porque ésta no se encuentra sobre la superficie de la esfera, que es nuestro modelo. El radio es el arco  $NB$ , y el diámetro es el arco  $ANB$ . Sabemos que la circunferencia de este círculo tiene la proporción de  $\pi$  al segmento lineal  $ACB$ . Como el arco  $ANB$  es mayor que el segmento  $ACB$ , es claro que la proporción del perímetro [circunferencia]<sup>13</sup> del círculo a  $ANB$  (el diámetro del círculo en el plano riemanniano) debe ser menor que  $\pi$ .

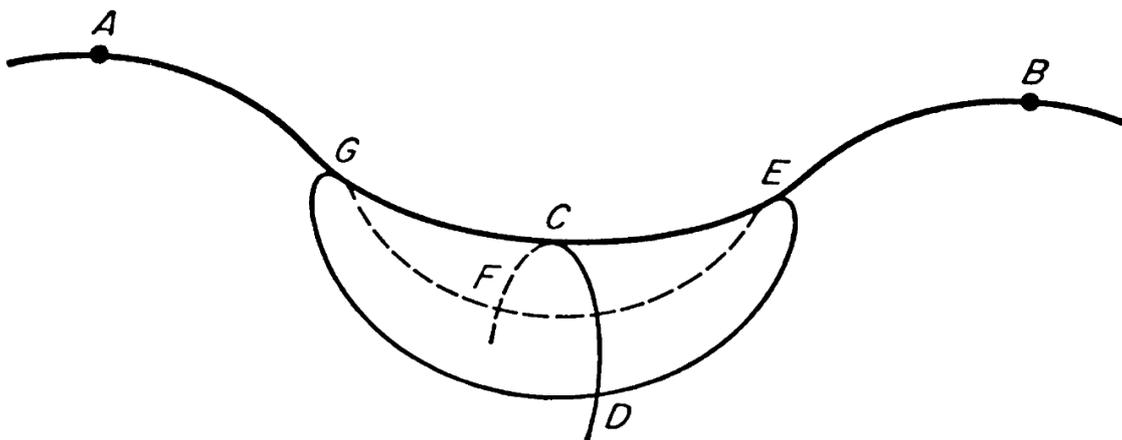
---

<sup>13</sup> La palabra entre paréntesis es mía. Nota del Traductor.



**Figura 14-3.**

No resulta fácil ver que en el espacio de Lobachevski sucede justamente lo contrario: la proporción de la circunferencia de un círculo a su diámetro debe ser mayor que  $\pi$ . Quizá podamos visualizar esto con la ayuda de otro modelo. Este modelo (mostrado en la figura 14-4) no puede utilizarse para todo el plano lobachevskiano - ciertamente no puede utilizarse para el espacio tridimensional de Lobachevski -, pero sí puede utilizarse para una porción limitada del plano lobachevskiano. El modelo es una superficie en forma de silla de montar parecido al paso entre dos montañas. A es la cima de una montaña, C es el paso, y B es la cima de la otra montaña. Intentemos visualizar esta superficie. Hay una curva, quizá un camino, que pasa por el punto F al otro extremo del paso, levantándose sobre el paso por el punto C, y después bajando en el lado cercano del paso por el punto D. La porción con forma de silla de montar de esta superficie, incluyendo los puntos C, D, E, F, G, puede ser considerada como el modelo de una estructura en un plano lobachevskiano.

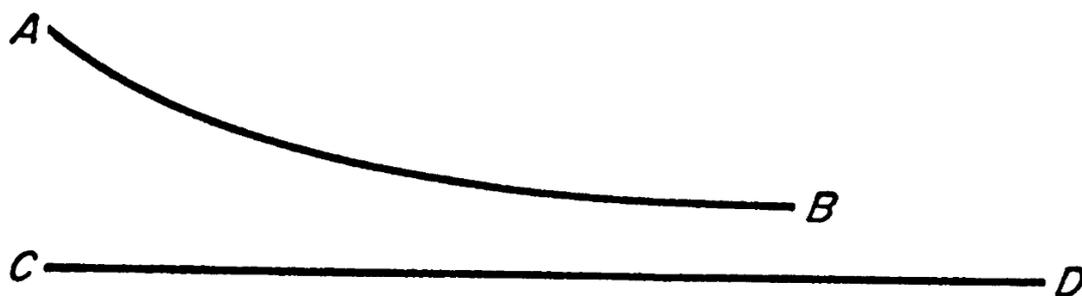


**Figura 14-4.**

¿Qué forma tiene un círculo en este modelo? Asumamos que el centro del círculo se encuentra en C. La línea curva *DEFGD* representa la circunferencia de un círculo que se encuentra, en todos los puntos, a la misma distancia desde el centro C. Si

uno se sitúa en el punto  $D$ , se encontrará más abajo que en el centro del círculo; si camina por el círculo hasta el punto  $E$ , se encontrará más arriba que en el centro. No es difícil ver que esta línea ondulada, que corresponde a un círculo en el plano lobachevskiano, debe ser mayor que un círculo ordinario sobre un plano euclidiano que tenga como su radio a  $CD$ . Debido a que es mayor, la proporción de la circunferencia de este círculo a su diámetro (el arco  $FCD$  o el arco  $GCE$ ) debe ser mayor que  $\pi$ .

Es posible construir un modelo más exacto, que corresponda exactamente en todas sus mediciones con una parte de un plano de Lobachevski, al considerar una cierta curva, llamada tratriz (el arco  $AB$  en la figura 14-5), haciéndola rotar alrededor del eje  $CD$ . A la superficie generada por esta rotación se le conoce como pseudoesfera. Quizá el lector haya visto el modelo, en yeso de París, de esta superficie. Si uno estudia tal modelo, puede ver que los triángulos sobre su superficie tienen tres ángulos cuya suma total es menor que  $180^\circ$ , y que los círculos tienen una proporción, de la circunferencia al diámetro, mayor que  $\pi$ . Mientras mayor sea el círculo sobre tal superficie, mayor será la desviación de la proporción de  $\pi$ . No debemos pensar que esto significa que  $\pi$  no es una constante.  $\pi$  es la proporción de la circunferencia de un círculo, en un plano euclidiano, a su diámetro. Este hecho no se ve alterado por la existencia de geometrías no euclidianas, en donde la proporción de la circunferencia de un círculo a su diámetro es una variable que puede ser mayor o menor que  $\pi$ .



**Figura 14-5.**

Todas las superficies, tanto euclidianas como no euclidianas, tienen, en cualquiera de sus puntos, una medida llamada “medida de curvatura” de tal superficie en tal punto. La geometría de Lobachevski está caracterizada por el hecho de que, en cualquier plano y en cualquier punto, la medida de curvatura del plano es negativa y constante. Existe un número infinito de distintas geometrías de Lobachevski, y cada una está caracterizada por un determinado parámetro fijo - un número negativo - que es la medida de curvatura de un plano en tal geometría.

Uno podría objetar que, si es un plano, entonces no puede tener una curvatura. Pero “curvatura” es un término técnico, y aquí no debe entenderse en un sentido ordinario. En la geometría euclidiana, medimos la curvatura de una línea, en cualquier punto, al considerar el recíproco de su “radio de curvatura”. “Radio de curvatura” significa el radio de un cierto círculo que coincide, por así decirlo, con una parte infinitesimal de la línea en el punto en cuestión. Si una línea curva es casi recta, entonces el radio de curvatura es largo. Si la línea es muy curva, el radio de curvatura es corto.

¿Cómo medimos la curvatura de una superficie en un punto dado? Primero medimos la curvatura de dos geodésicas que se intersectan en ese punto y se extienden en dos direcciones, llamadas las “direcciones principales” de la superficie en dicho punto. Una dirección da la curvatura máxima de una geodésica en ese punto, y la otra da la curvatura mínima. Después definimos la curvatura de la superficie en ese punto como el producto de los dos recíprocos de los dos radios de la curvatura de ambas geodésicas. Por ejemplo, consideremos el paso de montaña mostrado en la figura 14-4. ¿Cómo medimos la curvatura de esta superficie en el punto  $C$ ? Vemos que una geodésica, el arco  $GCE$ , curva de una manera cóncava (mirando hacia abajo en la superficie), mientras que la geodésica que se encuentra en ángulos rectos hacia aquella, el arco  $FCD$ , curva de una manera convexa. Estas dos geodésicas dan las curvaturas máxima y mínima de la superficie en el punto  $C$ . Claro está que, si miramos hacia *arriba* esta superficie desde la parte inferior, el arco  $GCE$  parece convexo y el arco  $FCD$  parece cóncavo. No importa, en absoluto, desde qué lado veamos la superficie, qué curva queramos considerar convexa y cuál cóncava. Por convención, llamamos a un lado positivo y al otro negativo. El producto de los recíprocos de estos dos radios,  $\frac{1}{R_1 R_2}$ , nos da la medida de la curvatura de la superficie de silla de montar en el punto  $C$ . En cualquier punto sobre la superficie de silla de montar, uno de los radios de la curvatura será positivo, y el otro será negativo. El producto de los dos recíprocos de tales radios y, consecuentemente, la medida de la curvatura de la superficie, debe ser, por tanto, siempre negativo.

Este no es el caso con respecto a una superficie que sea completamente convexa, como la de una esfera o la de un huevo. En una superficie así, ambas geodésicas, en las dos direcciones principales, curvan de la misma forma. Una geodésica podrá curvar más fuerte que la otra, pero ambas curvan de la misma manera. De nuevo, no importa si

vemos a esta superficie desde un lado y llamamos positivos a los dos radios de la curvatura, o si la vemos del otro lado y los llamamos negativos. El producto de sus recíprocos siempre será positivo. Por consiguiente, sobre cualquier superficie convexa tal como la de una esfera, la medida de la curvatura, en cualquier punto, será positiva.

La geometría lobachevskiana, representada por el modelo de superficie en forma de silla de montar, puede ser caracterizada como sigue: para cualquier espacio lobachevskiano hay un determinado valor negativo que es la medida de la curvatura para cualquier punto en cualquier plano de tal espacio. La geometría riemanniana, representada por la superficie esférica, puede ser caracterizada similarmente: para cualquier espacio riemanniano hay un determinado valor positivo que es la medida de la curvatura para cualquier punto en cualquier plano de tal espacio. Ambos son espacios de curvatura constante. Esto significa que, para cualquiera de tales espacios, la medida de la curvatura, en cualquier punto y en cualquier plano, es la misma.

Sea  $k$  la medida de curvatura. En el espacio euclidiano, que también tiene una curvatura constante,  $k = 0$ . En el espacio lobachevskiano,  $k < 0$ , y en el espacio riemanniano,  $k > 0$ . Estos valores numéricos no están determinados por los axiomas de la geometría. Es posible obtener distintos espacios riemannianos al elegir distintos valores positivos para  $k$ , así como distintos espacios lobachevskianos al elegir distintos valores negativos para  $k$ . Fuera del valor del parámetro  $k$ , todos los teoremas son completamente iguales en todos los espacios lobachevskianos, y completamente iguales en todos los espacios riemannianos. Desde luego, los teoremas de cada una de estas geometrías son muy distintos entre sí.

Es importante tener en cuenta que “curvatura”, en su sentido original y literal, aplica sólo a superficies de *modelo euclidiano* en los planos no euclidianos. La esfera y la pseudoesfera son superficies curvas en este sentido. Pero el término “medida de curvatura”, aplicado a planos no euclidianos, no significa que estos planos “curven” en el sentido ordinario. El generalizar el término “curvatura”, de manera que aplique a planos no euclidianos, se justifica porque la estructura geométrica interna de un plano riemanniano es la misma que la estructura de la superficie de una esfera euclidiana; lo mismo es cierto para la estructura del plano en el espacio lobachevskiano y de la superficie de una pseudoesfera euclidiana. Es común que los científicos tomen un término viejo y le den un significado más general. Esto no causó dificultad alguna durante el siglo XIX, porque las geometrías no euclidianas sólo eran estudiadas por matemáticos. El problema comenzó cuando Einstein recurrió a la geometría no

euclidiana para su teoría de la relatividad general. Esto llevó el tema fuera del campo de las matemáticas puras y dentro del campo de la física, donde se convirtió en una descripción del mundo real. La gente quería comprender qué es lo que estaba haciendo Einstein, así que se escribieron muchos libros que explicaban esto a los legos. En estos libros, los autores solían discutir “planos curvos” y “espacio curvo”. Esta era una forma de hablar muy lamentable y engañosa. En efecto, tendrían que haber dicho: “Hay una cierta medida  $k$  - que los matemáticos llaman “medida de curvatura”, aunque no tenemos que prestar atención a esto -, y esta  $k$  es positiva dentro del Sol pero negativa en el campo gravitacional del Sol. A medida que nos alejamos del Sol, el valor negativo de  $k$  se aproxima a cero.”

En lugar de ponerlo de esta forma, estos autores populares dijeron que Einstein había descubierto que los planos en nuestro espacio son curvos. Esto únicamente causaba confusión en los legos. Los lectores se preguntaban qué quiere decir que los planos sean curvos. Si son curvos, pensaban, ¿entonces no deberían llamarse planos! Esta forma de hablar sobre el espacio curvo llevó a la gente a creer que todo en el espacio está distorsionado, o doblado. A veces los autores de estos libros incluso hablaban de cómo la fuerza gravitacional doblaba los planos. Lo describían con verdadero sentimiento, como si fuese análogo a alguien que dobla una lámina de metal. Este tipo de pensamiento condujo a consecuencias extrañas, y algunos autores objetaron la teoría de Einstein sobre tales bases. Todo esto se podría haber evitado si no se hubiese hecho uso del término “curvatura”.

Por otra parte, en las matemáticas no resulta fácil introducir un término completamente distinto en lugar de otro ya en un uso habitual. El mejor procedimiento, por tanto, es aceptar el término “curvatura” como un término técnico pero comprendiendo claramente que este término no debe conectarse con asociaciones viejas. No pensemos en un plano no euclidiano como “doblado” en una forma que ya no es un plano. No tiene la estructura interna de un plano euclidiano, pero es un plano en el sentido de que la estructura sobre un lado de él es exactamente como la estructura del otro lado. Es aquí donde vemos el peligro de decir que la esfera euclidiana es un modelo del plano riemanniano, porque, si uno piensa en una esfera, uno piensa que su interior es muy distinto de su exterior. Desde el interior, la superficie parece cóncava; desde el exterior, convexa. Pero esto no es cierto del plano, ni en el espacio de Lobachevski, ni en el de Riemann. En ambos espacios los dos lados del plano son idénticos. Si nos vamos a un lado del plano, no observamos nada distinto de lo que observamos si nos

vamos al otro lado del plano. Pero la estructura interna del plano es de tal forma que podemos medir, con la ayuda del parámetro  $k$ , su grado de “curvatura”. Debemos recordar que ésta es una curvatura en un sentido técnico, y no es la misma que nuestra comprensión intuitiva de curvatura en el espacio euclidiano.

Otra confusión terminológica, fácil de aclarar, tiene que ver con los dos significados de “geometría riemanniana” (ya aludimos a ellos antes en este capítulo). Cuando Riemann ideó por primera vez su geometría de curvatura positiva constante, fue llamada riemanniana para distinguirla del espacio de Lobachevski, en donde la curvatura constante es negativa. Más tarde, Riemann desarrolló una teoría de espacios generalizada con curvatura variable, espacios que no se han tratado axiomáticamente. (Las formas axiomáticas de la geometría no euclidiana, en donde han sido retenidos todos los axiomas euclidianos excepto el axioma de las paralelas [reemplazado por un nuevo axioma], están confinadas a espacios de curvatura constante.) En la teoría general de Riemann, puede considerarse cualquier número de dimensiones y, en todos los casos, la curvatura puede variar continuamente de punto a punto.

Cuando los físicos hablan de “geometría riemanniana”, se refieren a la geometría generalizada en donde las viejas geometrías riemanniana y lobachevskiana (hoy llamadas geometrías elíptica e hiperbólica, respectivamente), junto con la geometría euclidiana, constituyen los casos especiales más simples. Además de estos casos especiales, la geometría riemanniana generalizada contiene una gran variedad de espacios con curvatura variable. Entre estos espacios está el espacio adoptado por Einstein para su teoría de la relatividad general.

## CAPÍTULO 15

### Poincaré versus Einstein

Henri Poincaré, un célebre matemático y físico francés, autor de muchos libros sobre filosofía de la ciencia - la mayoría de ellos antes del tiempo de Einstein -, dedicó mucha de su atención al problema de la estructura geométrica del espacio. Una de sus ideas resulta tan esencial para la comprensión de la física moderna que vale la pena discutirla en detalle.<sup>14</sup>

Supongamos, escribió Poincaré, que los físicos descubren que la estructura del espacio real se desvía de la geometría euclidiana. Entonces los físicos tendrían que elegir entre dos alternativas. O bien podrían aceptar la geometría no euclidiana como una descripción del espacio físico, o bien preservar la geometría euclidiana al adoptar nuevas leyes que establezcan que todos los cuerpos sólidos experimentan ciertas contracciones y expansiones. Como ya vimos en capítulos anteriores, para poder hacer mediciones precisas con la ayuda de una varilla de acero debemos hacer correcciones que den cuenta de las expansiones o contracciones térmicas de la varilla. Similarmente, dijo Poincaré, si las observaciones sugieren que el espacio es no euclidiano, los físicos podrían retener el espacio euclidiano adoptando, en sus teorías, nuevas fuerzas (fuerzas que, bajo condiciones específicas, harían que los cuerpos sólidos se expandan o contraigan).

También tendrían que introducirse nuevas leyes en el campo de la óptica, porque también podemos estudiar la geometría física por medio de los rayos de luz. Estos rayos se asume que son líneas rectas. El lector recordará que los tres lados del triángulo de Gauss, que tenía montañas como vértices, no consistían en barras sólidas - porque las distancias eran muy grandes -, sino en rayos de luz. Supongamos, dijo Poincaré, que la suma de los ángulos de un triángulo grande de este tipo se desviara de  $180^\circ$ . En lugar de abandonar la geometría euclidiana, podríamos decir que la desviación se debe a una flexión de los rayos de luz. Si introducimos nuevas leyes para la desviación de los rayos de luz, siempre podemos hacerlo de tal forma que conservemos la geometría euclidiana.

---

<sup>14</sup> El punto de vista de Poincaré sobre esta cuestión está expuesto, en su manera más explícita, en su *Ciencia e Hipótesis* (Londres: 1905); (Nueva York: Dover, 1952).

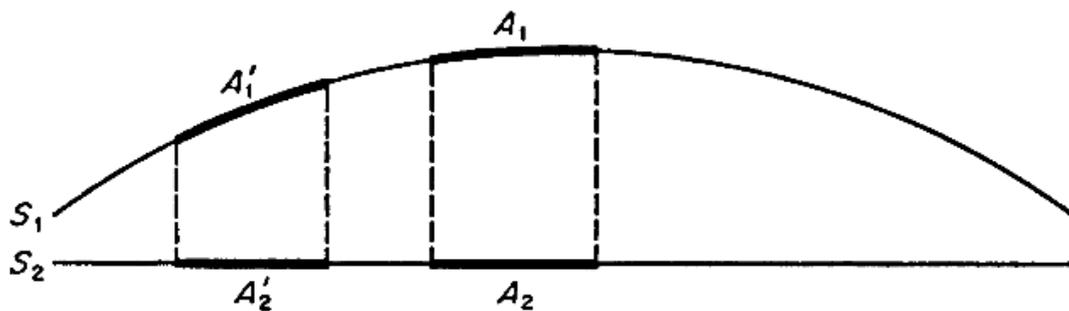
Esta fue una revelación extremadamente importante, y más tarde intentaré explicar qué es lo que Poincaré quiso decir con ella y cómo puede justificarse. Además de esta visión de gran alcance, Poincaré predijo que los físicos siempre elegirían la segunda opción. Preferirán, afirmó, conservar la geometría euclidiana, porque es mucho más simple que la no euclidiana. Desde luego, no conocía el complejo espacio no euclidiano que Einstein estaba por proponer. Probablemente sólo pensó en los espacios no euclidianos de curvatura constante más simples; de otra forma, sin duda habría pensado como *menos* probable que los físicos abandonaran a Euclides. Realizar unas cuantas alteraciones en las leyes que se refieren a los cuerpos sólidos y a los rayos de luz parecía estar, para Poincaré, justificado, porque eso permitiría conservar el sistema de Euclides, que resulta más simple. Irónicamente, fue sólo unos pocos años después, en 1915, que Einstein desarrolló su teoría de la relatividad general, en donde se adoptó una geometría no euclidiana.

Es importante entender el punto de vista de Poincaré, porque eso nos permitirá comprender las razones de Einstein para abandonarlo. Intentaré aclararlo de una manera intuitiva, y no por medio de cálculos y fórmulas, para así poder visualizarlo. Para esto, emplearemos un recurso utilizado por Hermann von Helmholtz, el gran físico alemán, muchas décadas antes de que Poincaré escribiera sobre el tema. Helmholtz quería mostrar que Gauss estaba en lo cierto al considerar la estructura geométrica del espacio como un problema empírico. Imaginemos, dijo, un mundo bidimensional en donde seres bidimensionales se pasean sobre él y se topan con objetos. Estos seres y todos los objetos en su mundo son completamente planos, como las criaturas bidimensionales de la divertida fantasía de Edwin A. Abbott, *Flatland*. Estos seres no viven sobre un plano, sino sobre la superficie de una esfera. La esfera es gigantesca en relación con su tamaño; son del tamaño de hormigas, y la esfera es tan grande como la Tierra. Es tan grande que nunca alcanzan a recorrerla toda. En otras palabras, sus movimientos están confinados a un dominio limitado sobre la superficie de la esfera. La cuestión es, ¿es posible para estas criaturas descubrir, al llevar a cabo mediciones internas sobre su superficie bidimensional, si se encuentran sobre un plano o sobre una esfera, o sobre cualquier otro tipo de superficie?

Helmholtz respondió que sí pueden. Podrían trazar un triángulo muy grande y medir sus ángulos. Si la suma de los ángulos fuese mayor a  $180^\circ$ , sabrían que se encuentran sobre una superficie con curvatura constante; si encontraran la misma curvatura constante en cada punto sobre su continente, sabrían que se encuentran sobre

la superficie de una esfera o de la parte de una esfera (si la esfera es completa o no es otra cuestión). La hipótesis de que todo su universo es una superficie esférica sería razonable. Claro está que nosotros podemos ver, de un vistazo, que estamos sobre una superficie así porque somos criaturas tridimensionales que destacan fuera de ella. Pero Helmholtz dejó muy en claro que las criaturas bidimensionales, al medir los ángulos de un triángulo o la proporción del círculo a su diámetro (u otras cantidades), podrían calcular la medida de curvatura en cada lugar sobre su superficie. Gauss estaba, pues, en lo correcto al pensar que podía determinar si nuestro espacio tridimensional tiene una curvatura positiva o negativa al hacer mediciones. Si imaginamos nuestro espacio incrustado en un universo de dimensiones superiores, podemos hablar de una curva real o curvatura de nuestro espacio, porque parecería curvo para criaturas de cuatro dimensiones.

Debemos examinar esto un poco más de cerca. Supongamos que las criaturas bidimensionales descubren que, cuando miden triángulos con sus varas de medir, en cada punto sobre su continente hay la misma curvatura constante para los triángulos del mismo tamaño. Entre estas criaturas se encuentran dos físicos,  $F_1$  y  $F_2$ . El físico  $F_1$  sostiene la teoría  $T_1$ , que dice que la región sobre la que se encuentran él y sus semejantes es parte de una superficie esférica  $S_1$ . Su colega, el físico  $F_2$ , sostiene la teoría  $T_2$ , que dice que la región es una superficie plana  $S_2$ . En la figura 15-1 están trazadas estas dos superficies de perfil. Asumamos que, en  $S_1$ , hay cuerpos bidimensionales rígidos, como criaturas y varas de medir, que van y vienen sin cambiar de tamaño o de forma. Para cada cuerpo en  $S_1$  hay un cuerpo plano correspondiente en  $S_2$ , que es su proyección, una proyección hecha por, digamos, líneas paralelas perpendiculares al plano  $S_2$  (en la figura estas líneas paralelas son las líneas discontinuas). Si un cuerpo en  $S_1$  se mueve de la posición  $A_1$  a  $A_1'$ , su cuerpo sombra en  $S_2$  se moverá de  $A_2$  a  $A_2'$ . Asumimos que los cuerpos en  $S_1$  son rígidos; por tanto, la longitud  $A_1$  es igual a la de  $A_1'$ . Pero esto significa que  $A_2'$  debe ser más corta que  $A_2$ .



**Figura 15-1.**

Helmholtz señaló que, cuando medimos algo con una vara de medir, lo que en realidad observamos no es nada más que una serie de coincidencias de puntos. Esto puede verse fácilmente desde nuestra descripción anterior sobre la medición del borde de una valla, al principio del capítulo 9.

Veamos una vez más la figura 15-1. A la proyección de  $S_1$  a  $S_2$  se le llama mapeo de uno a uno. (Esto no podría llevarse a cabo si  $S_1$  fuese una esfera entera, pero hemos asumido que  $S_1$  es sólo una región limitada sobre una esfera.) Para cada punto sobre  $S_1$  hay exactamente un punto correspondiente sobre  $S_2$ . Por lo tanto, a medida que los seres se mueven sobre  $S_1$ , observando coincidencias de puntos entre sus varas de medir y lo que están midiendo, sus seres sombra sobre  $S_2$  hacen exactamente las mismas observaciones sobre sus cuerpos sombra. Como asumimos que los cuerpos en  $S_1$  son rígidos, los cuerpos correspondientes en  $S_2$  no pueden ser rígidos. Deben sufrir ciertas contracciones y expansiones como las que hemos indicado en la figura.

Regresemos a los físicos  $F_1$  y  $F_2$ , quienes sostienen distintas teorías sobre la naturaleza de su mundo plano.  $F_1$  dice que este mundo debe ser parte de una esfera.  $F_2$  insiste en que es un plano, aunque los cuerpos se expandan y contraigan en ciertas formas predecibles a medida que se mueven. Por ejemplo, se vuelven más largos si se mueven hacia la parte central de  $S_2$ , y más cortos si se alejan del centro.  $F_1$  sostiene que los rayos de luz son geodésicas sobre la superficie curva  $S_1$ ; esto es, siguen los arcos de los círculos grandes. Estos arcos se proyectarán a  $S_2$  como arcos elípticos. Para defender su teoría de que el mundo es plano,  $F_2$  debe, por consiguiente, idear teorías ópticas en donde los rayos de luz se muevan en trayectorias elípticas.

¿Cómo pueden decidir estos dos físicos sobre quién tiene la razón? La respuesta es que no hay manera de decidir. El físico  $F_1$  afirma que su mundo es parte de la

superficie de una esfera y que los cuerpos no sufren contracciones ni expansiones salvo, desde luego, para fenómenos familiares (o, mejor dicho, para los análogos bidimensionales de tales fenómenos) como la expansión térmica, la expansión elástica, etc. El físico  $F_2$  describe el mismo mundo de una forma distinta. Piensa que es plano pero que los cuerpos se expanden y contraen de ciertas formas a medida que se mueven sobre la superficie. Nosotros, que estamos en un espacio tridimensional, podemos observar este mundo bidimensional y ver si es una esfera o un plano, pero estos físicos están restringidos en su mundo. En principio, no pueden decidir qué teoría es la correcta. Es por esta razón que Poincaré dijo que ni siquiera debemos plantear la cuestión de quién está en lo correcto. Las dos teorías no son más que dos métodos distintos de describir el mismo mundo.

Existe una infinitud de maneras distintas en que los físicos sobre la esfera podrían describir su mundo, y, de acuerdo con Poincaré, la forma que elijan no es más que una cuestión de convención. Un tercer físico podría sostener la fantástica teoría de que el mundo tiene esta forma:



Podría defender una teoría así al introducir leyes mecánicas y ópticas aún más complejas, leyes que harían que todas las observaciones sean compatibles con la teoría. Por meras razones prácticas, ningún físico sobre la esfera propondría una teoría así. Pero, Poincaré insistía, no hay razón lógica alguna que le impidiese hacerlo.

Podemos imaginar un análogo bidimensional de Poincaré diciendo a ambos físicos: “No hay necesidad de pelear. Ustedes simplemente están dando distintas descripciones de la misma totalidad de hechos.” Quizá el lector recuerde que Leibniz defendió una postura similar. Si en principio no hay forma de decidir entre dos declaraciones, expuso Leibniz, no debemos decir que tienen distintos significados. Si todos los cuerpos en el Universo duplican su tamaño de la noche a la mañana, ¿nos parecería extraño el mundo? Leibniz dijo que no. El tamaño de nuestros cuerpos también se habrá duplicado, así que no tendríamos medios para detectar un cambio. Similarmente, si todo el Universo se moviera hacia un lado diez kilómetros, no podríamos detectarlo. Afirmar que ocurrió cambio alguno sería, por tanto, insensato. Poincaré adoptó este punto de vista y lo aplicó a la estructura geométrica del espacio. Podemos encontrar evidencia experimental que sugiera que el espacio físico es no euclidiano, pero siempre podemos conservar el más sencillo espacio euclidiano si

estamos dispuestos a pagar un precio por ello. Como hemos visto, para Poincaré este precio no era demasiado alto.

Hay dos puntos básicos que nuestra consideración sobre el mundo plano quiso dejar en claro, y que debemos aplicar a nuestro mundo real. Primero, al hacer uso de los ordinarios procedimientos de medición a los que estamos acostumbrados, podemos llegar al resultado de que el espacio tiene una estructura no euclidiana. Algunos filósofos recientes (como Hugo Dingler, por ejemplo) no han sido capaces de ver esto. Sostienen que nuestros procedimientos de medición emplean instrumentos fabricados bajo la presunción de que la geometría es euclidiana; por lo tanto, estos instrumentos no pueden ofrecer más que resultados euclidianos. Esta aseveración es ciertamente errónea. Nuestros instrumentos ocupan una parte tan pequeña del espacio que la cuestión de cómo nuestro espacio se desvía de la geometría euclidiana no entra en su construcción. Consideremos, por ejemplo, el instrumento empleado por un topógrafo para medir ángulos. Contiene un círculo dividido en 360 partes iguales, pero es un círculo tan pequeño que, incluso si el espacio se desvía del euclidiano en un grado tal que Gauss esperó medir (un grado mucho mayor que la desviación en la teoría de la relatividad), no tendría efecto alguno sobre la construcción de este círculo. En regiones pequeñas del espacio, la geometría euclidiana se mantiene con un alto grado de aproximación. A veces esto se expresa diciendo que el espacio no euclidiano tiene una estructura euclidiana en ambientes pequeños. Desde un punto de vista estrictamente matemático, es una cuestión de límite. Entre más pequeña sea la región del espacio, más se acerca su estructura a la euclidiana. Pero nuestros instrumentos de laboratorio ocupan porciones tan diminutas del espacio que podemos descartar cualquier influencia que pueda tener el espacio no euclidiano sobre su construcción.

Incluso si la desviación de la geometría euclidiana fuese tan fuerte que la suma de los ángulos en un triángulo pequeño (un triángulo, digamos, trazado sobre un pizarrón) difiere considerablemente de  $180^\circ$ , ese hecho ciertamente podría determinarse con la ayuda de instrumentos fabricados en la forma habitual. Supongamos que los seres sobre la superficie esférica  $S_1$  (véase la figura 15-1) construyen un transportador al cortar un disco circular y dividir su circunferencia en 360 partes iguales. Si este transportador fuese usado para medir los ángulos de un triángulo formado por dos mitades de meridianos y un cuarto del ecuador (como en un ejemplo anterior), mostraría que cada ángulo tiene  $90^\circ$  y que, por tanto, la suma de los tres ángulos es de  $270^\circ$ .

El segundo punto básico es que, si encontramos evidencia empírica de un espacio no euclidiano, podemos preservar la geometría euclidiana siempre que estemos dispuestos a introducir ciertas complicaciones en las leyes que gobiernan los cuerpos sólidos y en las leyes de los rayos de luz. Cuando vemos superficies dentro de nuestro espacio, como la superficie sobre la cual vemos a una hormiga arrastrarse, es significativo preguntarse si la superficie es plana, o forma parte de una esfera, o es algún otro tipo de superficie. Por otra parte, si lidiamos con el espacio de nuestro Universo, un espacio que no podemos observar como algo incrustado en un universo de dimensiones superiores, entonces no es significativo preguntarse si el espacio es no euclidiano o si debemos modificar nuestras leyes para preservar la geometría euclidiana. Ambas teorías no son más que dos descripciones de los mismos hechos. Podemos llamarlas descripciones equivalentes porque hacemos exactamente las mismas predicciones sobre los eventos observables en ambas teorías. Quizá “observacionalmente equivalentes” sea un término más apropiado. Las teorías podrán diferir considerablemente en su estructura lógica, pero si sus fórmulas y leyes conducen a las mismas predicciones sobre los eventos observables, podemos decir que son teorías equivalentes.

En este punto, conviene distinguir claramente entre lo que aquí queremos decir por teorías equivalentes y lo que a veces se quiere decir con este término. En ocasiones, dos físicos propondrán dos teorías distintas para referirse al mismo conjunto de hechos. Ambas teorías podrán explicar, de manera exitosa, este conjunto de hechos, pero las teorías podrán no resultar ser las mismas con respecto a observaciones aún no hechas. Esto es, podrán contener distintas predicciones sobre lo que pueda observarse en el futuro. Incluso cuando ambas teorías den cuenta, por completo, de observaciones conocidas, deben ser consideradas como teorías físicas esencialmente distintas.

A veces no resulta fácil idear experimentos que distingan entre dos teorías rivales que no son equivalentes. Un ejemplo clásico lo constituyen la teoría gravitacional de Newton y la teoría gravitacional de Einstein. Las diferencias en las predicciones de estas dos teorías son tan pequeñas que han tenido que idearse experimentos muy astutos y hacerse mediciones muy precisas para poder decidir qué teoría hizo las mejores predicciones. Cuando Einstein propuso su teoría del campo unificado, dijo que era incapaz de pensar en algún experimento crucial que pudiese decidir entre su teoría y otras teorías. Dejó en claro que esta teoría no era equivalente a ninguna teoría anterior, pero estaba expresada en una forma tan abstracta que fue

incapaz de deducir cualesquiera consecuencias que pudiesen ser observadas bajo el grado de precisión actual de nuestros mejores instrumentos. Creía que, si se investigaba más sobre esta teoría del campo unificado o si se hacían mejoras sustantivas en nuestros instrumentos, podría ser posible que, algún día, se hiciese una observación decisiva. Es muy importante comprender que “teorías equivalentes”, como lo hemos utilizado aquí, significa algo mucho más fuerte que el hecho de que dos teorías den cuenta de todas las observaciones conocidas. Aquí, equivalencia significa que dos teorías conducen, en todos los casos, a exactamente las mismas predicciones, como las teorías de los dos físicos en nuestro ejemplo de la tierra plana.

En los siguientes dos capítulos veremos, en detalle, cómo es que la visión de Poincaré sobre la equivalencia de observación de las teorías euclidiana y no euclidiana del espacio conduce a un entendimiento más profundo de la estructura del espacio en la teoría de la relatividad.

## CAPÍTULO 16

### El espacio en la teoría de la relatividad

De acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein, como ya vimos en capítulos anteriores, el espacio tiene una estructura que, en los campos gravitacionales, se desvía de la estructura de la geometría euclidiana. A menos que el campo gravitacional sea extremadamente fuerte, las desviaciones resultan muy difíciles de observar. El campo gravitacional de la Tierra, por ejemplo, es tan débil que no es posible, ni siquiera con nuestros mejores instrumentos, detectar desviación alguna de la estructura euclidiana en sus proximidades. Pero cuando consideramos campos gravitacionales mucho más fuertes, como los que rodean al Sol o a estrellas con masas mayores que la del Sol, entonces sí están sujetas a pruebas de observación ciertas desviaciones de la geometría euclidiana.

Los libros divulgativos que se han escrito sobre este tema, así como muchos otros libros en donde se discute la teoría de la relatividad, a veces contienen declaraciones engañosas. En una página puede decirse que la teoría de Einstein afirma que la estructura del espacio en el campo gravitacional es no euclidiana. En otra página, o quizá incluso en la misma página, se dice que, de acuerdo con la teoría de la relatividad, las varas se contraen en un campo gravitacional. (Este no es el tipo de contracción, a veces llamada contracción de Lorentz, que tiene que ver con varas en movimiento, sino con una contracción de varas en reposo en un campo gravitacional.)

Debemos dejar muy en claro que estas dos declaraciones no encajan entre sí. No podemos decir que una sea errónea. El autor tiene razón en una página, y también la tiene en la siguiente. Pero las dos declaraciones no deben estar en el mismo capítulo. Pertenecen a lenguajes distintos, y el autor debe decidir si quiere hablar sobre la teoría de la relatividad en un lenguaje o en el otro. Si desea hablar en lenguaje euclidiano, entonces resulta apropiado hablar de una vara que se contrae en un campo gravitacional. Pero entonces no puede hablar de una estructura no euclidiana del espacio. Por el contrario, quizá se decida por adoptar un lenguaje no euclidiano; pero entonces no puede hablar de contracciones. Cada lenguaje proporciona una forma legítima de hablar sobre campos gravitacionales, pero mezclar ambos lenguajes en el mismo capítulo resulta muy confuso para el lector.

Cabe recordar que, en nuestra discusión previa del mundo plano, imaginamos a dos físicos que sostenían dos teorías distintas sobre la naturaleza de su mundo. Se hizo evidente que estas dos teorías en realidad eran equivalentes, difiriendo únicamente en que eran dos formas distintas de describir la misma totalidad de hechos. Pues bien, existe la misma situación con respecto a la teoría de la relatividad. Una descripción, que llamaremos  $T_1$ , es no euclidiana. La otra,  $T_2$ , es euclidiana.

Si se decide optar por  $T_1$ , el lenguaje no euclidiano, las leyes de la mecánica y de la óptica siguen siendo las mismas que en la física anterior a Einstein. Los cuerpos sólidos son rígidos excepto para ciertas deformaciones, como las expansiones y contracciones elásticas (cuando fuerzas externas comprimen o estiran los cuerpos), las expansiones térmicas, los cambios producidos por la magnetización, etc. Estas deformaciones son una parte familiar de la física clásica, y son atendidas al introducir diversos factores de corrección en la definición de longitud. Por ejemplo, podría decidirse que una determinada vara de medir será la unidad estándar de longitud. Como se sabe que la vara se expande cuando es calentada, la vara representa esta unidad de longitud sólo cuando tiene una cierta temperatura “normal”  $T_0$ . Desde luego, la vara podrá tener, en cualquier tiempo dado, otra temperatura  $T$  que difiera de  $T_0$ . Por lo tanto, para definir la longitud de la vara estándar a una temperatura  $T$ , debe multiplicarse la longitud normal de la vara,  $l_0$ , por un factor de corrección, como explicamos en el capítulo 9. En ese capítulo expresamos este factor como  $1 + \beta(T - T_0)$ , donde el valor de  $\beta$  depende de la sustancia de la vara. Así llegamos a la definición de longitud  $l$ :

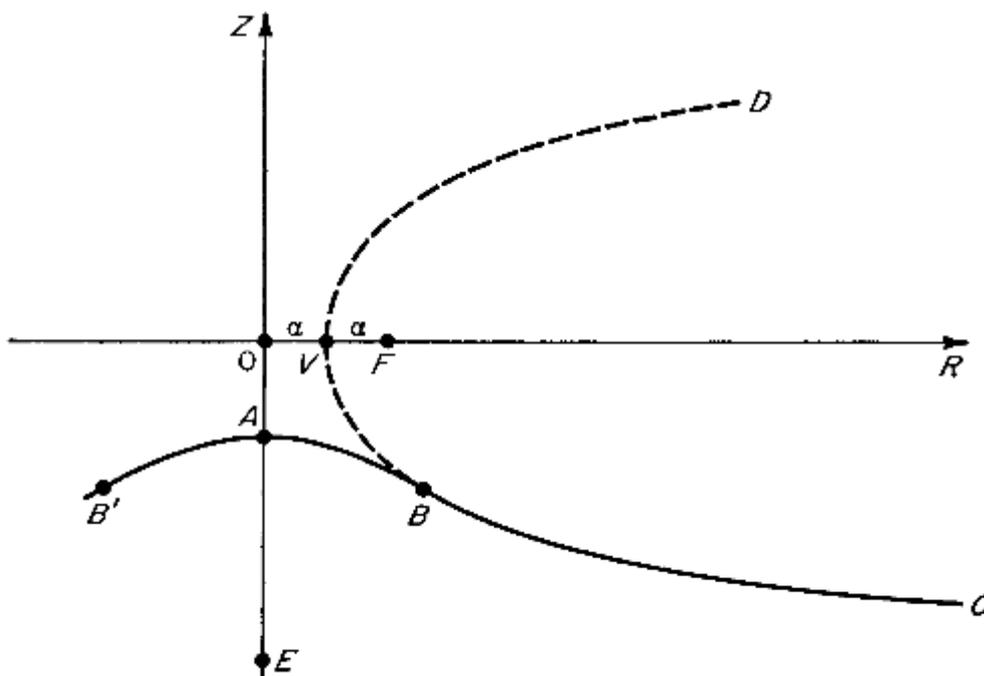
$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)].$$

De manera similar, debemos tomar en cuenta otras fuerzas que podrían influir sobre la longitud de la vara, pero la gravedad no se encontrará entre ellas. Con respecto a la luz, el lenguaje  $T_1$  afirma que los rayos de luz, en el vacío, siempre son líneas rectas. No se doblan ni se desvían de ninguna forma por los campos gravitacionales. La descripción alternativa,  $T_2$ , preserva la geometría euclidiana. Las observaciones que sugieren un espacio no euclidiano se explican por modificaciones de las leyes clásicas de la óptica y la mecánica.

Para ver cómo son aplicables estas dos descripciones a la estructura de un plano en el espacio físico, como está concebido en la teoría de la relatividad de Einstein,

consideremos un plano  $S$  que pasa por el centro del Sol. De acuerdo con la teoría de la relatividad, las pruebas de observación (si fuesen factibles) mostrarían que un triángulo que se encontrase sobre este plano fuera del Sol tendría ángulos que sumarían menos de  $180^\circ$ . De igual forma, un círculo sobre este plano, fuera del Sol, tendría una proporción de la circunferencia al diámetro mayor que  $\pi$ . Las mediciones hechas *dentro* del Sol mostrarían desviaciones opuestas.

Para hacer intuitivamente más clara la estructura de este plano y ver cómo puede ser descrita en los lenguajes rivales  $T_1$  y  $T_2$ , hacemos uso de un modelo en el espacio euclidiano que pueda ser puesto en una correspondencia de uno a uno con la estructura del plano no euclidiano recién descrito. Este modelo es una determinada superficie curva,  $S'$ , cuya construcción describiremos a continuación.<sup>15</sup>



**Figura 16-1.**

En el sistema de coordenadas  $R-Z$  (véase la figura 16-1), la curva  $DBC$  es el arco de una parábola que tiene  $Z$  por su directriz. (La curva está generada por un punto que se mueve de forma tal que su distancia perpendicular desde la directriz es siempre la misma que su distancia desde el punto  $F$ , el foco de la parábola.)  $V$  es el vértice de la parábola, y la distancia  $\alpha$  es proporcional a la masa del Sol. El arco  $AB$  es el arco de un círculo. Su centro,  $E$ , está sobre el eje  $Z$ , y está puesto de tal forma que el arco entra

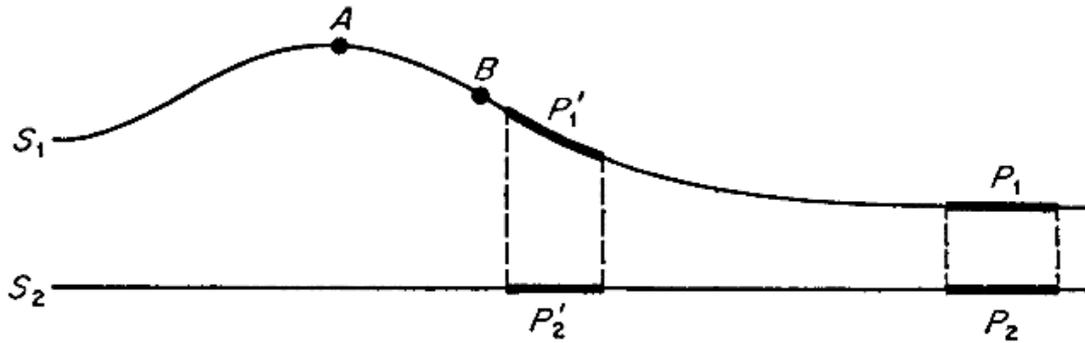
<sup>15</sup> Para esta construcción, véase L. Flamm, *Physikalische Zeitschrift* (Leipzig), 17 (1916), 448-454, basada en Karl Schwarzschild, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften* (Berlín: 1916), pp. 189-196, 424-434.

suavemente en la parábola; esto significa que la tangente del círculo en  $B$  y la tangente de la parábola en  $B$  coinciden. ( $B$  es llamada un punto de inflexión de la curva  $ABC$ .) Supongamos que hacemos rotar esta curva suave  $ABC$  en torno al eje  $Z$  para producir una superficie similar a la superficie de una colina. Esta es la superficie  $S'$ , que nos servirá como un modelo euclidiano del plano no euclidiano que pasa por el centro del Sol.

La parte de la superficie cercana a la cima de la colina,  $B'AB$ , es esférica y convexa; corresponde a la parte del plano dentro del Sol. Aquí la curvatura es constante y positiva. (Este último punto rara vez se toca en los libros sobre teoría de la relatividad, porque pocos físicos se ocupan de la estructura geométrica del espacio dentro de una enorme masa como la del Sol. Pero es un punto teórico importante, y lo consideraremos más tarde cuando examinemos un triángulo de rayos de luz fuera del Sol.) Fuera de esta esférica cima de la colina, la superficie es cóncava como la superficie de una silla de montar. Esta curvatura es, por supuesto, negativa, pero, a diferencia de la geometría de Lobachevski, no es constante. Muy lejos del centro de la colina, la parábola se vuelve cada vez más similar a una línea recta. La curvatura es notablemente distinta de cero sólo en posiciones no muy lejanas a la porción esférica de la superficie. Esta parte negativamente curva de la superficie corresponde a la parte del plano fuera del Sol. En la proximidad inmediata del Sol, su curvatura negativa difiere sensiblemente de cero. Entre más se aleje del Sol, se acerca a cero, pero nunca alcanzará este valor (aunque, en un punto muy, muy lejano, es prácticamente cero). En el diagrama, la cantidad de curvatura está sumamente exagerada. Si la escala de la figura fuese más precisa, la curva sería tan cercana a una línea recta que la curvatura no sería detectable. Más tarde, se dará el valor cuantitativo.

Ahora podemos comparar las teorías  $T_1$  y  $T_2$ , la no euclidiana y la euclidiana, mientras las aplicamos a la estructura del plano que pasa por el centro del Sol. Esto lo haremos igual que como lo hizo Helmholtz, i. e., al utilizar la superficie curva, de colina, como nuestro modelo. Antes, de ésta se hablaba como de una superficie euclidiana, que lo es, pero ahora se utiliza como un modelo del plano no euclidiano. Su perfil está trazado, como  $S_1$ , en la figura 16-2. Por debajo de esto, la línea recta  $S_2$  representa el conocido plano euclidiano. Al igual que antes, todos los puntos sobre  $S_1$  están proyectados por líneas paralelas (trazadas como líneas discontinuas) desde  $S_1$  hasta  $S_2$ . Observemos que, si una vara se mueve de la posición  $P_1$  a la posición  $P_1'$ , la

vara no se contrae, porque el evento está siendo descrito en el lenguaje de la geometría no euclidiana. Pero si recurrimos al lenguaje euclidiano de la teoría  $T_2$ , basado sobre el plano  $S_2$ , entonces debemos decir que la vara se contrae a medida que se mueve de  $P_2$  a  $P_2'$ . Debemos, pues, añadir nuevas leyes que establezcan que todas las varas, cuando se acercan al Sol, sufren ciertas contracciones en la dirección radial, la dirección hacia el centro del Sol.



**Figura 16-2.**



**Figura 16-3.**

La figura 16-3 muestra esta situación vista desde arriba y no desde una sección transversal. El círculo con el centro en  $A$  es el Sol. La vara se encuentra en la posición  $P$ . Sea  $\phi$  el ángulo entre la vara y la dirección radial. La contracción de la vara, en términos de la teoría  $T_2$ , depende de este ángulo, y puede ser cubierta por una ley general. Esta ley establece que si una vara, que tiene longitud  $l_0$  cuando se encuentra muy lejos de cualquier campo gravitacional (permaneciendo sin cambios la temperatura y otras condiciones), es llevada a la posición  $P$  a la distancia  $r$  del cuerpo  $b$ , cuya masa es  $m$ , con un ángulo  $\phi$  a la dirección radial, se contraerá a la longitud

$$l_0 \left[ 1 - C \left( \frac{m}{r} \cos^2 \phi \right) \right],$$

donde  $C$  es una cierta constante. Como esta es una ley general, como lo es la ley de expansión térmica, debe tomarse en consideración cuando se defina una vara de medir a ser empleada como un estándar de longitud. Por tanto, debemos introducir un nuevo

término de corrección en la ecuación previamente utilizada para definir la longitud  $l$ . La definición será entonces:

$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)][1 - C\left(\frac{m}{r} \cos^2 \phi\right)].$$

Mantengamos constante la distancia  $r$  y hagamos variar el ángulo  $\phi$ . Si la vara se encuentra en una dirección radial de tal forma que  $\phi = 0$ , entonces el coseno es 1 y podemos omitir " $\cos^2 \phi$ " de la ecuación. En ese caso, la contracción ha alcanzado su valor máximo. Si  $\phi$  es un ángulo recto, el coseno es cero, y entonces desaparece todo el término de corrección. En otras palabras, no hay contracción alguna de la vara cuando ésta es perpendicular a la dirección radial. Para otras posiciones, la cantidad de contracción varía entre cero y el valor máximo.

El valor de la constante  $C$  es muy pequeño. Si todas las magnitudes son medidas en el sistema *CGS* (centímetro, gramo, segundo), entonces el valor de  $C$  es  $3.7 \times 10^{-29}$ . Esto significa que detrás del punto decimal hay 28 ceros seguidos por "37". Es evidente, pues, que este es un valor extremadamente pequeño. Incluso si hay una masa tan grande como la del Sol ( $1.98 \times 10^{33}$  gramos), y si se reduce  $r$  tanto como sea posible al acercarnos a la superficie del Sol para que  $r$  sea igual al radio  $AB$  del Sol ( $6.95 \times 10^{10}$  centímetros), el efecto sigue siendo muy pequeño. En efecto, la contracción relativa de una vara cerca de la superficie del Sol, en dirección radial, es

$$C \frac{m}{r_0} = .0000011.$$

Resulta entonces claro que las gráficas de las figuras 16-1 y 16-2 están enormemente exageradas. La estructura de un plano que pasa por el centro del Sol es prácticamente la misma que la de un plano euclidiano; pero hay desviaciones diminutas y, como veremos más adelante, procedimientos experimentales para observar tales desviaciones.

El punto importante a remarcar aquí - y es el punto enfatizado por Poincaré - es que el comportamiento de las varas en los campos gravitacionales puede ser descrito de dos formas esencialmente distintas. Podemos conservar la geometría euclidiana si introducimos nuevas leyes físicas, o podemos conservar la rigidez de los cuerpos si adoptamos una geometría no euclidiana. Somos libres de elegir cualquier geometría que queramos para el espacio físico siempre que estemos dispuestos a realizar los ajustes

que sean necesarios en las leyes físicas. Este ajuste aplica no solamente a leyes concernientes a los cuerpos físicos, sino también a leyes ópticas.

La aplicación a leyes ópticas puede ser fácilmente comprendida si consideramos la trayectoria de un rayo de luz que pasa cerca del Sol a medida que viaja desde una estrella distante a la Tierra. La figura 16-4 muestra a la Tierra en el lado izquierdo y al disco del Sol en el centro. Cuando el Sol no se encuentra en la posición mostrada, la luz que viene de la estrella  $S$  (la estrella que se encuentra hasta la derecha) normalmente llegaría a la Tierra por la línea recta  $L_1$ . Pero cuando el Sol está en la posición mostrada, la luz de la estrella es desviada a  $C$ , de tal suerte que toma el camino  $L_2$ . La estrella  $S$  se encuentra tan lejos que las trayectorias de luz  $L_1$  y  $L_2$  (la parte a la derecha del punto  $C$ ) pueden considerarse como paralelas. Pero si un astrónomo midiese el ángulo  $\alpha_2$  entre la estrella  $S$  y otra estrella  $S'$ , descubriría que es un poco más pequeño que el ángulo  $\alpha_1$ , que encontró en otras estaciones cuando el Sol no aparecía cerca de la estrella  $S$ . De esta forma, la posición de la estrella  $S$ , vista desde la Tierra, parece haberse desplazado un poco hacia la estrella  $S'$ . Desde luego, esto es una observación empírica, en realidad una de las confirmaciones empíricas básicas de la teoría de Einstein.

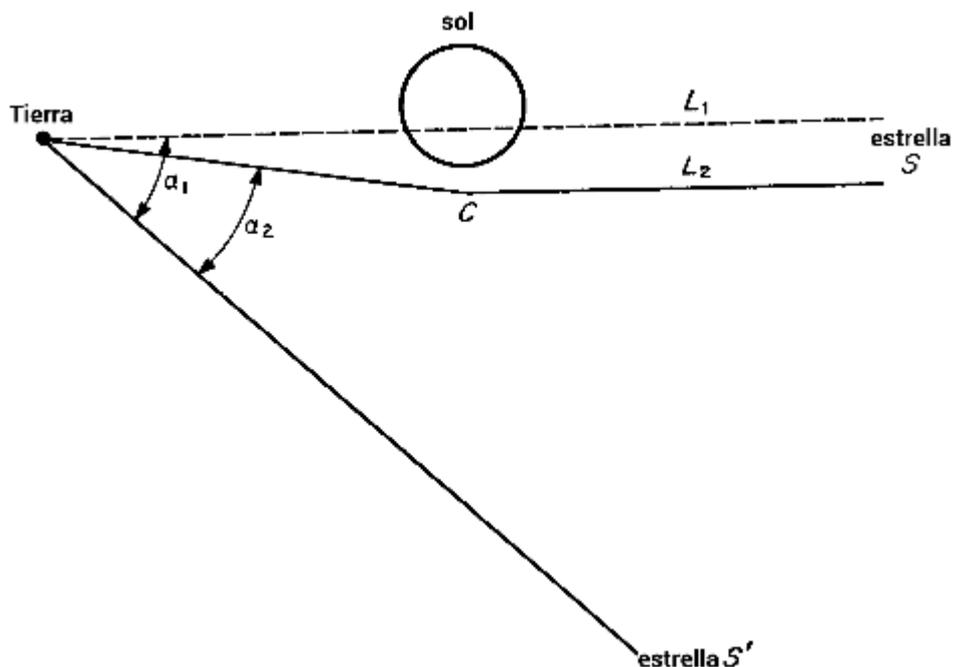
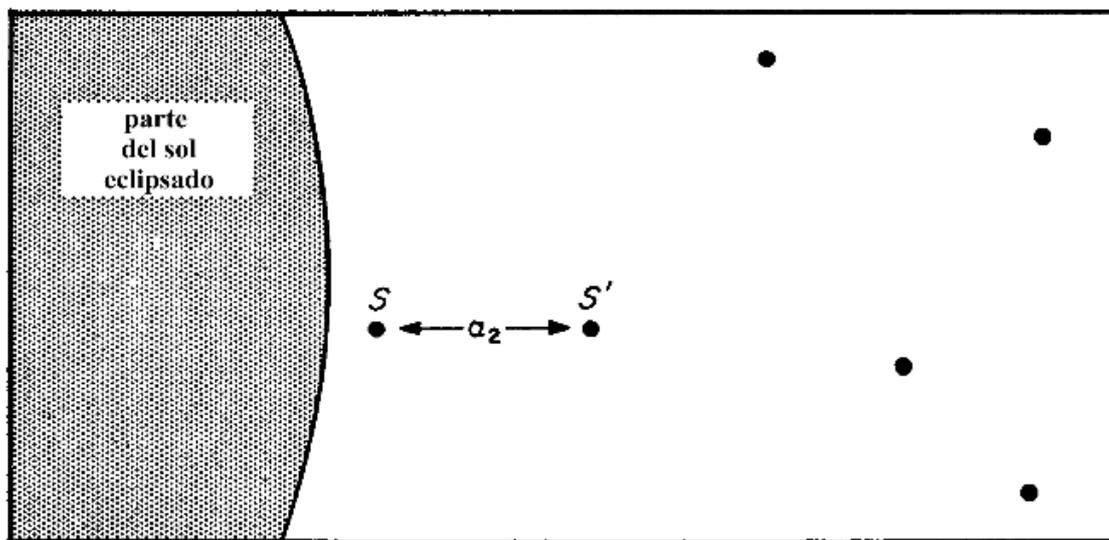


Figura 16-4.

La luz del Sol es tan fuerte que las estrellas cercanas a su borde sólo pueden ser vistas o fotografiadas durante un eclipse solar. Una porción de una fotografía así se

parece a algo como el dibujo en la figura 16-5. La posición de la estrella  $S$  está indicada por un punto. Otras estrellas, incluyendo a  $S'$ , son mostradas por otros puntos. El ángulo entre los rayos de luz que vienen de  $S$  y  $S'$  está determinado por medir la distancia entre  $S$  y  $S'$  sobre la placa fotográfica. Esta distancia es después comparada con la distancia entre las dos estrellas sobre fotografías hechas en otros momentos, cuando el Sol estaba en otra posición. Pruebas históricas de este tipo, hechas primero en 1919 y repetidas en muchos otros eclipses, han mostrado un cambio muy ligero en las posiciones de las estrellas cercanas al disco solar. Estos desplazamientos han confirmado la predicción de Einstein de que los rayos de luz que pasan cerca del Sol estarían “doblados” por el poderoso campo gravitacional del Sol.



**Figura 16-5.**

La primera medición de estos desplazamientos fue hecha por Finlay Freundlich en la Torre Einstein, en Potsdam, cerca de Berlín. En ese tiempo yo vivía en Viena, y recuerdo haber visitado a Hans Reichenbach en Berlín. Ambos fuimos a ver a Freundlich en el sótano de la torre, que es donde estaba trabajando. Pasó muchos días haciendo cuidadosas mediciones de todas las posiciones de las estrellas sobre una placa fotográfica de unos diez centímetros cuadrados. Con la ayuda de un microscopio, llevó a cabo repetidas mediciones de las coordenadas de cada estrella y después tomó la media de tales mediciones para así obtener la estimación más precisa posible de la posición de la estrella. No permitió que ninguno de sus asistentes le ayudara con las mediciones, porque era consciente de la gran importancia histórica de la prueba. Resultó

que la desviación, aunque muy pequeña, sí era detectable, y la prueba resultó ser una dramática confirmación de la teoría de Einstein.

La situación con respecto a la desviación de rayos de luz por un campo gravitacional es similar a la situación con respecto a la contracción aparente de los cuerpos físicos. De nuevo aquí debemos elegir entre dos teorías para explicar los resultados empíricos. En la teoría  $T_2$  conservamos la geometría euclidiana, pero entonces tenemos que idear nuevas leyes ópticas que describan la desviación de la luz en campos gravitacionales. Por otro lado, en la teoría  $T_1$  adoptamos una geometría no euclidiana y conservamos la clásica suposición de que, en el espacio vacío, la luz no se desvía por la acción de campos gravitacionales. Esto será explicado en el siguiente capítulo.

Es importante comprender a fondo la naturaleza de esta elección antes de preguntarnos por la estructura geométrica del espacio. Creo que la ambigüedad de esta cuestión y las frases elípticas de diversas respuestas dadas por Poincaré y otros a esta pregunta han conducido a algunas malas interpretaciones de su posición (por Reichenbach, por ejemplo). Poincaré dijo que el físico puede elegir libremente entre una geometría euclidiana y cualquier forma de geometría no euclidiana. Como Poincaré dijo que la elección era una cuestión de convención, su punto de vista se conoce como la perspectiva convencionalista. En mi opinión, Poincaré quiso decir que la elección debía ser hecha por el físico *antes* de decidir qué método utilizar para medir la longitud. Una vez hecha la elección, *ajustaría* su método de medición, para que éste lo conduzca al tipo de geometría elegido. Una vez aceptado un método de medición, la cuestión de la estructura del espacio se convierte en una cuestión empírica, a ser resuelta por medio de observaciones. Aunque Poincaré no siempre fue explícito sobre este punto, sus escritos, tomados en todo su contexto, indican que esto fue lo que quiso decir. En mi opinión, no hay diferencia entre Reichenbach y Poincaré sobre este punto. Es cierto que Reichenbach criticó a Poincaré por haber sido un convencionalista que no vio el aspecto empírico de la cuestión sobre la estructura geométrica del espacio, pero Poincaré estaba hablando elípticamente; estaba tratando solamente con la elección inicial de una geometría por parte de un físico. Ambos hombres vieron claramente que, una vez adoptado un método de medición apropiado, la cuestión de la estructura geométrica del espacio se vuelve un problema empírico, a ser resuelto por medio de observaciones.

El aspecto empírico de este problema se manifiesta claramente si consideramos una pregunta que hoy en día rara vez se hace pero que fue muy discutida en los primeros años de la teoría de la relatividad. ¿Es el espacio total del Universo finito o infinito? Como ya mencionamos, Einstein propuso alguna vez un modelo del cosmos que puede pensarse como análogo a la superficie de una esfera. Para criaturas bidimensionales sobre una esfera, la superficie sería tanto finita como ilimitada. Sería finita porque toda la superficie podría ser explorada, y su área podría ser calculada; y sería ilimitada en el sentido de que uno siempre podría moverse en cualquier dirección, desde cualquier posición, y nunca encontrarse con algún límite de ningún tipo. En el modelo einsteiniano, el espacio tridimensional, visto desde una perspectiva cuatridimensional, poseería una curvatura positiva total, que se cerraría sobre sí misma como la superficie cerrada de una esfera. Una astronave que viajase en cualquier dirección en “línea recta” acabaría por regresar a su punto de partida, tal como un avión que, moviéndose por un gran círculo de la Tierra, acabaría regresando a su punto de partida. Incluso se especuló con que una galaxia podría ser vista si se apuntase un poderoso telescopio en la dirección opuesta a la de tal galaxia.

¿Cómo pudo pensar Einstein que todo el cosmos tiene una curvatura positiva y al mismo tiempo mantener que, en los campos gravitacionales, siempre hay una curvatura negativa? Esta pregunta es todavía hoy un buen desafío para la mente de un físico. La respuesta no es difícil, aunque la pregunta puede ser desconcertante si no se ha pensado mucho sobre el tema. Consideremos la superficie de la Tierra. Tiene una curvatura positiva total. Sin embargo, está repleta de valles que tienen fuertes curvaturas negativas. De la misma forma, el modelo cósmico de Einstein contiene “valles” de curvatura negativa en campos gravitacionales fuertes, pero éstos están sobrelanceados por curvaturas positivas más fuertes *dentro* de grandes masas, como las estrellas fijas. Estas estrellas corresponden, haciendo una analogía con la superficie terrestre, a las curvaturas positivas fuertes de las cúpulas de las montañas. Se ha calculado que el cosmos tendría una curvatura positiva total únicamente si su densidad media de masa fuese lo suficientemente alta. Hoy en día, la hipótesis del Universo en expansión y algunos cálculos recientes sobre la cantidad de materia en el Universo han hecho que el modelo finito cerrado de Einstein parezca improbable. Quizá es todavía una pregunta abierta, porque hay muy poca certeza sobre las mediciones de masas y distancias; es posible que el hidrógeno se esparza por lo que hasta antes se pensaba era espacio vacío, y esto haría que la densidad media de la masa del cosmos se elevara. En cualquier caso,

el atractivo sueño de Einstein sobre un Universo cerrado pero ilimitado parece menos probable ahora que cuando fue propuesto por primera vez. El punto a enfatizar aquí es que la evidencia a favor o en contra de este modelo cósmico es evidencia empírica. Actualmente, aunque sí existe una aceptación general de la geometría no euclidiana de la teoría de la relatividad, no hay modelo cósmico alguno sobre el que estén de acuerdo todos los astrónomos y físicos.

Como hemos visto, los físicos pudieron haber conservado la geometría euclidiana (como Poincaré erróneamente predijo) y haber explicado las nuevas observaciones introduciendo nuevos factores de corrección en las leyes mecánicas y ópticas. En lugar de eso, eligieron seguir a Einstein en su abandono de la geometría euclidiana. ¿Sobre qué base se tomó esta decisión? ¿Fue por razones de simplicidad? Si es así, ¿por simplicidad de qué? El enfoque euclidiano tiene una geometría mucho más simple pero leyes físicas más complicadas. El enfoque no euclidiano tiene una geometría sumamente más complicada pero leyes físicas sumamente simplificadas. ¿Cómo debe tomarse una decisión entre estos dos enfoques, cada uno de los cuales es más simple que el otro en algún sentido? En el siguiente capítulo intentaremos responder esta pregunta.

## CAPÍTULO 17

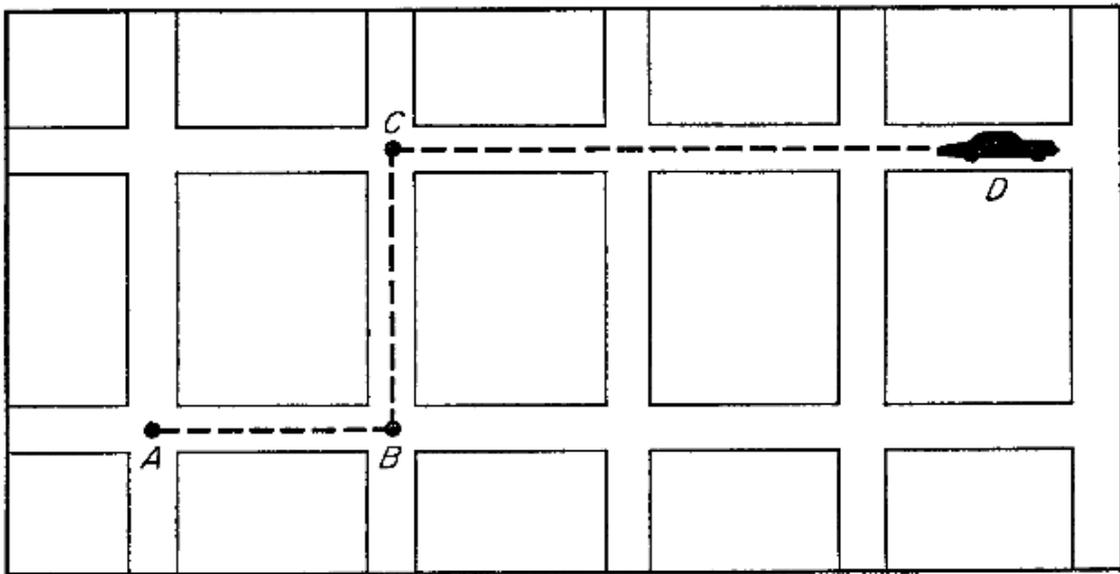
### Ventajas de la geometría física no euclidiana

Al buscar una base sobre la cual elegir entre una estructura geométrica euclidiana y una no euclidiana para el espacio físico, al principio existe cierta tentación por elegir el enfoque que proporcione el método más simple para medir la longitud. En otras palabras, evitar, tanto como sea posible, la introducción de factores de corrección en los métodos de medición. Desafortunadamente, si esta regla se toma literalmente, las consecuencias son fantásticas. La forma más simple de medir la longitud es eligiendo una vara de medir y definiendo la unidad de longitud como la longitud de tal vara, sin introducir ningún factor de corrección en absoluto. La vara es tomada como la unidad de longitud, sin importar su temperatura, sin importar si está magnetizada o si sobre ella actúan fuerzas elásticas, y sin importar si se encuentra en un campo gravitacional fuerte o débil. Como ya mostramos antes, no hay contradicción lógica alguna en adoptar una unidad de longitud así, ni hay motivo alguno por el que esta elección deba descartarse en razón de los hechos observados. Sin embargo, debe pagarse un precio muy alto por esta elección, porque conduce a una imagen bizarra, increíblemente compleja del mundo. Sería necesario decir, por ejemplo, que, siempre que se pone una llama cerca de la vara, todos los otros objetos en el cosmos, incluyendo las galaxias más distantes, se contraen inmediatamente. Ningún físico aceptaría las extrañas consecuencias y las leyes físicas involucradas que resultarían si se adoptase esta definición más simple posible de la longitud.

¿Sobre qué base, pues, eligieron Einstein y sus seguidores la geometría más complicada, la geometría no euclidiana? La respuesta es que no hicieron la elección con respecto a la simplicidad de tal o cual aspecto parcial de la situación, sino más bien con respecto a la simplicidad general del sistema total de la física que resultaría de la elección. Desde este punto de vista total, ciertamente debemos estar de acuerdo con Einstein en que hay una ganancia en simplicidad si se adopta la geometría no euclidiana. Para preservar la geometría euclidiana, los físicos tendrían que haber ideado extrañas leyes sobre la contracción y expansión de los cuerpos sólidos y sobre la desviación de los rayos de luz en los campos gravitacionales. Pero adoptar el enfoque no euclidiano supone una enorme simplificación de las leyes físicas. En primer lugar, ya

no hay necesidad de introducir nuevas leyes para la contracción de los cuerpos rígidos y la desviación de los rayos de luz. Más que esto, las viejas leyes que gobiernan los movimientos de los cuerpos físicos, como las trayectorias de los planetas alrededor del Sol, se simplifican enormemente. Incluso la propia fuerza gravitacional desaparecería, en cierto sentido, del cuadro. En lugar de una “fuerza”, únicamente habría el movimiento de un objeto a lo largo de su “línea de mundo” natural, en una manera requerida por la geometría no euclidiana del sistema espacio-temporal.

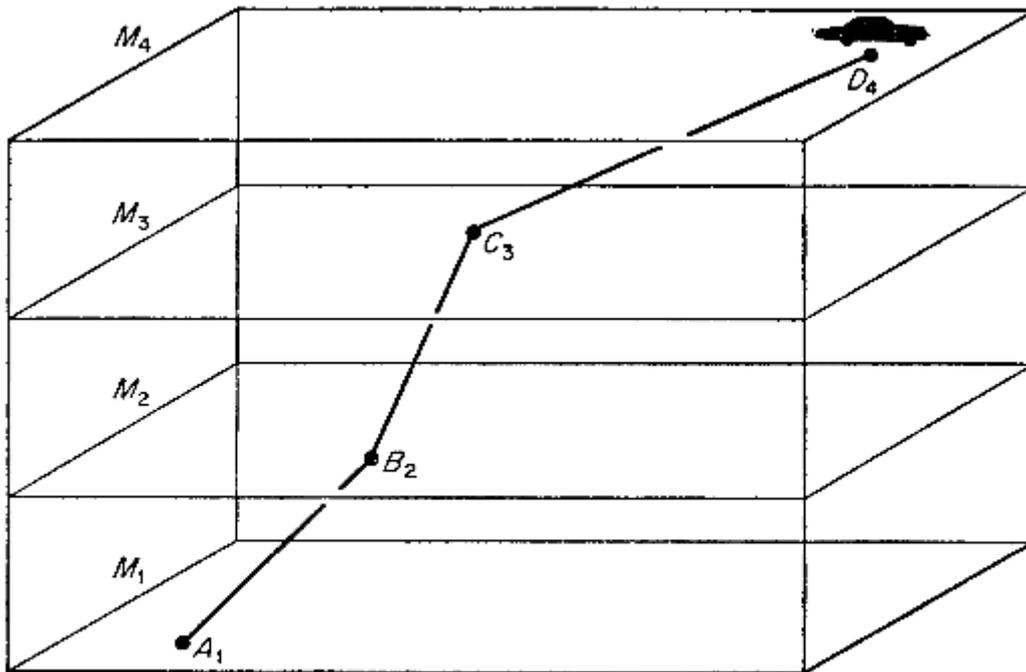
El concepto de línea de mundo puede explicarse de esta forma. Supongamos que uno quiere trazar sobre un mapa  $M$  el movimiento de un coche a medida que avanza por las calles de Los Ángeles. La figura 17-1 muestra este mapa; la trayectoria del coche está indicada por la línea  $ABCD$ . La línea muestra exactamente cómo viaja el coche por las calles, pero, por supuesto, no dice nada sobre la velocidad del coche. Falta el elemento del tiempo.



**Figura 17-1.**

¿Cómo puede trazarse el movimiento del coche de tal forma que se tenga en cuenta tanto el tiempo como la velocidad del coche? Esto se hace tomando una serie de mapas  $M_1, M_2, \dots$ , cada uno trazado sobre una hoja transparente de plástico, como se muestra en la figura 17-2. Sobre  $M_1$  se marca el punto  $A_1$  (que corresponde al punto  $A$  del mapa original  $M$ ), que es donde se encontraba el coche en el primer punto de tiempo  $T_1$ . Sobre  $M_2$  se marca la posición del coche  $B_2$  en un punto de tiempo posterior  $T_2$  (digamos, 20 segundos después de  $T_1$ ).  $M_3$  y  $M_4$  muestran las posiciones  $C_3$  y  $D_4$  del

coche en los puntos de tiempo  $T_3$  y  $T_4$ . Los mapas están puestos en un marco que los mantiene paralelos, uno sobre otro, a distancias de, digamos, diez centímetros, y se utiliza una escala vertical de un centímetro para cada dos segundos de tiempo. Si se coloca un alambre para conectar los cuatro puntos, el alambre representará la *línea de mundo* del movimiento del coche. Además de mostrar dónde se encuentra el coche en cada momento, mostrará la velocidad del coche a medida que se mueve de un punto a otro.

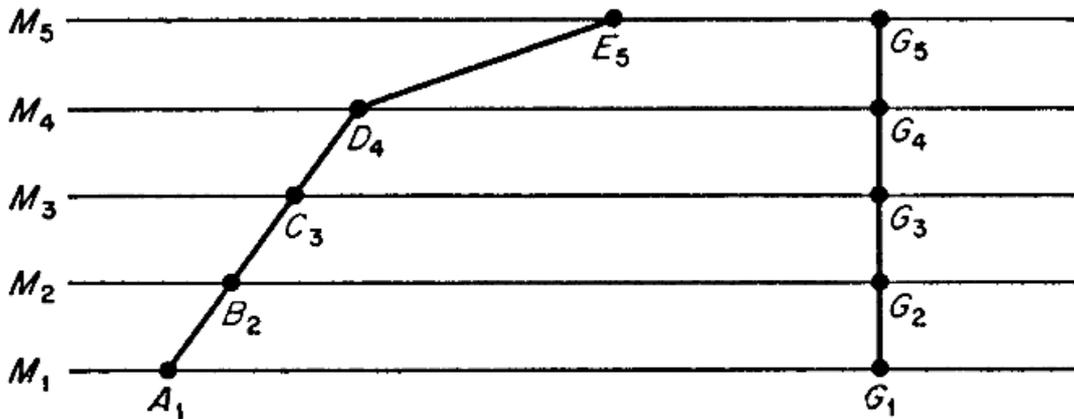


**Figura 17-2.**

Un ejemplo incluso más simple de una línea de mundo es evidente cuando se muestra la trayectoria unidimensional de un coche que viaja por el Boulevard Wilshire.<sup>16</sup> Una línea de mundo de este tipo puede trazarse tal como se muestra en la figura 17-3, donde el eje horizontal muestra la distancia y el eje vertical es el tiempo en minutos. El coche comienza en  $M_1$  en la posición  $A_1$ . Por los primeros tres minutos, el coche se mueve a una velocidad constante desde  $A_1$  hasta  $D_4$ . Desde  $D_4$  hasta  $E_5$  la velocidad también es constante, pero es mayor que antes porque cubrió una distancia mayor en un minuto. A la derecha de este gráfico se muestra la línea de mundo de un hombre que estuvo en un punto  $G$  durante los mismos cuatro minutos. Como este hombre no se movió, su línea de mundo es hacia arriba. Es evidente que una línea de

<sup>16</sup> El Boulevard Wilshire es una de las calles principales de Los Ángeles, recorriéndola de este a oeste. Nota del Traductor.

mundo sobre este gráfico se desvía cada vez más de la vertical a medida que aumenta la velocidad. Si la velocidad no es constante, entonces la línea de mundo es curva y no recta. De esta forma, la línea indica todas las características del movimiento real; incluso si la velocidad del objeto aumenta o disminuye, la línea de mundo muestra su velocidad en cada momento de tiempo.



**Figura 17-3.**

La línea de mundo de un objeto puede trazarse sobre un plano únicamente si el objeto en cuestión se mueve por una trayectoria unidimensional. Si la trayectoria es bidimensional, como en el primer ejemplo, la línea de mundo debe trazarse sobre un gráfico tridimensional. Similarmente, la línea de mundo de un objeto moviéndose en un espacio tridimensional debe mostrarse sobre una serie de mapas tridimensionales que formen un sistema cuatridimensional de la misma forma que la serie de los mapas de plástico bidimensionales formaban un sistema tridimensional. El modelo real de un gráfico cuatridimensional conteniendo una línea de mundo cuatridimensional no puede ser construido, pero la línea de mundo sí puede ser descrita matemáticamente. Una métrica especial introducida por Hermann Minkowski conduce a una fórmula inusualmente sencilla. Cuando ésta se aplica a las leyes de los rayos de luz y de los cuerpos en movimiento, como los planetas, las líneas de mundo - tanto de los planetas como de los rayos de luz - en todos los campos gravitacionales resultan ser geodésicas. Como ya explicamos antes, una geodésica es la línea “más recta” posible en un sistema espacial dado. El sistema espacial no necesita tener una curvatura constante. Sobre la superficie de la Tierra, por ejemplo, con sus montañas y valles irregulares, siempre es posible encontrar una o más geodésicas que representen los caminos más cortos posibles entre cualesquiera dos puntos dados. Las geodésicas son las contrapartes de las líneas rectas sobre el plano euclidiano.

En la teoría de la relatividad, las líneas de mundo de los planetas y de los rayos de luz son geodésicas. Al igual que en la física clásica, de un cuerpo sobre el que no actúa fuerza externa alguna se dice que se mueve por su inercia a lo largo de una trayectoria recta a velocidad constante, y, por lo tanto, a lo largo de una línea de mundo, de tal forma que en la física de la relatividad, de este cuerpo en movimiento se dice que se mueve, incluso en los campos gravitacionales, a lo largo de líneas de mundo que son geodésicas. En este cuadro, no hay necesidad de introducir concepto alguno de “fuerza”. ¿Por qué un planeta gira alrededor del Sol en lugar de moverse por la tangente? No es porque el Sol ejerza una “fuerza” que “jale” al planeta hacia él, sino porque la masa del Sol crea una curvatura negativa en la estructura no euclidiana del espacio-tiempo. En la estructura curva, la línea de mundo más recta para el planeta, su geodésica, resulta ser la que corresponde a su movimiento real alrededor del Sol. La trayectoria elíptica del planeta no es una geodésica en el espacio tridimensional, pero su línea de mundo, en el sistema espacio-tiempo no euclidiano cuatridimensional, es una geodésica. Es la línea más recta posible que puede tomar el planeta. De forma similar, la luz también viaja a través del espacio-tiempo por líneas de mundo geodésicas.

Desde la perspectiva no euclidiana de la teoría de la relatividad, no hay fuerza de gravedad en el sentido de fuerzas elásticas o electromagnéticas. La gravitación, como fuerza, desaparece de la física y es remplazada por la estructura geométrica de un sistema espacio-temporal de cuatro dimensiones. Esto significó una transformación tan revolucionaria que no es difícil comprender por qué muchos no alcanzaron a comprender el concepto correctamente. A veces se decía que una parte de la física, a saber, la teoría de la gravedad, había sido remplazada por geometría pura, o que parte de la física se había convertido en matemáticas. Algunos autores especularon con la posibilidad de que algún día toda la física podría convertirse en matemáticas. Pienso que esto es engañoso. Los autores que intentaron hacer más clara la teoría de la relatividad al lego disfrutaban utilizando frases estimulantes, paradójicas. Estas frases pueden contribuir a una escritura colorida, pero a menudo ofrecen una impresión inexacta del estado real de las cosas. En este caso, pienso que condujeron a una confusión entre la geometría en su sentido matemático y la geometría en su sentido físico. En efecto, la física de la gravitación es remplazada, en la teoría de la relatividad, por una geometría física del espacio o, mejor dicho, del sistema espacio-temporal. Pero esta geometría forma aún parte de la física, y no de las matemáticas puras. Es geometría *física*, no matemática.

La geometría matemática es puramente lógica, mientras que la geometría física es una teoría empírica. En la teoría de la relatividad de Einstein, la gravitación simplemente tomó otra forma. Una teoría física de la gravedad fue transformada en otra teoría física. Ya no aplica el concepto de fuerza, pero la teoría de la relatividad de la gravitación es todavía física, no matemáticas. Siguen ocurriendo dentro de ella magnitudes no matemáticas (distribuciones de la curvatura del espacio-tiempo), y éstas son magnitudes físicas, no conceptos matemáticos. El punto a enfatizar aquí es que, debido a que a la teoría de la gravitación de Einstein se le llamó geometría, hubo la tentación de verla como si fuese matemáticas puras. Pero la geometría física no son matemáticas; es una teoría del espacio físico. No es sólo una abstracción vacía, sino la teoría física del comportamiento de los cuerpos y de los rayos de luz y, por lo tanto, no es posible considerarla como parte de las matemáticas puras. Se ha dicho que uno debe tomar *cum grano salis* la célebre observación de Galileo de que el libro de la naturaleza está escrito en el lenguaje de las matemáticas. Esta observación fácilmente puede ser mal entendida. Galileo quiso decir que la naturaleza puede describirse con ayuda de conceptos matemáticos, no que todo el lenguaje de la física consista en símbolos matemáticos. Es absolutamente imposible definir un concepto como “masa” o “temperatura” en matemáticas puras de la misma forma en que puede definirse el concepto de logaritmo o cualquier otra función matemática. Es esencial darse cuenta de que hay una diferencia fundamental entre los símbolos físicos que tienen lugar en una ley física (por ejemplo, “*m*” para masa, “*T*” para temperatura) y los símbolos matemáticos que tienen lugar en la ley (por ejemplo, “2”, “ $\sqrt{\quad}$ ”, “log”, “cos”).

La gran simplicidad de las ecuaciones de Einstein para los cuerpos en movimiento y los rayos de luz dice mucho a favor de su reivindicación de que el enfoque no euclidiano es preferible al euclidiano, en donde sería necesario complicar las ecuaciones introduciendo nuevos factores de corrección. Pero esto está muy lejos del descubrimiento de cualquier tipo de principio general que nos diga cómo obtener la mayor simplicidad total al elegir entre enfoques alternativos para la física. Lo que se desea es una regla de elección general que pueda aplicarse a todas las situaciones futuras; entonces la elección de Einstein en esta situación sería un caso especial de la regla general. Se ha dado por sentado, desde luego, que el sistema total de física más simple es el preferible, pero esa no es la cuestión. La cuestión es cómo decidir cuál de los dos sistemas tiene la máxima simplicidad total. Cuando hay dos sistemas

compitiendo, a menudo es el caso que uno es más simple que el otro en algún aspecto. En tales casos, ¿cómo puede medirse la simplicidad total?

Fue Reichenbach quien propuso una regla general de este tipo. Quizá su regla no es absolutamente general, pero sí cubre una exhaustiva clase de situaciones, además de que es muy interesante. Tengo la impresión, por otra parte, de que no se le ha prestado la atención que merece. La regla está basada sobre una distinción entre “fuerzas diferenciales” y “fuerzas universales”. Reichenbach las llamó “fuerzas”, pero aquí es preferible hablar de ellas, de una manera más general, como dos tipos de “efectos”. (Las fuerzas pueden ser introducidas más tarde para explicar los efectos.) La distinción es la siguiente. Si un efecto es diferente con respecto a sustancias diferentes, es un *efecto diferencial*. Si es cuantitativamente el mismo, sin importar la naturaleza de la sustancia, es un *efecto universal*.

Esto puede aclararse con ejemplos. Cuando se calienta una barra de hierro, ésta se expande. Si la longitud está definida por medio de una barra de hierro, entonces se da cuenta de este efecto de expansión térmica (como ya se mostró) por la introducción de un factor de corrección:

$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)].$$

La letra beta en esta fórmula es el coeficiente de expansión térmica. Es una constante, pero sólo para todos los cuerpos de cierta sustancia. Si la barra es de hierro, beta tiene un cierto valor; si es de cobre, oro, o alguna otra sustancia, entonces tiene valores distintos. La expansión de la barra cuando es calentada es, por tanto, un efecto diferencial, porque varía con la sustancia.

Consideremos la fórmula para la longitud después de añadido un segundo factor de corrección; éste toma en cuenta la influencia de la gravitación sobre la longitud de la barra. La fórmula, como recordarán, es:

$$l = l_0[1 + \beta(T - T_0)][1 - (C \frac{m}{r} \cos^2 \varphi)].$$

La letra  $C$  en este segundo factor de corrección es una constante universal, siendo la misma en todo campo gravitacional y con respecto a cualquier cuerpo. No hay ningún parámetro dentro del par de paréntesis a la derecha que cambie de sustancia a sustancia en la forma en que sí lo hace el parámetro beta, que se encuentra dentro del primer par de paréntesis. El factor de corrección toma en consideración la masa  $m$  del Sol, la distancia  $r$  del Sol a la vara de medir, y el ángulo  $\phi$  de la vara con respecto a la

línea radial del Sol a la vara. No indica nada sobre si la vara es de hierro, cobre, o alguna otra sustancia. Es, por tanto, un efecto universal.

Reichenbach añadió que los efectos universales son de un tipo tal que no pueden ponerse escudos contra ellos. Una barra de metal, por ejemplo, puede escudarse en contra de efectos magnéticos si se la rodea con un muro de hierro. Pero no hay forma de escudarla en contra de los efectos gravitacionales. En mi opinión, no hay necesidad de hablar de escudos para distinguir entre efectos diferenciales y universales, porque esta condición ya está implícita en lo que se ha dicho hasta ahora. Si se construye un muro de hierro para escudar la pieza de un aparato de un imán fuerte que se encuentre en una habitación contigua, el escudo es efectivo solamente porque el muro de hierro está influido por campos magnéticos distintos a los que influyen sobre el aire. Si esto no fuese así, el escudo no funcionaría. El concepto de escudar aplica, por lo tanto, sólo a efectos que tienen influencias distintas sobre sustancias distintas. Si un efecto universal está definido como uno que es el mismo para todas las sustancias, se sigue que no hay escudo posible ante el efecto.

En un análisis detallado de los efectos diferenciales y universales,<sup>17</sup> Reichenbach llama la atención sobre el siguiente hecho. Supongamos que alguien declara haber descubierto un nuevo efecto y dice que éste no varía de sustancia a sustancia. Se procede a examinar la ley que ofrece para este nuevo efecto, y resulta evidente que lo que dice es cierto; la ley no contiene parámetro alguno que varíe con la naturaleza de la sustancia. En casos de este tipo, sostuvo Reichenbach, la teoría siempre puede ser reformulada para que el efecto universal desaparezca por completo.

Pero no hay una forma comparable para eliminar un efecto diferencial, como la expansión térmica. La afirmación de que no hay efectos de expansión térmica puede ser fácilmente refutada. Simplemente basta con poner dos varas de distintas sustancias una junto a la otra, calentarlas a la misma temperatura alta, y observar la diferencia en longitudes resultante. Claramente, algo ha cambiado, y no hay manera de dar cuenta de esta diferencia observada sin introducir el concepto de expansión térmica. Por otra parte, un efecto universal como la influencia de la gravedad sobre las longitudes de las varas *sí* explicarse adoptando una teoría en donde el efecto desaparezca por completo. Esto es exactamente lo que sucede en la teoría de la relatividad de Einstein. La adopción de un sistema espacio-temporal no euclidiano apropiado elimina la necesidad de hablar

---

<sup>17</sup> Véase la sección 6, "The Distinction between Universal and Differential Forces", en Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time* (Nueva York: Dover, 1958).

de cuerpos expandiéndose y contrayéndose en campos gravitacionales. Los cuerpos no alteran sus tamaños cuando se mueven alrededor de tales campos; pero en esta teoría hay una estructura espacio-temporal distinta. A diferencia de la situación anterior con respecto a la expansión térmica, no hay forma de mostrar que la eliminación de este efecto gravitacional sea imposible. Los campos gravitacionales tienen exactamente el mismo efecto sobre todas las sustancias. Si se ponen juntas dos barras y se les hace girar, permanecen con exactamente la misma longitud una con respecto a la otra.

En vista de estas consideraciones, Reichenbach propuso esta regla para simplificar la teoría física: *Siempre que haya un sistema de física, en donde se afirme un cierto efecto universal a partir de una ley que especifique bajo qué condición y en qué cantidad ocurre el efecto, la teoría debe transformarse de tal forma que la cantidad del efecto se reduzca a cero.* Esto es lo que hizo Einstein con respecto a la contracción y expansión de los cuerpos en campos gravitacionales. Desde el punto de vista euclidiano, sí ocurren tales cambios, pero resultan ser efectos universales. Sin embargo, la adopción del sistema espacio-temporal no euclidiano hace que estos efectos se vuelvan cero. Ciertamente podrán encontrarse otros efectos, como que los ángulos de un triángulo ya no suman  $180^\circ$ , pero ya no es necesario hablar de expansiones y contracciones de los cuerpos rígidos. Siempre que se encuentren efectos universales en la física, sostuvo Reichenbach, es posible eliminarlos a partir de una transformación apropiada de la teoría; tal transformación debe llevarse a cabo por lo que se gana en simplicidad total. Este es un principio general útil que merece más atención de la que hasta entonces se le ha prestado. Aplica no solamente a la teoría de la relatividad, sino también a situaciones que puedan surgir en el futuro, a situaciones en donde se descubran otros efectos universales. Sin la adopción de esta regla, no hay forma de ofrecer una única respuesta a la pregunta: ¿cuál es la estructura del espacio? Con su adopción, esta pregunta ya no es ambigua.

Cuando Einstein propuso por primera vez una geometría no euclidiana para el espacio, se plantearon fuertes objeciones. Ya mencionamos la objeción de Dingler y otros de que la geometría euclidiana era indispensable porque ya estaba presupuesta en la construcción de los instrumentos de medición, y mostramos que esta objeción es ciertamente equivocada. Una objeción más común, lanzada desde un punto de vista más filosófico, fue que la geometría no euclidiana no debe adoptarse porque es imposible imaginarla. Es contraria a nuestros modos de pensar, a nuestra intuición. Esta objeción a veces era expresada en una forma kantiana, a veces en una forma fenomenológica (la

terminología difería), pero, en general, el punto era que nuestras mentes parecen trabajar en una forma tal que no podemos visualizar ningún tipo de estructura espacial no euclidiana.

Este punto también lo discute Reichenbach,<sup>18</sup> y pienso que tiene razón al llamarlo un problema psicológico, y al decir que no hay bases para asumir que nuestra intuición ha sido preformada en una manera euclidiana. Sí hay, por el contrario, excelentes razones para creer que el espacio visual, por lo menos el espacio visual de un niño, es no euclidiano. La “intuición espacial”, como se le conoce, no es tanto la intuición de una estructura métrica sino más bien de una estructura topológica. Nuestra percepción nos dice que el espacio es tridimensional y continuo, y que cada punto tiene las mismas propiedades topológicas que cualquier otro punto. Pero, con respecto a las propiedades métricas del espacio, nuestras intuiciones son guías vagas e inexactas.

El carácter no euclidiano de la percepción espacial está indicado por la sorprendente habilidad de la mente para ajustarse a cualquier tipo de imágenes que aparezcan sobre la retina. Una persona con un fuerte astigmatismo, por ejemplo, tendrá imágenes fuertemente distorsionadas sobre la retina de cada uno de sus ojos. Sus imágenes retinales de una vara de medir podrán ser más largas cuando ve esa vara puesta horizontalmente que cuando la ve puesta verticalmente, pero no es consciente de esto, porque las longitudes de todos los objetos en su campo visual están igualmente distorsionadas. Cuando esta persona se coloca por primera vez gafas correctoras, su campo visual parecerá distorsionado por algunos días o incluso semanas, hasta que su cerebro se haya ajustado a las imágenes normales sobre su retina. De igual forma, una persona con visión normal puede ponerse gafas especiales que distorsionen las imágenes a lo largo de una coordenada, pero después de un tiempo se acostumbrará a las nuevas imágenes, y su campo visual parecerá normal. Helmholtz describió experimentos de este tipo, algunos de los cuales en realidad llevó a cabo, para concluir que el espacio visual puede tener una estructura no euclidiana. Helmholtz creía - y pienso que pueden darse buenos argumentos para esta creencia - que si un niño o incluso un adulto estuviese lo suficientemente condicionado a experiencias que supongan el comportamiento de cuerpos en un mundo no euclidiano, sería capaz de visualizar una estructura no euclidiana con la misma facilidad con la que puede visualizar una estructura euclidiana.

---

<sup>18</sup> *Ibíd.*, secciones 9-11.

Incluso si esta creencia de Helmholtz está infundada, existe un argumento más esencial en contra de la objeción de que no debe adoptarse la geometría no euclidiana porque ésta no puede ser imaginada. La habilidad para visualizar es una cuestión psicológica, completamente irrelevante para la física. La construcción de la teoría física no se ve limitada por el poder del hombre para visualizar; en realidad, la física moderna se ha alejado de manera constante de lo que puede ser directamente observado e imaginado. Incluso si la teoría de la relatividad contuviese desviaciones mucho más fuertes de la intuición y resultase que nuestra intuición espacial tiene una tendencia euclidiana permanente e invariable, podríamos utilizar, en la física, cualquier estructura geométrica que deseásemos.

En el siglo XIX, especialmente en Inglaterra, se hizo un gran esfuerzo en la física hacia la visualización y construcción de modelos. El éter era representado como una extraña especie de sustancia transparente, gelatinosa, capaz de oscilar y de transmitir ondas electromagnéticas. A medida que la física avanzó, este modelo del éter se volvió cada vez más complicado, e incluso adquirió propiedades que parecían ser incompatibles en un principio. Por ejemplo, se pensaba que el éter tenía que carecer por completo de densidad, porque no ofrecía resistencia observable al movimiento de los planetas y los satélites; con todo, se encontró que las ondas de luz son transversales y no longitudinales, más como se esperaría en cuerpos con una densidad *alta*. Aunque estas propiedades no eran lógicamente incompatibles, hicieron muy difícil desarrollar un modelo intuitivo satisfactorio del éter. Eventualmente, los diversos modelos del éter se volvieron tan complejos que ya no servían para ningún propósito útil. Esta es la razón por la que Einstein consideró mejor abandonar al éter por completo. Era más fácil aceptar las ecuaciones - las ecuaciones de Maxwell y Lorentz - y calcular con ellas que intentar construir un modelo tan bizarro que no representaba ayuda alguna al visualizar la estructura del espacio.

No sólo se renunció al éter. La tendencia del siglo XIX por construir modelos visuales se volvió cada vez más débil a medida que avanzaba la física del siglo XX. Las nuevas teorías eran tan abstractas que tenían que aceptarse por completo en sus propios términos. Las funciones  $\psi$ , representando los estados de un sistema físico, como un átomo, son demasiado complicadas como para permitir modelos que puedan ser visualizados fácilmente. Desde luego, a veces es posible que un profesor hábil o un autor de temas científicos recurran a un diagrama que resulte útil al explicar algún aspecto de una teoría abstrusa. No hay objeción para el uso de tales diagramas como

recursos de enseñanza. El punto es que no es una objeción válida a una nueva teoría física el decir que es más difícil de visualizar que una teoría física anterior. Este es exactamente el tipo de objeción que a veces se hacía contra la teoría de la relatividad cuando fue propuesta por primera vez. Recuerdo una ocasión, alrededor de 1930, en que discutí la relatividad con un físico alemán en Praga. Este físico estaba muy deprimido.

“Esto es terrible”, dijo. “¡Mira lo que Einstein le ha hecho a nuestra maravillosa física!”

“¿Terrible?”, le contesté. Yo estaba entusiasmado con la nueva física. Con unos cuantos principios generales describiendo un cierto tipo de invarianza y con la emocionante adopción de la geometría no euclidiana, ¡se podían explicar tantas cosas que antes eran ininteligibles! Pero este físico tenía una resistencia emocional tan fuerte hacia las teorías difíciles de visualizar que casi pierde todo su entusiasmo por la física debido a los revolucionarios cambios einsteinianos. La única cosa que lo mantuvo en pie fue la esperanza de que algún día - y esperó que viviría para verlo - un líder contrarrevolucionario restableciera el viejo orden clásico, en donde podría respirar tranquilamente de nuevo y sentirse como en casa.

Una revolución similar tuvo lugar en la física atómica. Por muchos años resultó agradable y satisfactorio contar con el modelo atómico de Niels Bohr, una especie de sistema planetario con un núcleo en el centro y con los electrones moviéndose en órbitas a su alrededor. Pero esto probó ser una simplificación excesiva. El físico nuclear de hoy en día ni siquiera intenta elaborar un modelo total. Si es que recurre a un modelo, siempre es consciente de que éste únicamente representa ciertos aspectos de la situación, y que deja fuera muchos otros aspectos. Ya no se requiere que el sistema total de la física sea uno en donde todas las partes de su estructura sean claramente visualizadas. Esta es la razón fundamental por la cual la declaración psicológica de que no es posible visualizar una geometría no euclidiana, incluso si fuese cierta (tengo mis dudas), no es una objeción válida a la adopción de un sistema físico no euclidiano.

Un físico siempre debe mantener la guardia ante considerar un modelo visual como algo más que un recurso pedagógico o una ayuda provisional. Al mismo tiempo, debe estar alerta ante la posibilidad de que un modelo visual pueda, y a veces lo hace, resultar literalmente exacto. De la naturaleza a veces brotan sorpresas así. Muchos años antes de que la física desarrollara cualesquiera nociones claras sobre cómo están conectados los átomos en las moléculas, era una práctica común trazar imágenes esquemáticas de la estructura molecular. Los átomos de una sustancia eran indicados

por medio de letras capitales, y se trazaban líneas de valencia para conectarlos de distintas formas. Recuerdo haber hablado con un químico que, ya en ese tiempo, tenía objeciones ante tales diagramas.

“Pero, ¿no resultan de gran ayuda?”, le pregunté.

“Sí”, dijo, “pero debemos alertar a nuestros estudiantes de que no deben pensar en estos diagramas como representando configuraciones espaciales reales. En realidad no sabemos nada acerca de la estructura espacial a nivel molecular. Estos diagramas no son más que diagramas, como la curva sobre una gráfica que ilustra un crecimiento poblacional o un aumento en la producción de hierro fundido. Todos sabemos que una curva así es sólo una metáfora. Ni la población ni la producción de hierro fundido crecen en un sentido espacial. Debe pensarse lo mismo de las imágenes moleculares. Nadie sabe qué tipo de estructura espacial real tienen las moléculas.”

Estuve de acuerdo con el químico, pero argumenté que por lo menos existía la posibilidad de que las moléculas podían unirse justo en la forma indicada por los diagramas, especialmente en vista del hecho de que se habían descubierto los estereoisómeros, que hacían conveniente pensar en una molécula como en la imagen de espejo de otra molécula. Si un tipo de azúcar gira luz polarizada en la dirección de las manecillas del reloj, y otro tipo de azúcar la gira en la dirección contraria, entonces parece indicarse alguna especie de configuración espacial de los átomos en las moléculas; configuraciones capaces de tener formas diestras y zurdas.

“Es cierto”, contestó, “que esto se ha sugerido. Pero no sabemos con certeza que este sea el caso.”

Tenía razón. En ese tiempo, se sabía tan poco de la estructura molecular que habría sido prematuro insistir en que, a medida que más se conociera sobre tal estructura, seguiría siendo posible representar moléculas por medio de modelos tridimensionales visualizables. Era concebible que observaciones futuras requerirían estructuras de cuatro, cinco, o seis dimensiones. Los diagramas no eran más que imágenes convenientes de lo que se sabía.

Pero resultó ser que, especialmente después de la determinación de estructuras cristalinas por medio de la difracción de rayos-X de Max von Laue, los átomos en compuestos moleculares *están* en realidad espacialmente situados en la forma mostrada por el diagrama de la estructura. Hoy en día, un químico no duda en decir que, en una molécula de proteína, hay ciertos átomos aquí y allá que están dispuestos en la forma de una hélice. Los modelos que muestran los vínculos de los átomos en el espacio

tridimensional se toman literalmente. No se ha encontrado evidencia alguna que dispute esto, y hay excelentes razones para pensar que los modelos tridimensionales de las moléculas representan configuraciones reales en el espacio tridimensional. Algo parecido ocurrió recientemente como consecuencia de experimentos mostrando que la paridad no se conserva en interacciones nucleares débiles. Ahora parece ser que las partículas y las antipartículas, consideradas hasta hace poco como imágenes de espejo únicamente en un sentido metafórico, en realidad son imágenes de espejo en un sentido espacial.

Por todo esto, la advertencia en contra de tomar los modelos literalmente, aunque correcta en principio, puede resultar innecesaria. Una teoría puede alejarse de modelos que puedan visualizarse; después, en una etapa posterior, cuando se sabe más, regresar a modelos visuales de los que antes se dudaba. En el caso de los modelos moleculares, fueron principalmente los físicos quienes los pusieron en duda. La imagen de átomos acomodados en moléculas espacialmente es tan conveniente que la mayoría de los químicos interpretaron los modelos de manera literal, aun cuando los físicos decían, con razón, que no había suficiente justificación para ello.

Los modelos en el sentido de estructuras espaciales visuales no deben confundirse con los modelos en el sentido matemático moderno. Hoy en día, la práctica común de los matemáticos, lógicos, y científicos es hablar de modelos cuando se refieren a una estructura conceptual abstracta, y no a algo que pueda construirse en un laboratorio con pelotas y alambres. Este modelo puede ser una ecuación matemática o un conjunto de ecuaciones. Es una descripción simplificada de cualquier estructura - física, económica, sociológica, etc. - en donde pueden relacionarse conceptos abstractos en una forma matemática. Es una descripción simplificada porque deja fuera muchos factores que de otra manera complicarían el modelo. El economista, por ejemplo, habla de un modelo para una economía de libre mercado, de otro para una economía centralizada, y así sucesivamente. El psicólogo habla de un modelo matemático para el proceso de aprendizaje, de cómo un estado psicológico está relacionado con otro con ciertas probabilidades transicionales que hacen que la serie sea una que los matemáticos conocen como cadena de Markov. Estos modelos son completamente distintos a los modelos de la física del siglo XIX. Su propósito no es visualizar, sino formalizar. El modelo es puramente hipotético. Dentro de él se ponen ciertos parámetros que se acomodan hasta que se obtenga el mejor ajuste con los datos disponibles. A medida que se hacen más observaciones, puede resultar no sólo que los parámetros tengan que

ajustarse aún más, sino también que las ecuaciones básicas tengan que ser cambiadas. En otras palabras, el modelo, por sí mismo, se ve alterado. El viejo modelo sirvió bien por un tiempo, pero ahora se requiere uno nuevo.

El modelo físico del siglo XIX no era un modelo en este sentido abstracto. Pretendía ser el modelo espacial de una estructura espacial, de la misma forma que el modelo de un barco o de un avión representa a un barco o avión reales. Claro está que el químico no piensa que las moléculas estén hechas de pequeñas pelotas de colores unidas por alambres; hay muchas características de este modelo que no deben tomarse literalmente. Pero, en su configuración espacial general, se considera como una imagen correcta de la configuración espacial de los átomos de la molécula real. Como hemos mostrado, a veces hay buenas razones para tomar literalmente a un modelo así (un modelo del sistema solar, por ejemplo, o de un cristal, o de una molécula). Incluso cuando no haya bases para tal interpretación, los modelos visuales pueden ser muy útiles. La mente trabaja intuitivamente, y a menudo a un científico puede resultarle muy provechoso el pensar con la ayuda de imágenes visuales. Al mismo tiempo, siempre debe tenerse consciencia de las limitaciones de un modelo. La construcción de un modelo visual ordenado no es garantía alguna de la solvencia de una teoría, ni la ausencia de un modelo visual es razón para rechazar una teoría.

## CAPÍTULO 18

### Los juicios sintéticos a priori de Kant

¿Es posible que el conocimiento sea sintético y a priori a la vez? Esta célebre pregunta fue hecha por Immanuel Kant y su respuesta fue afirmativa. Es importante comprender exactamente qué quiso decir Kant con esto, y por qué los empiristas contemporáneos no están de acuerdo con su respuesta.

En la pregunta kantiana están involucradas dos distinciones de suma importancia: una distinción entre lo *analítico* y lo *sintético*, y otra entre lo *a priori* y lo *a posteriori*. A estas distinciones se les han dado diversas interpretaciones, pero, en mi opinión, la primera es una distinción lógica y la segunda epistemológica.

Primero, consideremos la distinción lógica. La lógica se ocupa únicamente de si una declaración es verdadera o falsa sobre la base de los significados asignados a los términos de la declaración. Por ejemplo, definamos el término “perro” como sigue: “X es un perro si y sólo si X es un animal que tiene ciertas características.” Ser un animal, por lo tanto, es parte del significado del término “perro”. Si, sobre la base de este entendimiento, se afirma que “Todos los perros son animales”, entonces esto sería lo que Kant llamó un juicio analítico. No supone nada más que las relaciones de significado de los términos. Kant no lo estableció exactamente de esta manera, pero esto es esencialmente lo que quiso decir. Por otra parte, una declaración sintética, como “La luna gira alrededor de la Tierra”, tiene un contenido fáctico. Como la mayoría de las declaraciones científicas, es sintética porque va más allá de los significados asignados a los términos. Dice algo sobre la naturaleza del mundo.

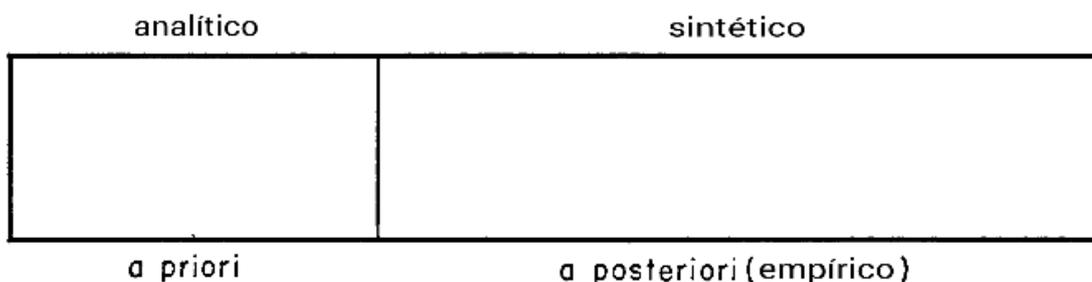
La distinción entre lo a priori y lo a posteriori es una distinción epistemológica entre dos tipos de conocimiento. Por a priori, Kant se refería al tipo de conocimiento que es independiente de la experiencia, pero no independiente en un sentido genético o psicológico. Era plenamente consciente de que todo conocimiento humano depende, en un sentido genético, de la experiencia. Sin experiencia, obviamente no habría conocimiento de ningún tipo. Pero ciertos tipos de conocimiento están apoyados por la experiencia en una forma que no es verdadera para otros tipos. Consideremos, por ejemplo, la declaración analítica “Todos los perros son animales.” No es necesario observar perros para afirmar esto; en realidad, ni siquiera es necesario que los perros

existan. Únicamente es necesario ser capaz de concebir una cosa como un perro, que ha sido definida en una forma tal que hace que ser un animal sea parte de la definición. Todas las declaraciones analíticas son a priori en este sentido. No es necesario referirse a la experiencia para justificarlas. Aunque también es verdad que nuestra experiencia con los perros pudo habernos llevado a concluir que los perros son animales. En un sentido amplio de la palabra experiencia, todo lo que sabemos está basado sobre ella. El punto es que nunca es necesario referirnos a la experiencia para justificar la verdad de una declaración analítica. No es necesario decir, “Ayer examiné algunos perros y algunos no perros; después examiné algunos animales y algunos no animales, y finalmente concluí que, sobre la base de esta investigación, todos los perros son animales.”. Por el contrario, la declaración “Todos los perros son animales” está justificada al señalar que, en nuestro lenguaje, se entiende que el término “perro” tiene un significado que incluye “ser un animal”. Está justificada de la misma forma que la verdad analítica de la declaración “Un unicornio tiene un solo cuerno en su cabeza” está justificada. Los significados de los términos implican la verdad de la declaración, sin referencia a ningún examen del mundo.

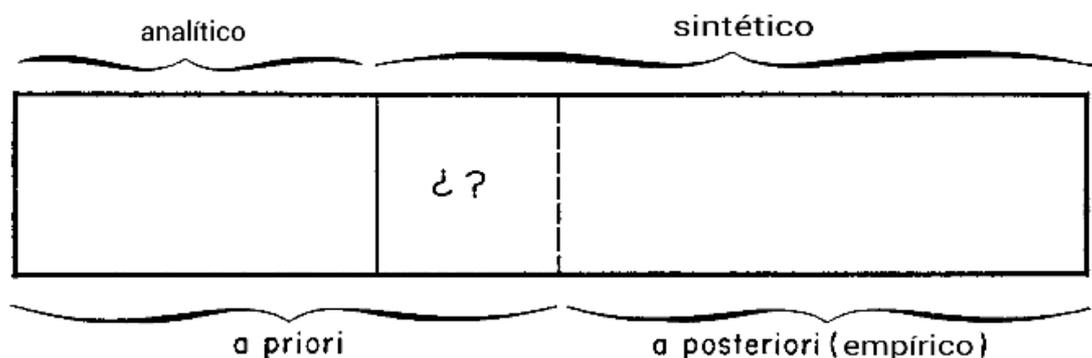
Por el contrario, las declaraciones a posteriori son afirmaciones que no pueden justificarse sin referencia alguna a la experiencia. Consideremos, por ejemplo, la declaración de que la Luna gira alrededor de la Tierra. Su verdad no puede justificarse mencionando el significado de términos como “Luna”, “Tierra”, y “gira alrededor”. Desde un punto de vista literal, por supuesto, “a priori” y “a posteriori” significan “anterior” y “posterior”, pero Kant dejó perfectamente claro que no se refería a esto en un sentido temporal. Nunca quiso decir que, en un conocimiento a posteriori, la experiencia ha ocurrido *antes* de adquirido el conocimiento; en este sentido, desde luego, la experiencia es anterior a *todo* conocimiento. Más bien quiso decir que la experiencia es una razón *esencial* para afirmar un conocimiento a posteriori. Sin determinadas experiencias específicas (en el caso de la revolución de la Luna alrededor de la Tierra, estas experiencias son diversas observaciones astronómicas), no es posible justificar una declaración a posteriori. En un sentido áspero, al conocimiento a posteriori hoy en día se le llamaría conocimiento empírico; es un conocimiento que depende, esencialmente, de la experiencia. El conocimiento a priori es independiente de la experiencia.

Como ya dijimos, todas las declaraciones analíticas son claramente a priori. Pero ahora surge una cuestión importante. ¿Coincide la línea divisoria entre lo a priori y lo a

posteriori con la línea divisoria entre lo analítico y lo sintético? Si ambas líneas coinciden, entonces pueden diagramarse como se muestra en la figura 18-1. Pero quizá no coinciden. La línea entre lo a priori y lo a posteriori no puede encontrarse a la izquierda de la línea entre lo analítico y lo sintético (porque todas las declaraciones analíticas son también a priori), pero sí puede encontrarse a la derecha, como se muestra en la figura 18-2. Si es así, entonces hay una región intermedia en donde lo sintético coincide con lo a priori. Esta es la perspectiva de Kant. Existe, sostuvo, un reino del conocimiento que es tanto sintético como a priori. Es sintético porque nos dice algo sobre el mundo, y es a priori porque puede conocerse con certeza, en una forma tal que no requiere justificación por parte de la experiencia. ¿Existe una región así? Esta es una de las cuestiones más controvertidas en la historia de la filosofía de la ciencia. Como Moritz Schlick observó alguna vez, el empirismo puede definirse como el punto de vista que mantiene que no hay juicios sintéticos a priori. Si todo el empirismo ha de ser comprimido en una cáscara de nuez, ésta es una forma de hacerlo.



**Figura 18-1.**



**Figura 18-2.**

La geometría proporcionó a Kant uno de sus principales ejemplos de conocimiento sintético a priori. Su razonamiento fue que, si consideramos los axiomas de la geometría (se refería a la geometría euclidiana, porque no había otra en su tiempo), no es posible imaginar que los axiomas no sean verdaderos. Por ejemplo, sólo hay una y

sólo una línea recta que pasa por dos puntos. Aquí, la intuición da una certeza absoluta. Es posible imaginar una línea recta que conecta dos puntos, pero cualquier otra línea concebida que pase por ellos debe ser curva, no recta. Por lo tanto, argumentó Kant, tenemos el derecho de tener plena confianza en el conocimiento de todos los axiomas de la geometría. Como todos los teoremas están lógicamente derivados de los axiomas, también tenemos derecho a tener total confianza en la verdad de los teoremas. La geometría, por consiguiente, es completamente cierta en una forma tal que no requiere justificación por parte de la experiencia. No es necesario hacer puntos en una hoja de papel y trazar distintas líneas para establecer la declaración de que sólo una línea recta conectará dos puntos. La declaración está justificada por la intuición y, aunque un teorema geométrico puede resultar ser muy complicado y no tan obvio, puede estar justificado al proceder de los axiomas por medio de pasos lógicos que también son intuitivamente ciertos. En breve, toda la geometría es a priori.

Por otra parte, prosiguió Kant, los teoremas de la geometría dicen algo sobre el mundo. Consideremos el teorema de que la suma de los ángulos internos de un triángulo es  $180^\circ$ . Esto puede derivarse lógicamente de los axiomas euclidianos, así que hay un conocimiento a priori de su verdad. Pero también es verdad que, si se traza un triángulo y se miden sus ángulos, uno encuentra que suman  $180^\circ$ . Si la suma se desvía de esto, un examen más cuidadoso de la construcción [del triángulo] siempre revelará que las líneas no eran perfectamente rectas, o que, quizá, las mediciones eran inexactas. Los teoremas de la geometría son, pues, más que declaraciones a priori. Describen la estructura real del mundo y son, por tanto, también sintéticas. Aunque claramente no son a posteriori en la forma en que lo son las leyes científicas. Una ley científica tiene que estar justificada por la experiencia. No es difícil imaginar que mañana podrá observarse un evento que contradiga cualquier ley científica dada. Es fácil suponer que la Tierra podría girar alrededor de la Luna, en lugar de viceversa, y nunca puede ser cierto que el día de mañana la ciencia no pueda hacer descubrimientos que requieran una modificación de lo que hasta ahora se ha supuesto como verdadero. Pero este no es el caso con las leyes geométricas. Es inconcebible que nuevos descubrimientos geométricos modifiquen la verdad del teorema pitagórico. La geometría euclidiana es intuitivamente cierta, independiente de la experiencia. En la geometría, Kant estaba convencido, tenemos un paradigma de la unión del conocimiento sintético y del conocimiento a priori.

Desde un punto de vista moderno, la situación parece ser muy distinta. A Kant no debe culpársele de su error porque, en su tiempo, la geometría no euclidiana aún no había sido descubierta. No era posible para él pensar en la geometría de cualquier otra forma. De hecho, a lo largo de todo el siglo XIX, con la excepción de algunos individuos audaces como Gauss, Riemann, y Helmholtz, incluso los matemáticos dieron por sentada esta perspectiva kantiana. Hoy en día es fácil ver el origen del error de Kant: fue una falla en darse cuenta de que hay dos tipos de geometría esencialmente distintos, uno matemático, el otro físico.

La geometría matemática es matemática pura. En términos kantianos, es tanto analítica como a priori. Pero no es posible decir que también es sintética. Es simplemente un sistema deductivo basado sobre ciertos axiomas que no deben interpretarse con referencia a ningún mundo existente. Esto puede demostrarse de muchas formas, y una de ellas la ofrece Bertrand Russell en su libro *The Principles of Mathematics* [*Los Principios de las Matemáticas*] (no debe confundirse con *Principia Mathematica*, que es posterior).<sup>19</sup> Russell muestra cómo es posible definir por completo al espacio euclidiano como un sistema de relaciones primitivas para las cuales se asumen ciertas propiedades estructurales; por ejemplo, una relación es simétrica y transitiva, otra es asimétrica, y así sucesivamente. Sobre la base de estos supuestos es posible derivar lógicamente un conjunto de teoremas para el espacio euclidiano, teoremas que abarcan toda la geometría euclidiana. Esta geometría no dice nada, en absoluto, sobre el mundo. Solamente dice que, si un determinado sistema de relaciones tiene ciertas propiedades estructurales, el sistema tendrá otras características que se seguirán lógicamente de la estructura supuesta. La geometría matemática es una teoría de estructura lógica. Es completamente independiente de las investigaciones científicas; únicamente se ocupa de las implicaciones lógicas de un conjunto de axiomas dado.

La geometría física, por otra parte, se ocupa de la aplicación de la geometría pura al mundo. Aquí, los términos de la geometría euclidiana conservan su significado ordinario. Un punto es una posición real en el espacio físico. Claro está que no podemos observar un punto geométrico, pero sí podemos aproximarnos a él poniendo, digamos, una pequeña mancha de tinta sobre una hoja de papel. De igual forma, podemos observar y trabajar con aproximaciones de líneas, planos, cubos, etc. Estas palabras se

---

<sup>19</sup> Véase la Parte VI de *The Principles of Mathematics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1903); (segunda edición, con una nueva introducción, Londres: Allen & Unwin, 1938); (Nueva York: Norton, 1938).

refieren a las estructuras reales en el espacio físico que habitamos, y son también parte del lenguaje de la geometría pura o matemática. Aquí yace, pues, una fuente primaria de la confusión reinante en el siglo XIX sobre la geometría. Como los científicos y los matemáticos puros utilizaban las mismas palabras, se asumió erróneamente que ambos hacían uso del mismo tipo de geometría.

La distinción entre las dos geometrías se volvió especialmente clara a partir del célebre trabajo de David Hilbert sobre los fundamentos de la geometría.<sup>20</sup> “Aquí estamos pensando en tres distintos sistemas de cosas”, escribió Hilbert, “A las cosas del primer sistema las llamaremos *puntos*, a las del segundo sistema *líneas*, y a las del tercer sistema *planos*.” Aunque llamó a estas entidades por los nombres de “puntos”, “líneas”, y “planos”, Hilbert no implicó nada sobre el significado de estas palabras. Era conveniente usarlas así porque resultaban más familiares, y porque proporcionaban al lector la visualización de una posible interpretación de los términos. Pero el sistema geométrico, tal como lo construyó Hilbert, estaba completamente libre de toda interpretación. “Puntos”, “líneas”, y “planos” podían significar cualesquiera tres clases de entidades que satisficieran las relaciones establecidas en los axiomas. Por ejemplo, en lugar de puntos, líneas, y planos físicos, uno podría interpretar “punto” como un triple ordenado de números reales. Una “línea” sería entonces una clase de triples ordenados de números reales que satisfaga dos ecuaciones lineales, y un “plano” sería una clase de triples ordenados que satisfaga una ecuación lineal. En la geometría pura o matemática, los términos como “puntos”, “líneas”, y “planos” no se utilizan en el sentido ordinario. Tienen una infinitud de posibles interpretaciones.

Una vez comprendida esta distinción entre geometría pura y geometría física, es claro cómo la creencia de Kant, y las creencias de casi todos los filósofos del siglo XIX, suponían una confusión fundamental entre dos campos de carácter muy distinto. Cuando decimos, “La geometría es ciertamente a priori; no hay duda sobre la verdad de sus teoremas”, estamos pensando en geometría matemática. Pero supongamos que añadimos, “También nos dice algo sobre el mundo. Con su ayuda, podemos predecir el resultado de las mediciones hechas sobre las estructuras geométricas reales.” Ahora nos hemos deslizado, inadvertidamente, sobre el otro significado de geometría. Estamos hablando de geometría física; estamos hablando de la estructura del espacio real. La

---

<sup>20</sup> El trabajo de Hilbert, *Grundlagen der Geometrie (Fundamentos de la geometría)*, apareció publicado por primera vez en Alemania en 1899. En 1902 se publicó en Chicago (Open Court) una traducción al inglés hecha por E. J. Townsend, disponible ahora como libro de bolsillo.

geometría matemática es a priori. La geometría física es sintética. Ninguna geometría es ambas cosas. En efecto, si aceptamos el empirismo, no hay conocimiento de ningún tipo que sea a priori y sintético a la vez.

En lo referente al conocimiento geométrico, la distinción entre ambos tipos de geometría es fundamental, y es ahora reconocida universalmente. Cuando se lanza un desafío sobre la naturaleza del conocimiento geométrico, lo primero a preguntar es: “¿Qué tipo de geometría se tiene en mente? ¿Estamos hablando de geometría matemática o física?” Aquí es esencial una clara distinción si uno quiere evitar confusiones, y si han de ser comprendidos los revolucionarios avances en la teoría de la relatividad.

Una de las exposiciones más claras y precisas de esta distinción fue hecha por Einstein al cierre de una conferencia titulada “Geometría y Experiencia”.<sup>21</sup> Einstein habló de “matemáticas”, pero se refería a la geometría en las dos formas en que puede ser entendida. “En tanto los teoremas de las matemáticas sean sobre la realidad”, dijo, “no son ciertos.” En terminología kantiana, esto significa que, en tanto sean sintéticos, no son a priori. “Y en tanto sean ciertos”, continuó, “no son sobre la realidad.” En terminología kantiana, en tanto sean a priori, no son sintéticos.

Kant sostuvo que el conocimiento a priori es conocimiento cierto; no puede ser contradicho por la experiencia. La teoría de la relatividad dejó en claro, para todos los que la comprendieron, que, si la geometría es considerada en este sentido a priori, no nos dice nada sobre la realidad. No es posible ninguna declaración que combine certeza lógica con conocimiento de la estructura geométrica del mundo.

---

<sup>21</sup> La conferencia de Einstein fue publicada, por separado, como *Geometrie und Erfahrung* (Berlín: 1921), y después traducida e incluida en Albert Einstein, *Sidelights on Relativity* (Nueva York: Dutton, 1923).

## Parte IV

# CAUSALIDAD Y DETERMINISMO

## CAPÍTULO 19

### Causalidad

El concepto de causalidad, uno de los temas centrales de la filosofía de la ciencia contemporánea, ha ocupado la atención de distinguidos filósofos desde el tiempo de los antiguos griegos hasta el presente. En épocas anteriores, era un tema propio de lo que se conocía como filosofía de la naturaleza. Este campo abarcaba tanto la investigación empírica de la naturaleza como la clarificación filosófica de tal conocimiento. Hoy en día se ha hecho cada vez más evidente que la investigación de la naturaleza corresponde al científico empírico, y no al filósofo propiamente dicho.

Claro está que un filósofo puede ser un filósofo y un científico. Si es el caso, debe estar consciente de la diferencia fundamental que existe entre dos tipos de preguntas que puede hacer. Si hace preguntas del tipo, “¿Cómo se formaron los cráteres de la Luna?”, o, “¿Hay alguna galaxia compuesta de antimateria?”, está planteando preguntas para los astrónomos y para los físicos. Por otra parte, si dirige sus preguntas, no hacia la naturaleza del mundo, sino hacia un análisis de los conceptos fundamentales de alguna ciencia, entonces está planteando preguntas en la filosofía de la ciencia.

En épocas anteriores, los filósofos creían que había una metafísica de la naturaleza, un campo de conocimiento más profundo y más fundamental que cualquier ciencia empírica. La tarea del filósofo consistía en exponer verdades metafísicas. Empero, los filósofos de la ciencia contemporáneos no creen que haya tal metafísica. La vieja filosofía de la naturaleza ha sido remplazada por la filosofía de la ciencia. Esta nueva filosofía no se ocupa del descubrimiento de hechos y leyes (la tarea del científico empírico), ni de la formulación de una metafísica sobre el mundo. En lugar de esto, dirige su atención hacia la propia ciencia, estudiando los conceptos empleados, los métodos utilizados, los posibles resultados, las formas de las declaraciones, y los tipos de lógica que resultan aplicables. En otras palabras, se ocupa del tipo de problemas

discutidos en este libro. El filósofo de la ciencia estudia los fundamentos filosóficos (esto es, los fundamentos lógicos y metodológicos) de la psicología, y no la “naturaleza de la mente”. Estudia los fundamentos filosóficos de la antropología, y no la “naturaleza de la cultura”. En cada campo, la principal preocupación tiene que ver con los conceptos y métodos de tal campo.

Algunos filósofos han advertido en contra de hacer una distinción demasiado fuerte entre el trabajo de los científicos en un campo determinado y el trabajo del filósofo de la ciencia que se ocupa de ese campo. En cierto sentido, esta advertencia es buena. Aunque el trabajo del científico empírico y el trabajo del filósofo de la ciencia siempre deben ser distinguidos, en la práctica ambos campos suelen entremezclarse. Un físico se hace constantemente preguntas metodológicas. ¿Qué tipo de conceptos debe usar? ¿Qué reglas gobiernan a estos conceptos? ¿A partir de qué método lógico puede definir sus conceptos? ¿Cómo puede poner sus conceptos en declaraciones y éstas en un sistema o teoría lógicamente conectado? Todas estas preguntas las debe responder como un filósofo de la ciencia; claramente, no pueden ser respondidas a partir de procedimientos empíricos. Por otra parte, resulta imposible hacer un trabajo significativo en la filosofía de la ciencia sin conocer mucho sobre los resultados empíricos de la ciencia. En este libro, por ejemplo, ha sido necesario hablar bastante sobre algunas características particulares de la teoría de la relatividad. No discutimos otros detalles de esta teoría porque la introducimos principalmente para clarificar la importante distinción entre la geometría empírica y la geometría pura o matemática. A menos que un estudiante de filosofía de la ciencia comprenda a fondo una ciencia, no podrá siquiera plantear cuestiones importantes sobre sus conceptos y métodos.

Mi razón para distinguir la tarea del filósofo de la ciencia de la tarea metafísica de su predecesor, el filósofo de la naturaleza, es que esta distinción es importante para el análisis de la causalidad, el tema de este capítulo. Los filósofos antiguos se ocupaban de la naturaleza metafísica de la propia causalidad. Aquí, nuestra ocupación es estudiar cómo los científicos empíricos hacen uso del concepto de causalidad, aclarar, de manera precisa, qué quieren decir cuando afirman que “Esto es la causa de aquello.”. ¿Exactamente qué significa la relación causa y efecto? En la vida cotidiana, el concepto es ciertamente vago. Incluso en la ciencia, no resulta siempre claro qué quiere decir un científico cuando afirma que un evento ha “causado” otro. Una de las tareas más importantes de la filosofía de la ciencia es analizar el concepto de causalidad y clarificar su significado.

Inclusive el origen histórico del concepto es un tanto vago. Aparentemente surgió como un tipo de proyección de la experiencia humana en el mundo de la naturaleza. Cuando uno empuja una mesa, siente tensión en los músculos. Cuando se observa algo similar en la naturaleza, como una bola de billar golpeando otra, es fácil imaginar que la bola tiene una experiencia análoga a nuestra experiencia de empujar una mesa. La bola que golpea es el agente. *Hace* algo a la otra bola que ocasiona que se mueva. No es difícil ver cómo es que los hombres de culturas primitivas podrían haber supuesto que los elementos de la naturaleza estaban animados, como estaban ellos mismos, por almas que querían que ciertas cosas sucediesen. Esto es especialmente comprensible con respecto a los fenómenos naturales que causan grandes daños. A una montaña se le culparía por causar un deslizamiento. A un tornado se le culparía por destruir un pueblo.

Hoy en día, este enfoque antropomórfico de la naturaleza ya no es sostenido por el hombre civilizado, y ciertamente tampoco por los científicos. Sin embargo, tienden a persistir algunos elementos de pensamiento animista. Si una piedra rompe una ventana, ¿tuvo la intención de hacerlo? Desde luego que no, dirá el científico. Una piedra es una piedra, y no posee un alma capaz de intención alguna. Por otro lado, la mayoría de las personas, incluso los propios científicos, no dudarían en decir que el evento *b*, la ruptura de la ventana, fue *causado* por el evento *a*, la colisión de la piedra con el vidrio. ¿Qué quiere decir el científico cuando dice que el evento *b* fue causado por el evento *a*? Podrá decir que el evento *a* “provocó” el evento *b*, o que “produjo” el evento *b*. Como ven, cuando intenta explicar el significado de “causa”, vuelve a caer en frases como “provocar”, “dar a luz”, “crear”, y “producir”. Estas son frases metafóricas, tomadas de la actividad humana. Una actividad humana, en un sentido literal, puede provocar, crear, y producir distintos eventos; pero en el caso de la piedra, esto no puede tomarse literalmente. No es, pues, una respuesta muy satisfactoria a la pregunta: “¿Qué significa decir que un evento causó otro?”.

Es importante analizar este vago concepto de causalidad para purificarlo de los componentes viejos, no científicos, que puedan estar involucrados. Pero antes una aclaración: no creo que haya razón alguna para rechazar el concepto de causalidad. Algunos filósofos afirman que David Hume, en su célebre crítica a la causalidad, quiso rechazar el concepto *in toto*. No creo que esta haya sido la intención de Hume. Nunca quiso rechazar el concepto, sino purificarlo. Más adelante consideraremos de nuevo esta cuestión, pero ahora quiero decir que lo que Hume rechazó fue el componente de

necesidad en el concepto de causalidad. Su análisis fue en la dirección correcta, aunque, en la opinión de algunos filósofos de la ciencia contemporáneos, no fue lo suficientemente lejos, ni fue lo suficientemente claro. En mi opinión, no es necesario considerar a la causalidad como un concepto precientífico, metafísico en un sentido despectivo y que, por tanto, deba rechazarse. Después de analizado y completamente explicado el concepto, descubriremos que permanece algo que puede llamarse causalidad; este algo justifica su uso por siglos, tanto por los científicos como en la vida cotidiana.

Empezamos con el análisis preguntando: ¿entre qué tipos de entidades se mantiene la relación causal? Estrictamente hablando, no es una *cosa* lo que causa un evento, sino un *proceso*. En la vida cotidiana hablamos de ciertas cosas causando eventos. Lo que en realidad queremos decir es que ciertos procesos o eventos causan otros procesos o eventos. Decimos que el Sol causa que las plantas crezcan. Lo que realmente queremos decir es que la radiación del Sol, un proceso, es la causa. Pero si hacemos que los “procesos” o los “eventos” sean las entidades involucradas en las relaciones de causa y efecto, debemos definir estos términos en un sentido extremadamente amplio. Debemos incluir, como *no* lo hacemos en la vida cotidiana, procesos estáticos.

Consideremos, por ejemplo, una mesa. Podemos observar que nada en ella está cambiando. Ayer pudo haber sido movida, en el futuro podrá ser dañada o destruida, pero, por el momento, no observamos ningún cambio. Podemos asumir que su temperatura, su masa, incluso la reflexión de la luz sobre su superficie, etc., permanecen sin cambios por un cierto periodo. Este evento, la mesa existiendo sin cambios, es también un proceso. Es un proceso *estático*, uno en donde las magnitudes relevantes permanecen constantes en el tiempo. Si se habla de los procesos o eventos como involucrados en las relaciones de causa y efecto, debe reconocerse que estos términos incluyen procesos estáticos; representan cualquier secuencia de estados en un sistema físico, tanto mutable como inmutable.

A veces se dice que las *circunstancias* o *condiciones* son causas o efectos. Esto también es una forma permisible de hablar, y aquí no hay peligro de que los términos sean tomados en un sentido muy estricto, porque una condición estática o constante es también una condición. Supongamos que investigamos la causa de la colisión entre dos coches en una carretera. Debemos estudiar no sólo las condiciones cambiantes - cómo se movían los coches, el comportamiento de los conductores, etc. - sino también las

condiciones constantes al momento de la colisión. Debemos investigar el estado de la superficie del camino. ¿Estaba seco o mojado? ¿Brillaba el Sol directamente en la cara de uno de los conductores? Preguntas como éstas pueden resultar importantes al momento de determinar las causas del choque. Para hacer un análisis completo de las causas, debemos investigar todas las condiciones relevantes, tanto las constantes como las cambiantes. Puede ser que muchas condiciones distintas hayan contribuido de manera importante en el resultado final.

Cuando un hombre muere, un doctor debe establecer la causa de la muerte. Podrá escribir “tuberculosis”, como si una sola cosa hubiera causado la muerte. En la vida cotidiana, a menudo exigimos una sola causa para un evento (*la* causa de la muerte, *la* causa de la colisión). Pero cuando examinamos la situación con más cuidado, vemos que pueden ofrecerse muchas respuestas, dependiendo del punto de vista desde el que se haya planteado la cuestión. Un ingeniero podrá decir: “Pues bien, he dicho muchas veces que esta es una superficie poco favorable para una carretera. Es muy resbaladiza cuando está mojada. ¡Ahora tenemos otro accidente para probarlo!” De acuerdo con este ingeniero, el accidente fue causado por la carretera resbaladiza. Está interesado en el evento desde *su* punto de vista, y elige esto como *la* causa. En un aspecto, tiene razón. Si se hubiese seguido su advertencia y si se le hubiese puesto otra superficie a la carretera, no habría estado tan resbaladiza. Otras cosas siendo las mismas, el accidente pudo no haber ocurrido. Es difícil estar seguro de esto en cualquier caso particular, pero por lo menos hay una buena posibilidad de que el ingeniero esté en lo correcto. Cuando sostiene que “esta es la causa”, quiere decir: esta es una condición importante de un tipo tal que, si no hubiese estado ahí, el accidente pudo no haber tenido lugar.

Otras personas podrán mencionar otras condiciones como la causa del accidente. El policía de tránsito que estudia las causas de los accidentes querrá saber si cualquiera de los conductores violó alguna ley de tránsito. Su trabajo consiste en supervisar tales actividades, y si descubre que se han violado ciertas leyes, se referirá a tal violación como la causa del accidente. Un psicólogo que entrevista a alguno de los conductores podrá concluir que el conductor se encontraba en un estado de ansiedad; estaba tan absorto en sus preocupaciones que no prestó la suficiente atención al otro coche. El psicólogo dirá que el perturbado estado mental de este hombre fue la causa del accidente. Está eligiendo el factor, de entre toda la situación, que más le concierne. Para él, esta es la causa interesante, decisiva. También podrá tener razón, porque, si el hombre no se hubiese encontrado en un estado de ansiedad, el accidente pudo no haber

ocurrido (o probablemente pudo no haber ocurrido). Un ingeniero automotriz podrá encontrar otra causa, como un defecto en la estructura de uno de los coches. Un mecánico podrá señalar que los frenos de uno de los coches estaban desgastados. Cada persona, viendo todo el cuadro desde su punto de vista, encontrará una determinada condición de tal suerte que pueda decir correctamente: si tal condición no hubiese existido, el accidente podría no haber ocurrido.

Pero ninguno de estos hombres ha respondido la pregunta más general: ¿cuál fue *la* causa del accidente? Únicamente han ofrecido una serie de respuestas parciales, señalando ciertas condiciones especiales que contribuyeron al resultado final. Ninguna causa puede identificarse como *la* causa. Existen muchos componentes relevantes en una situación compleja, y cada uno contribuye al accidente en el sentido de que, si el componente hubiese estado ausente, el choque pudo no haber ocurrido. Si se encuentra una relación causal entre el accidente y un evento previo, entonces el evento previo debe ser *toda* la situación anterior. Cuando se dice que esta situación anterior “causó” el accidente, lo que se quiere decir es que, dada la situación anterior con todos sus innumerables detalles, y dadas todas las leyes relevantes, el accidente pudo haber sido previsto. Nadie conocía, desde luego, o pudo haber conocido, *todos* los hechos y todas las leyes relevantes. Pero *si* alguien las hubiese conocido, habría podido prever la colisión. Las “leyes relevantes” no sólo incluyen leyes físicas y tecnológicas (como la fricción sobre el camino, el movimiento de los coches, el funcionamiento de los frenos, etc.), sino también leyes fisiológicas y psicológicas. Tanto el conocimiento de todas estas leyes así como el de todos los hechos individuales relevantes deben estar presupuestos antes de poder decir que el resultado es predecible.

El resultado de este análisis puede resumirse así: *las relaciones causales significan previsibilidad*. Esto no quiere decir previsibilidad real, porque nadie pudo haber conocido todos los hechos y leyes relevantes. Quiere decir previsibilidad en el sentido de que, *si* se hubiese conocido toda la situación anterior, se podría haber previsto el evento. Es por esta razón que cuando utilizo el término “previsibilidad” me refiero a él en un sentido un tanto metafórico. No implica la posibilidad de que alguien en realidad prevea algún evento, sino más bien de una previsibilidad potencial. Dados todos los hechos relevantes y todas las leyes naturales relevantes, habría sido posible prever el evento antes de que sucediera. Esta predicción es una consecuencia lógica de los hechos y de las leyes. En otras palabras, existe una relación lógica entre la descripción completa de una condición previa, las leyes, y la predicción del evento.

En principio, es posible conocer los hechos individuales relevantes involucrados en la situación anterior. (Aquí estamos ignorando la dificultad práctica de obtener todos los hechos, así como las limitaciones impuestas, en principio, por la teoría cuántica sobre conocer todos los hechos en un nivel subatómico.) Con respecto al conocimiento de las leyes relevantes surge un problema mucho mayor. Cuando definimos una relación causal diciendo que un evento puede ser inferido lógicamente de un conjunto de hechos y leyes, ¿qué queremos decir con “leyes”? Es tentador decir: Nos referimos a aquellas leyes que se encuentran en los libros de texto de las diversas ciencias involucradas en la situación; más precisamente, a todas aquellas leyes relevantes conocidas en el tiempo del evento. En lenguaje formal, un evento  $Y$  en el tiempo  $T$  es causado por un evento anterior  $X$ , si y sólo si  $Y$  es deducible de  $X$  con la ayuda de las leyes  $L_T$  conocidas en el tiempo  $T$ .

Es fácil ver que esta no es una definición muy útil de la relación causal. Consideremos el siguiente contraejemplo. Existe el reporte histórico de un evento  $B$  que tuvo lugar en la antigüedad, y que siguió a un evento  $A$ . Las personas viviendo en el tiempo  $T_1$  no podían explicar  $B$ . Ahora  $B$  puede ser explicado con la ayuda del conocimiento de ciertas leyes  $L^*$ , al mostrar que  $B$  se sigue lógicamente de  $A$  y  $L^*$ . Pero en el tiempo  $T_1$  las leyes  $L^*$  no eran conocidas, así que el evento  $B$  no podía explicarse como efecto del evento  $A$ . Supongamos que, en el tiempo  $T_1$ , un científico afirmó, a manera de hipótesis, que el evento  $B$  fue causado por el evento  $A$ . Mirando hacia atrás, se diría que su hipótesis es verdadera, aunque el científico no pudo probarla. Era incapaz de probarla porque las leyes que conocía,  $L_{T_1}$ , no incluían a las leyes  $L^*$ , que son esenciales para la prueba. Sin embargo, si aceptamos la definición de relación causal ofrecida en el párrafo anterior, será necesario decir que la afirmación del científico es falsa. Es falsa porque no es capaz de deducir  $B$  de  $A$  y de  $L_{T_1}$ . En otras palabras, su afirmación debe ser llamada falsa incluso si hoy se sabe que es verdadera.

La inconveniencia de la definición propuesta es también evidente cuando reflexionamos sobre el hecho de que los conocimientos actuales de las leyes científicas están muy lejos de ser completos. Los científicos contemporáneos saben más que los científicos de cualquier periodo anterior, pero ciertamente saben menos que lo que sabrán los científicos dentro de cien años (asumiendo que la civilización no es destruida por un holocausto). En ningún momento la ciencia posee un conocimiento completo de todas las leyes de la naturaleza. Pero como mostramos antes, es a todo el sistema de

leyes, y no sólo a las leyes conocidas en un tiempo particular, a lo que debemos referirnos para obtener una definición adecuada de causalidad.

¿Qué se quiere decir cuando se afirma que el evento  $B$  es causado por el evento  $A$ ? Se quiere decir que hay ciertas leyes en la naturaleza de las cuales puede deducirse lógicamente el evento  $B$  cuando éstas son combinadas con la descripción completa del evento  $A$ . Si pueden o no establecerse las leyes  $L$  es irrelevante. Desde luego, es relevante si se demanda una prueba de que la afirmación es *verdadera*. Pero no es relevante para ofrecer el *significado* de la afirmación. Esto es lo que provoca que el análisis de la causalidad sea una tarea tan difícil y precaria. Cuando se menciona una relación causal, siempre hay una referencia implícita a ciertas leyes de la naturaleza no especificadas. Sería mucho más emocionante, demasiado lejos de la costumbre actual, demandar que, cada vez que alguien afirma que “ $A$  fue la causa de  $B$ ”, deba establecer todas las leyes involucradas. Claro está que si puede establecer todas las leyes relevantes, entonces habrá probado su afirmación. Pero no debe demandarse una prueba de este tipo antes de que su afirmación se acepte como significativa.

Supongamos que se hace la apuesta de que lloverá de hoy en cuatro semanas. Nadie sabe si la predicción es correcta o incorrecta. Pasarán cuatro semanas antes de que se decida la cuestión. No obstante esto, la predicción es claramente significativa. Los empiristas tienen razón, por supuesto, cuando dicen que una declaración carece de significado a menos que, por lo menos en principio, sea posible encontrar evidencia que confirme o no la declaración. Pero esto no quiere decir que una declaración sea significativa si y sólo si es posible decidir *hoy* sobre su verdad. La predicción de la lluvia es significativa, incluso cuando su verdad o falsedad no pueda decidirse ahora. La afirmación de que  $A$  es la causa de  $B$  también es una afirmación significativa, aunque uno sea incapaz de especificar las leyes necesarias para probarla. Significa que, *si* fuesen conocidos todos los hechos que rodean a  $A$ , junto con todas las leyes relevantes, entonces podría predecirse la ocurrencia de  $B$ .

De esto surge una cuestión difícil. ¿Implica esta definición de relación causa y efecto que el efecto se sigue *necesariamente* de la causa? La definición no habla de necesidad. Simplemente dice que el evento  $B$  puede predecirse si se conociesen todos los hechos y leyes relevantes. Pero quizá esto plantea la pregunta. El metafísico que desea introducir la necesidad en la definición de causalidad puede argumentar lo siguiente: “Es cierto que no se utiliza la palabra ‘necesidad’. Pero se está hablando de leyes, y las leyes son declaraciones de necesidad. Por lo tanto, la necesidad viene a

cuento después de todo. Es un componente indispensable de cualquier afirmación sobre una relación causal.”

En el siguiente capítulo consideraremos qué puede responderse a este argumento.

## CAPÍTULO 20

### ¿La causalidad implica necesidad?

¿Las leyes implican necesidad? A veces los empiristas formulan su posición como sigue: una ley es simplemente una declaración condicional universal. Es universal porque habla en un sentido general: “En cualquier tiempo, en cualquier lugar, si hay un cuerpo o sistema físico en un cierto estado, entonces seguirá otro estado específico.” Es una declaración si-entonces en forma general con respecto al tiempo y al espacio. A este enfoque a veces se le conoce como “condicionalismo”. Una ley causal simplemente establece que, siempre que ocurre un evento del tipo  $P$  (donde  $P$  no es un solo evento sino una clase de eventos), entonces seguirá un evento del tipo  $Q$ . En forma simbólica:

$$(1) (x)(Px \supset Qx)$$

Esta declaración afirma que, en cada punto espacio-temporal  $x$ , si se mantiene  $P$ , se mantendrá la condición  $Q$ .

Algunos filósofos se oponen enérgicamente a este enfoque. Aseguran que una ley de la naturaleza afirma mucho más que sólo una declaración condicional universal de la forma si-entonces. Para comprender su objeción, es necesario revisar exactamente qué se quiere decir con una declaración de la forma condicional. En lugar de la declaración universal (1), consideremos un caso particular para el punto espacio-temporal  $a$ .

$$(2) Pa \supset Qa$$

El significado de esta declaración, “Si  $P$  ocurre en  $a$ , entonces  $Q$  ocurre en  $a$ ” está dado por su tabla de verdad. Existen cuatro posibles combinaciones de los valores de verdad para los dos componentes en la declaración:

1. “*Pa*” es verdadero, “*Qa*” es verdadero.
2. “*Pa*” es verdadero, “*Qa*” es falso.
3. “*Pa*” es falso, “*Qa*” es verdadero.
4. “*Pa*” es falso, “*Qa*” es falso.

La marca en forma de herradura para la implicación, " $\supset$ ", debe comprenderse en una forma tal que (2) afirme no más de que la segunda combinación de valores de verdad no se mantiene. No dice nada sobre una conexión causal entre *Pa* y *Qa*. Si “*Pa*” es falso, la declaración condicional se mantiene independientemente de si “*Qa*” es verdadero o falso. Y si “*Qa*” es verdadero, se mantiene independientemente de si “*Pa*” es verdadero o falso. Sólo no se mantiene cuando “*Pa*” es verdadero y “*Qa*” es falso.

Evidentemente, esta no es una interpretación fuerte de una ley. Cuando se dice, por ejemplo, que el hierro se expande cuando es calentado, ¿se dice algo más de que un evento sigue a otro? También podría decirse que, cuando el hierro es calentado, la Tierra girará. Esta también es una declaración condicional, pero no sería una ley, porque no hay razón para creer que la rotación de la Tierra tenga algo que ver con el calentamiento de un pedazo de hierro. Por otro lado, cuando se establece una ley en forma condicional, ¿no lleva consigo un componente de significado que asegura algún tipo de conexión entre ambos eventos, una conexión que va mucho más allá del simple hecho de que si un evento ocurre el otro le seguirá?

Es cierto que generalmente se da por entendido algo más cuando se afirma una ley, pero analizar qué es exactamente este “algo más” resulta muy difícil. Aquí nos encontramos de nuevo con el problema de decidir exactamente qué constituye el “contenido cognitivo” de una declaración en castellano. El contenido cognitivo es lo que se afirma por la declaración, y que es capaz de ser o verdadero o falso. A menudo es extremadamente difícil decidir exactamente qué pertenece al contenido cognitivo de una declaración y qué pertenece a los componentes de significado no cognitivo que están ahí pero que son irrelevantes al significado cognitivo de la declaración.

Un ejemplo de este tipo de ambigüedad es el caso de un testigo que dice: “Desafortunadamente, el camión golpeó al Sr. Smith y fracturó su cadera izquierda.” Otro testigo introduce evidencia que claramente muestra que el testigo anterior no pensó que esto fuese “desafortunado” en absoluto. En realidad, estaba muy satisfecho viendo al Sr. Smith lesionado. ¿Mintió o no cuando utilizó la palabra “desafortunadamente”? Si se establece que el testigo no lamentó el accidente, entonces claramente su uso de la

palabra “desafortunadamente” fue engañoso. Desde este punto de vista, podría decirse que miente. Pero desde el punto de vista de la corte, asumiendo que la declaración fue hecha bajo juramento, la cuestión del perjurio es difícil de resolver. Quizá el jurado razone que el uso de la palabra “desafortunadamente” no tuvo nada que ver con el contenido real de la declaración. El camión le pegó al Sr. Smith y fracturó su cadera. El testigo habló de esto como desafortunado para dar la impresión de que se lamentaba del incidente aunque, en realidad, no lo hacía. Pero esto no es relevante para la afirmación central de esta oración.

Si el testigo hubiese dicho, “El Sr. Smith fue golpeado por el camión, y lamento mucho que esto le sucediese”, su declaración de lamento habría sido más explícita, y quizá la cuestión de perjurio sería más pertinente. En cualquier caso, es evidente que a menudo no es fácil decidir qué pertenece al contenido cognitivo de una afirmación y qué es meramente un factor de significado no cognitivo. El castellano tiene una gramática, pero carece de reglas que especifiquen qué debe y qué no debe considerarse relevante para el valor de verdad de una oración. Si alguien dice “desafortunadamente” cuando en realidad no se lamenta, ¿es falsa su declaración? No hay nada en un diccionario o en un libro de gramática que nos ayude a responder esto. Lo único que pueden hacer los lingüistas es informar cómo es que las personas de una cultura toman ciertas declaraciones; no pueden elaborar reglas para decidir la cuestión en cada caso dado. Ante la ausencia de tales reglas, no es posible realizar un análisis preciso del contenido cognitivo de determinadas declaraciones ambiguas.

Exactamente la misma dificultad se presenta al intentar decidir si una oración de la forma " $(x)(Px \supset Qx)$ " es la formulación completa de una ley o si deja fuera algo esencial. Desde que la filosofía de la ciencia comenzó a formular leyes con la ayuda del símbolo " $\supset$ ", la conectiva de la implicación material, se han alzado voces en contra de esta formulación. Llamar a algo una “ley de la naturaleza”, sostienen algunos filósofos, es decir mucho más de que un evento sigue a otro. Una ley implica que el segundo evento *debe* seguir. Hay algún tipo de conexión *necesaria* entre *P* y *Q*. Antes de evaluar a detalle esta objeción, primero debemos averiguar qué es exactamente lo que estos filósofos quieren decir con “necesidad”, y, segundo, si este significado pertenece al contenido cognitivo de la declaración de una ley.

Muchos filósofos han intentado explicar qué quieren decir con “necesidad” cuando ésta se aplica a las leyes de la naturaleza. Un autor alemán, Bernhard Bavink, incluso llegó a decir (en su trabajo *Ergebnisse und Probleme der Naturwissenschaften*)

que la necesidad en las leyes de la naturaleza es una necesidad lógica. La mayoría de los filósofos de la ciencia rechazarían esta afirmación. En mi opinión, es completamente incorrecta. “Necesidad lógica” significa “validez lógica”. Una declaración es lógicamente válida sólo si no dice nada sobre el mundo. Es verdadera únicamente en virtud de los significados de los términos que tienen lugar en ella. Pero las leyes de la naturaleza son contingentes, esto es, para cualquier ley es muy fácil describir, sin contradecirse, una secuencia de procesos que la violarían.

Consideremos la ley: “Cuando el hierro es calentado, se expande.” Otra ley dice: “Cuando el hierro es calentado, se contrae.” No hay ninguna inconsistencia lógica en esta segunda ley. Desde el punto de vista de la lógica pura, no es más inválida que la primera. Aceptamos la primera ley y no la segunda solamente porque aquella describe una regularidad *observada en la naturaleza*. Las leyes de la lógica pueden ser descubiertas por un lógico sentado en su escritorio haciendo marcas sobre una hoja de papel o simplemente pensando con sus ojos cerrados. Pero ninguna ley de la naturaleza puede descubrirse de esta manera. Las leyes de la naturaleza pueden descubrirse únicamente observando al mundo y describiendo sus regularidades. Como una ley afirma que una regularidad es válida para todos los tiempos, debe ser una afirmación tentativa. Siempre puede descubrirse que es falsa a partir de una observación futura. Las leyes de la lógica, sin embargo, son válidas bajo todas las condiciones concebibles. Si hay algún tipo de necesidad en las leyes de la naturaleza, ciertamente no es una necesidad lógica.

¿Qué es, pues, lo que quiere decir un filósofo cuando habla de necesidad en una ley natural? Quizá diga: “Me refiero a que, cuando  $P$  ocurre, no es posible que  $Q$  no siga. *Debe* suceder. No puede ser de otra forma.” Pero expresiones como “debe suceder” y “no puede ser de otra forma” son otras maneras de decir “necesario”, y aún no es claro qué quiere decir. Ciertamente no quiere rechazar la declaración condicional " $(x)(Px \supset Qx)$ ". Concuera en que es una formulación válida, pero la encuentra muy débil. Desea reforzarla añadiendo algo.

Para aclarar la cuestión, supongamos que hay dos físicos que poseen el mismo conocimiento fáctico y que también aceptan el mismo sistema de leyes. El físico I elabora una lista de estas leyes, expresándolas a todas en la forma condicional universal de  $(x)(Px \supset Qx)$ . Está satisfecho con esta formulación y no desea añadirle nada más. El físico II elabora la misma lista de leyes, expresándolas en la misma forma condicional

pero, en cada uno de los casos, añade: “y esto es así necesariamente”. Las dos listas tendrán la siguiente forma:

Físico I

Ley 1:  $(x)(Px \supset Qx)$

Ley 2:  $(x)(Rx \supset Sx)$

.

.

.

Físico II

Ley 1:  $(x)(Px \supset Qx)$ , y esto es así necesariamente.

Ley 2:  $(x)(Rx \supset Sx)$ , y esto es así necesariamente.

.

.

.

¿Hay alguna diferencia entre estos dos sistemas de leyes, independientemente del significado cognitivo de ambos? Para responder esto, es necesario intentar descubrir si existe alguna prueba por la cual pueda establecerse la superioridad de un sistema sobre el otro. Esto, a su vez, es lo mismo que preguntar si hay alguna diferencia en la capacidad de ambos sistemas para predecir eventos observables.

Supongamos que los dos físicos están de acuerdo con el estado actual del clima. Tienen acceso a los mismos reportes provenientes de las mismas estaciones climáticas. Sobre la base de esta información, junto con sus respectivos sistemas de leyes, predicen el estado del clima que habrá mañana en Los Ángeles. Como recurren a los mismos hechos y a las mismas leyes, sus predicciones serán, claramente, las mismas. ¿Pero puede el físico II, en vista del hecho de que después de cada ley añade “y esto es así necesariamente”, hacer más o mejores predicciones que el físico I? Obviamente no. Sus adiciones no dicen nada sobre ninguna característica observable de algún evento previsto.

El físico I dice: “Si  $P$ , entonces  $Q$ . Hoy hay  $P$ ; por lo tanto, mañana habrá  $Q$ .” El físico II dice: “Si  $P$ , entonces  $Q$ , y esto es así necesariamente. Hoy hay  $P$ ; por lo tanto, mañana habrá  $Q$ , digamos, una tormenta. Pero no sólo habrá una tormenta en Los

Ángeles mañana, sino que *debe* haber una tormenta.” Mañana llega. Si hay una tormenta, ambos físicos estarán contentos por su éxito. Si no hay tormenta, ambos dirán: “Veamos si podemos encontrar la fuente de nuestro error. Quizá los reportes estaban incompletos o defectuosos. Quizá una de nuestras leyes es incorrecta.” Pero, ¿hay alguna base sobre la cual el físico II pueda hacer una predicción que no pueda hacer también el físico I? Evidentemente no. Las adiciones hechas por el segundo físico a su lista de leyes no tienen influencia alguna sobre la capacidad de hacer predicciones. Cree que sus leyes son *más fuertes*, que dicen algo más, que las leyes de su rival. Pero son más fuertes sólo en su capacidad para despertar un sentimiento de necesidad en la mente del segundo físico. Ciertamente no son más fuertes en su significado cognitivo, porque el significado cognitivo de una ley yace en sus potencialidades de predicción.

No solamente es verdad que no puede predecirse algo más a partir de las leyes del físico II en ninguna prueba real, sino que no puede predecirse algo más *en principio*. Incluso si asumimos condiciones climáticas hipotéticas - condiciones extrañas que nunca ocurren en la Tierra pero que sí pueden ser imaginadas -, ambos físicos harán predicciones idénticas sobre la base de hechos idénticos y de sus respectivas listas de leyes. Por esta razón, el empirista moderno asume la posición de que el segundo físico no ha añadido nada significativo a sus leyes.

Esta es esencialmente la posición tomada por David Hume en el siglo XVIII. En su célebre crítica a la causalidad, argumentó que no hay ninguna base para asumir que alguna “necesidad” intrínseca está involucrada en cualquier secuencia de causa y efecto observada. Uno observa el evento *A*, y después observa el evento *B*. Lo que uno ha observado no es más que una sucesión temporal de eventos, uno después del otro. No se ha observado ninguna “necesidad”. Si uno no la observa, dijo Hume, no hay que afirmarla. No añade nada al valor de la descripción de nuestras observaciones. El análisis de la causalidad de Hume podrá no ser completamente claro o correcto en todos sus detalles, pero, en mi opinión, es esencialmente correcto. Es más, tuvo el gran mérito de atraer la atención de filósofos posteriores sobre lo poco apropiado con que había sido analizada la causalidad hasta entonces.

Desde Hume, los análisis más importantes de la causalidad, llevados a cabo por Mach, Poincaré, Russell, Schlick, y otros, han dado soportes cada vez más fuertes a la perspectiva condicionalista de Hume. Una declaración sobre una relación causal es una declaración condicional. Describe una regularidad observada en la naturaleza, y nada más.

Pasemos ahora a otro aspecto de la causalidad, un aspecto importante por el cual una relación causal difiere de otras relaciones. En la mayoría de los casos, para poder determinar si una relación  $R$  se mantiene entre un evento u objeto  $A$  y un evento u objeto  $B$ , simplemente estudiamos cuidadosamente  $A$  y  $B$  para ver si obtenemos la relación  $R$ . ¿Es el edificio  $A$  más alto que el edificio  $B$ ? Inspeccionamos ambos edificios y llegamos a una conclusión. ¿Tiene el papel pintado  $C$  un tono azul más oscuro que el papel pintado  $D$ ? No es necesario examinar otras muestras de papel pintado para responder esta pregunta. Estudiamos  $C$  y  $D$ , bajo condiciones de luz normales, y llegamos a una decisión sobre la base de nuestra comprensión de lo que quiere decir “tono azul más oscuro”. ¿Es  $E$  hermano de  $F$ ? Quizá no saben si son hermanos. En este caso, debemos estudiar sus antecedentes familiares. Vamos a su pasado e intentamos determinar si tienen los mismos padres. El punto a destacar es que no hay necesidad de estudiar otros casos. Examinamos únicamente el caso que tenemos a la mano para determinar si se mantiene una cierta relación. A veces esto es fácil de determinar, otras es extremadamente difícil, pero no es necesario recurrir a otros casos para decidir si la relación se mantiene para el caso en cuestión.

Con respecto a una relación causal, esto no es así. Para determinar si entre  $A$  y  $B$  se mantiene una cierta relación causal no es suficiente con meramente definir la relación y después estudiar el par de eventos. Es decir, teóricamente no es suficiente. En la práctica, debido a que poseemos una gran cantidad de conocimiento sobre otros eventos, no es siempre necesario examinar éstos para decir que entre  $A$  y  $B$  se mantiene una relación causal. Las leyes relevantes pueden ser tan obvias, tan familiares, que las asumimos tácitamente. Pero se olvida que aceptamos estas leyes sólo a partir de muchas observaciones de casos previas en donde se mantuvo la relación causal.

Supongamos que vemos una piedra acercándose hacia una ventana, que aquella golpea al vidrio, y que después éste se rompe en miles de pedazos. ¿Fue el impacto de la piedra el que causó la destrucción del vidrio? Decimos que sí. Alguien podría preguntar: ¿cómo saben esto? Y nosotros respondemos: fue obvio. Vimos que la piedra golpeó la ventana. ¿Qué otra cosa pudo haber causado que el vidrio se rompiera? Pero observemos que nuestra misma frase, “qué otra cosa”, plantea una cuestión de conocimiento relativa a otros eventos en la naturaleza similares al evento en cuestión. Desde que somos niños hemos observado cientos de casos en donde algún vidrio se hizo añicos por un fuerte impacto de algún tipo. Estamos tan acostumbrados a esta secuencia de eventos que cuando vemos que una piedra se acerca a una ventana anticipamos la

ruptura del vidrio incluso antes de que suceda. La piedra golpea al vidrio. El vidrio se hace añicos. Damos por sentado que el impacto de la piedra causó la ruptura.

Pero pensemos en qué tan fácil es que las apariencias nos engañen. Supongamos que uno está viendo en la televisión una película del oeste, y vemos que el villano apunta con su pistola a otro hombre y jala el gatillo. Escuchamos el sonido de un tiro y el hombre cae muerto. ¿Por qué cayó muerto? Porque le dispararon. Pero no había bala alguna. Incluso el sonido del tiro pudo haber sido editado después. La secuencia causal que uno pensó haber observado era completamente ilusoria. No hubo tal.

En el caso de la piedra y la ventana, quizá la piedra golpeó una superficie plástica dura e invisible que se encontraba en frente de la ventana. La superficie no se rompió; sin embargo, justo cuando la piedra golpeó esta superficie, alguien más dentro de la casa, para engañarnos, rompió la ventana por cualquier otro medio. Es posible, entonces, estar engañado, creer que una relación causal se mantiene cuando, en realidad, no lo hace. No obstante, en este caso descartamos este tipo de engaños por ser muy improbables. La experiencia de eventos similares en el pasado hace que sea muy probable que este sea otro caso de un vidrio rompiéndose por el golpe de un objeto en movimiento. Si hay alguna sospecha de engaño, entonces hacemos un estudio más a fondo del caso.

El punto a destacar aquí es este: ya sea que observemos el caso superficialmente y concluyamos que la piedra, en efecto, rompió el vidrio, o que sospechemos de algún engaño y estudiemos el caso con más detalle, siempre estamos estudiando más que un solo caso. Estamos trayendo sobre él cientos de otros casos de una naturaleza similar que hemos experimentado en el pasado. No es posible afirmar una relación causal sobre la base de haber observado un único caso. De niños vemos que las cosas suceden en secuencias temporales. Gradualmente, al paso de los años, nos formamos impresiones de ciertas regularidades que ocurren en nuestra experiencia. Aventamos un vaso y éste se rompe. Una pelota de béisbol golpea la ventana de un coche y ésta se quiebra. Además, tenemos cientos de experiencias similares en donde ciertos materiales frágiles parecidos al vidrio, como un plato de porcelana, por ejemplo, se hacen añicos por un golpe. Sin tales experiencias, no interpretaríamos la observación de la piedra y el vidrio como una relación causal.

Supongamos que, en un tiempo futuro, todos los vidrios de las ventanas se fabrican de tal forma que sólo es posible romperlos por la acción del sonido de una frecuencia extremadamente alta. Si es este conocimiento el que proporciona las bases de

nuestra experiencia, y vemos que el vidrio de una ventana se rompe justo cuando es golpeado por una piedra, diríamos: “¡Qué coincidencia tan extraña! ¡Justo en el momento en que la piedra golpeó el vidrio, alguien dentro de la casa produjo un sonido de alta frecuencia que rompió el vidrio!” Es evidente, pues, que una característica propia de cualquier relación causal, que la distingue de otras relaciones, es que no puede establecerse a partir de la inspección de un único caso concreto. Puede establecerse solamente sobre la base de una ley general que, a su vez, esté basada sobre muchas observaciones de la naturaleza.

Cuando alguien afirma que *A* causó *B*, en realidad está diciendo que este es el caso particular de una ley general que es universal con respecto al espacio y al tiempo. Se ha observado que se mantiene para ciertos pares de eventos similares, en otros tiempos y en otros lugares, así que se asume que se mantiene para cualquier tiempo o lugar. Esta es una declaración extremadamente fuerte, un salto audaz desde una serie de instancias particulares hasta la condicional universal: para todo *x*, si *Px* entonces *Qx*. Si se observa *Pa*, entonces, junto con la ley, lógicamente sigue *Qa*. No podría establecerse esta ley si no hubiera habido muchas observaciones previas; esta es la forma en que la relación causal es fundamentalmente distinta de otras relaciones. En el caso de la relación “el objeto *x* está dentro de la caja *y*”, el examen de una caja particular *b* es suficiente para determinar si dentro de ella está un objeto *a*. Pero para determinar si la relación causa-efecto se mantiene en un caso particular, no es suficiente con examinar ese caso particular. Debe establecerse, primero, una ley relevante, y esto requiere repetidas observaciones de casos similares.

Desde mi punto de vista, es más fructífero replazar toda la discusión sobre el significado de la causalidad por una investigación de los diversos tipos de leyes que tienen lugar en la ciencia. Cuando estudiamos estas leyes, estudiamos los tipos de conexiones causales que se han observado. El análisis lógico de las leyes es ciertamente un problema más claro y preciso que el problema de qué significa la causalidad.

Para comprender la causalidad desde este punto de vista moderno, resulta útil considerar el origen histórico del concepto. Yo no he hecho estudios en esta dirección, pero he leído con interés lo que ha escrito Hans Kelsen sobre el tema.<sup>22</sup> Kelsen se encuentra ahora en este país, pero en algún momento fue profesor de derecho

---

<sup>22</sup> Los puntos de vista de Kelsen están expuestos en su “Causality and Retribution”, *Philosophy of Science*, 8 (1941), y desarrollados con mayor detalle en su libro *Society and Nature* (Chicago, Ill.: University of Chicago Press, 1943).

constitucional e internacional en la Universidad de Viena. Cuando estalló la revolución en 1918 y se fundó la República Austriaca al siguiente año, fue uno de los principales autores de la nueva Constitución de la República. Al analizar los problemas filosóficos relativos al derecho, al parecer se interesó por los orígenes históricos del concepto de causalidad.

Suele decirse que hay una tendencia en los seres humanos para proyectar sus propios sentimientos en la naturaleza, para suponer que los fenómenos naturales como la lluvia y el viento y los relámpagos están animados y actúan con propósitos similares a los propósitos humanos. ¿Es este, quizá, el origen de la creencia de que hay “fuerzas” y “causas” en la naturaleza? Kelsen se convenció de que este análisis sobre el origen del concepto de causalidad, por más verosímil que sea, es demasiado individualista. En sus estudios sobre la primera aparición del concepto en la antigua Grecia encontró que fue el orden social, y no el individual, el que sirvió como modelo. Esto lo sugiere el hecho de que, desde el comienzo e incluso hoy en día, a las regularidades de la naturaleza se les llama “leyes de la naturaleza”, como si fuesen similares a las leyes en el sentido político.

Kelsen explicó esto de la siguiente manera. Cuando los griegos comenzaron con sus sistemáticas observaciones de la naturaleza y notaron diversas regularidades causales, sintieron que detrás de los fenómenos se encontraba una cierta necesidad. Vieron esto como una necesidad moral análoga a la necesidad moral que se encuentra en las relaciones entre las personas. Así como una mala acción demanda un castigo y una buena acción demanda una recompensa, un cierto evento *A* en la naturaleza demanda un consecuente *B* para restaurar el armonioso estado de las cosas, para restaurar la justicia. Si durante el otoño hace cada vez más frío, y se llega a un frío extremo en el invierno, entonces el clima, por así decirlo, se sale de balance. Para restaurar el balance, la rectitud de las cosas, el clima debe ahora ser cada vez más caliente. Desafortunadamente, se va hasta el otro extremo y se vuelve demasiado caliente, así que el ciclo debe repetirse. Cuando la naturaleza se mueve demasiado lejos de un estado de las cosas balanceado, armonioso, análogo a una sociedad armoniosa, el balance debe restablecerse por la acción de una tendencia opuesta. Este concepto de un orden o armonía natural reflejaba el amor griego por el orden y la armonía sociales, su amor por la moderación en todas las cosas, su evitar los extremos.

Consideremos el principio de que la causa y el efecto deben ser, de alguna manera, iguales. Este principio está consagrado en muchas leyes físicas, como la ley

newtoniana de que la acción está acompañada por una reacción igual. Muchos filósofos han hecho hincapié en él. Kelsen piensa que esto fue originalmente una expresión de la creencia social en que el castigo debe ser igual al crimen. Entre más atroz el crimen, más severo el castigo. Entre mayor la buena acción, mayor la recompensa. Tal sentimiento, basado en una estructura social, fue proyectado hacia la naturaleza y se convirtió en un principio básico de la filosofía natural. “Causa aequat effectum”, expresaban los filósofos medievales. Entre los filósofos metafísicos de hoy en día sigue desempeñando un papel importante.

Recuerdo una discusión que tuve alguna vez con un hombre que decía que la teoría darwiniana de la evolución podía ser rechazada por completo por razones metafísicas. No había forma, sostenía este hombre, por la cual los organismos menores, poseyendo una cualidad de organización muy primitiva, podrían desarrollarse en organismos mayores, con una organización mayor. Tal desarrollo violaría el principio de la igualdad de causa y efecto. Sólo la intervención divina podría dar cuenta del cambio. La creencia en el principio *causa aequat effectum* era tan fuerte para este hombre que rechazaba una teoría científica únicamente porque suponía que violaba este principio. Nunca atacó la teoría de la evolución evaluando su evidencia. Simplemente la rechazó por razones metafísicas. La organización no puede surgir de la no organización, porque las causas deben ser iguales a los efectos; debe invocarse a un Ser superior para explicar este desarrollo.

Kelsen refuerza su punto de vista con las citas de algunos filósofos griegos. Heráclito, por ejemplo, habla del Sol moviéndose por el cielo en obediencia a las “medidas”, por las cuales el filósofo se refiere a los límites prescritos para este camino. “El Sol no traspasará sus medidas”, escribe Heráclito, “pero si lo hace, las Erinias, las doncellas de Dice, lo descubrirán.” Las Erinias eran los tres demonios de la venganza, y Dice era la diosa de la justicia humana. La regularidad de la trayectoria del Sol es, pues, explicada en términos de la obediencia del Sol a una ley moral decretada por los dioses. Si el Sol desobedece y se sale de su camino, se le dará un justo castigo.

Por otro lado, había algunos filósofos griegos que se oponían fuertemente a esta perspectiva. Demócrito, por ejemplo, consideraba las regularidades de la naturaleza como completamente impersonales, no conectadas de ninguna forma con los mandatos divinos. Probablemente pensaba que estas leyes poseían una necesidad intrínseca, metafísica, pero el haber dado el paso desde la necesidad personal de los mandatos divinos hasta una necesidad impersonal, objetiva, fue sin duda un gran paso. Hoy en día

la ciencia ha eliminado el concepto de necesidad metafísica de la ley natural. Pero, en el tiempo de Demócrito, su visión fue un importante avance sobre la visión de Heráclito.

En el libro de Philipp Frank sobre la causalidad, *Das Kausalgesetz und seine Grenzen* (publicado en Viena en 1932), se señala que a menudo resulta instructivo leer los prefacios de los libros de ciencia. En el cuerpo de este tipo de libros, el autor podrá ser completamente científico, y tendrá cuidado de evitar toda metafísica. Pero los prefacios son más personales. Si el autor tiene un anhelo por la forma metafísica, antigua, de ver las cosas, podría pensar que el prefacio es el lugar ideal para decirle a sus lectores de qué trata en *realidad* la ciencia. Aquí uno puede descubrir qué tipo de nociones filosóficas tenía en mente el autor cuando escribió su libro. Frank cita del prefacio de un libro de física contemporáneo: “La naturaleza nunca viola las leyes.” Esto parece bastante inocente, pero cuando se analiza con cuidado, se ve que es una observación de lo más curiosa. Lo que es curioso no es la creencia en la causalidad, sino la manera en que se expresa. No se dice que a veces haya milagros, excepciones a la ley causal. En realidad, esto se niega explícitamente. Pero se niega diciendo que la naturaleza nunca *viola* leyes. Sus palabras implican que la naturaleza tiene algún tipo de elección. A la naturaleza se le dan ciertas leyes. La naturaleza podría, de cuando en cuando, violar alguna de ellas; pero al igual que un ciudadano bueno y respetuoso, nunca lo hace. Si lo hiciera, presumiblemente llegarían las Erinias para devolverla al camino correcto. Como ven, aún persiste aquí la noción de leyes como comandos. Es muy probable que el autor se sienta insultado si uno le atribuyese la vieja perspectiva metafísica de que las leyes están dadas a la naturaleza de una forma tal que ésta puede obedecerlas o desobedecerlas. Pero, por la forma en que eligió sus palabras, en su mente debe persistir este antiguo punto de vista.

Supongamos que, al visitar una ciudad por primera vez, utilizamos un mapa para encontrar nuestro camino. De pronto descubrimos una clara discrepancia entre el mapa y las calles de la ciudad. Uno no dice, “Las calles están desobedeciendo la ley del mapa.” En lugar, dice, “El mapa es incorrecto.” Esta es precisamente la situación del científico con respecto a lo que se conoce como leyes de la naturaleza. Las leyes son un mapa de la naturaleza trazado por los físicos. Si se descubre una discrepancia, la cuestión nunca es si la naturaleza *desobedeció*; la única cuestión es si los físicos cometieron un error.

Quizá todo esto sería menos confuso si se evitara por completo el uso de la palabra “ley” en la física. Continúa utilizándose porque no hay una palabra

generalmente aceptada para el tipo de declaración universal que un científico usa como la base para la predicción y para la explicación. En cualquier caso, debe tenerse muy en cuenta que, cuando algún científico habla de una ley, simplemente se refiere a la descripción de una regularidad observada. Podrá ser correcta, podrá ser falsa. Si no es correcta, debe culparse al científico, y no a la naturaleza.

## CAPÍTULO 21

### La lógica de las modalidades causales

Antes de profundizar en la naturaleza de las leyes científicas, me gustaría clarificar algunas de las observaciones que hice sobre Hume. Creo que Hume tenía razón al decir que no hay una necesidad intrínseca en una relación causal. Sin embargo, no rechazo la posibilidad de introducir un concepto de necesidad, siempre que éste no sea un concepto metafísico sino un concepto dentro de la lógica de modalidades. La lógica modal es una lógica que complementa la lógica de los valores de verdad introduciendo categorías como la necesidad, la posibilidad, y la imposibilidad. Debemos tener mucho cuidado para distinguir entre las modalidades lógicas (lógicamente necesario, lógicamente posible, etc.) y las modalidades causales (causalmente necesario, causalmente posible, etc.), así como entre muchos otros tipos de modalidades. Dentro de todo esto, únicamente las modalidades lógicas han sido estudiadas extensamente. El trabajo más conocido en este campo es el sistema de implicación estricta desarrollado por C. I. Lewis, y yo publiqué alguna vez un artículo sobre este tema. Pero en lo relativo a la relación causal, no debemos ocuparnos de la modalidad lógica, sino de la modalidad causal.

En mi opinión, es posible construir una lógica de modalidades causales. Hasta ahora se ha hecho muy poco trabajo en este campo. El primer intento por desarrollar un sistema de este tipo parece haber sido hecho por Arthur W. Burks.<sup>23</sup> Burks propuso un sistema axiomático para este fin, aunque era extremadamente débil. En realidad, nunca especificó bajo qué condiciones una declaración universal sería considerada como causalmente necesaria. Otros han abordado el mismo problema pero con una terminología distinta. Por ejemplo, Hans Reichenbach lo ha hecho así en su pequeño libro *Nomological Statements and Admissible Operations*.<sup>24</sup> Una gran cantidad de artículos han tratado con el problema de los “condicionales contrafácticos”, un problema estrechamente relacionado con el que estamos considerando aquí.

Un condicional contrafáctico es la afirmación de que, si un determinado evento no hubiera tenido lugar, entonces otro cierto evento habría seguido. Obviamente el

---

<sup>23</sup> Véase el artículo de Burks, “The Logic of Causal Propositions”, *Mind*, 60 (1951), 363-382.

<sup>24</sup> Hans Reichenbach, *Nomological Statements and Admissible Operations* (Ámsterdam: North-Holland Publishing Co., 1954); revisado por Carl G. Hempel, *Journal of Symbolic Logic*, 20 (1956), 50-54.

significado de esta afirmación no puede transmitirse en un lenguaje simbólico utilizando el condicional de verdad-funcional (el símbolo " $\supset$ ") en el sentido en que es comúnmente empleado. El intento por analizar el significado preciso de las declaraciones contrafácticas-condicionales plantea una variedad de problemas difíciles. Roderick M. Chisholm (1946) y Nelson Goodman (1947) fueron de los primeros en escribir sobre esto,<sup>25</sup> y desde entonces muchos han seguido sus pasos.

¿Exactamente cuál es la conexión entre el problema de los condicionales contrafácticos y el problema de formular una lógica modal que incluya al concepto de necesidad causal? La conexión está en el hecho de que debe hacerse una distinción entre dos tipos de declaraciones universales. Por un lado, está lo que puede llamarse leyes genuinas, como las leyes de la física, que describen regularidades universales en el espacio y el tiempo. Por el otro, están las declaraciones universales, que no son leyes genuinas. Se han propuesto diversos términos para ellas; a veces se les ha llamado universales "accidentales". Un ejemplo es "Todas las monedas en mi bolsillo el 1 de enero de 1958 eran de plata." La diferencia esencial entre ambos tipos de declaraciones universales se comprende mejor si consideramos declaraciones contrafácticas relacionadas con ellas.

Consideremos primero una ley genuina, la ley de la gravitación. Nos permite afirmar que, si arrojamos una piedra, caerá sobre la Tierra con una cierta aceleración. Podemos hacer una declaración similar en forma contrafáctica diciendo: "Ayer tuve una piedra en mi mano. Pero si no la hubiera tenido, esto es, si hubiera retirado mi mano, la piedra habría caído a la Tierra." Esta declaración no describe lo que pasó en realidad, sino lo que *habría* pasado si no hubiese tenido la piedra en mi mano. Hacemos esta afirmación sobre la base de la ley de la gravitación. La ley podrá no ser invocada explícitamente, pero está tácitamente asumida. Al establecer esta ley, ofrecemos nuestras razones para creer en la declaración contrafáctica. Es claro que no la creemos porque vimos que pasara, porque no pasó. Pero es razonable afirmar el contrafactual porque está basado sobre una ley genuina de la física. Consideramos a la ley como justificación suficiente para el contrafactual.

---

<sup>25</sup> Sobre los condicionales contrafácticos véase el artículo de Chisholm, "The Contrary-to-Fact Conditional", *Mind*, 55 (1946), 289-307, reimpresso en Herbert Feigl y Wilfrid Sellars, eds., *Readings in Philosophical Analysis* (Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1953), y Nelson Goodman "The Problem of Counterfactual Conditionals", *Journal of Philosophy*, 44 (1947), 113-128, reimpresso en su *Fact, Fiction, and Forecast* (Cambridge: Harvard University Press, 1955). Ernest Nagel discute el tema en su *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace and World, 1961), pp. 68-73, y cita referencias más recientes.

¿Podemos hacer lo mismo con el segundo tipo de declaración universal, con el universal accidental? De inmediato es evidente que sería absurdo. Supongamos que digo: “Si este centavo hubiera estado en mi bolsillo el 1 de enero de 1958, habría sido de plata.” Claramente, la sustancia de este centavo no depende de si lo tuve o no en mi bolsillo en una fecha determinada. La declaración universal “Todas las monedas en mi bolsillo el 1 de enero de 1958 eran de plata.” no es una base adecuada para afirmar un contrafactual. Es evidente, pues, que algunas declaraciones universales proporcionan una base razonable para un contrafactual y otras no lo hacen. Podemos estar convencidos de que una declaración universal del tipo accidental es verdadera y, sin embargo, no la consideraríamos como una ley. Es esencial tener esta distinción en mente cuando analicemos el significado de los contrafactuales, que también está involucrada en el problema de las modalidades no lógicas, o causales.

La idea rectora en mi acercamiento a este problema es como sigue. Asumamos que alguien propone una declaración como una nueva ley de la física. No se sabe si la declaración es verdadera o falsa, porque las observaciones hechas hasta ahora son insuficientes; pero es universal, porque dice que, si un determinado evento ocurre en cualquier tiempo o lugar, seguirá otro evento determinado. Al inspeccionar la *forma* de la declaración, podemos decidir si la declaración puede ser llamada una ley genuina *si* resultase cierta. La cuestión de si la ley es verdadera o no es irrelevante; el punto sólo es si tiene la *forma* de una ley genuina. Por ejemplo, alguien propone una ley de la gravitación que dice que la fuerza de gravedad disminuye con la tercera potencia de la distancia. Esto es obviamente falso; es decir, en este Universo, esta ley no se cumple. Pero es fácil concebir un Universo en donde se cumpla. Por lo tanto, en lugar de clasificar las declaraciones en declaraciones nomológicas o leyes genuinas (lo que implica que son verdaderas) y declaraciones no nomológicas, prefiero dividir las declaraciones, sin importar su verdad, en estas dos clases: (1) declaraciones que tienen forma de ley (a veces llamada “forma gnómica”) y (2) declaraciones que no tienen esa forma. Cada clase incluye declaraciones verdaderas y falsas. La declaración “La gravedad disminuye con la tercera potencia de la distancia.” es del primer tipo. Tiene forma de ley aunque no sea verdadera y, por lo tanto, no es una ley. La declaración “El 1 de enero de 1958 todos los hombres en Los Ángeles llevaban corbatas de color púrpura.” es del segundo tipo. Incluso si fue cierto, no expresaría una ley sino únicamente un estado de cosas accidental en un tiempo particular.

Estoy convencido de que la distinción entre estos dos tipos de declaraciones puede ser definida con precisión. Esto aún no se ha hecho, pero si se hiciese, tengo la corazonada - no voy a decirlo más fuerte - de que sería una distinción puramente semántica. Lo que quiero decir es que, si alguien se presentara ante mí con una declaración *S* y si yo hubiese hecho una distinción lo suficientemente clara entre estos dos tipos, no tendría que llevar a cabo ningún experimento para decidir de qué tipo de declaración se trata. Simplemente tendría que preguntarme: Si el mundo fuese tal que *S* es verdadera, ¿la consideraría una ley? Para ser más preciso: ¿La consideraría una ley *básica*? Más tarde explicaré mis razones para hacer esta distinción. Ahora sólo quiero dejar claro lo que quiero decir con “teniendo la forma de una posible ley básica”, o, más brevemente, “teniendo forma gnómica”.

La primera condición para que una declaración tenga forma gnómica fue clarificada por James Clerk Maxwell, quien, hace un siglo, desarrolló la teoría electromagnética clásica. Señaló que las leyes básicas de la física no hablan de ninguna posición particular en el espacio ni de ningún punto en el tiempo. Son completamente generales con respecto al espacio y al tiempo; se cumplen en todas partes y en todo momento. Esto únicamente es característico de las leyes *básicas*. Obviamente hay muchas leyes técnicas y prácticas importantes que no son de este tipo. Están en una posición intermedia entre las leyes básicas y las accidentales, pero no son completamente accidentales. Por ejemplo, “Todos los osos en el Polo Norte son blancos.” Esta no es una ley básica, porque los hechos podrían ser distintos. Por otra parte, tampoco es completamente accidental; ciertamente, no es tan accidental como el hecho de que todas las monedas en mi bolsillo eran de plata en una fecha determinada. La declaración sobre los osos polares depende de una variedad de leyes básicas que determinan el clima polar, la evolución de los osos, y otros factores. El color de los osos no es accidental. Por otro lado, el clima podría cambiar durante los siguientes mil años. Otras especies de osos, con distintos colores de piel, podrían evolucionar cerca del Polo Norte o emigrar ahí. La declaración sobre los osos no puede ser, por tanto, una ley básica.

A veces se piensa que una ley es básica y después se prueba que está limitada a un tiempo o lugar o a ciertas condiciones. Los economistas del siglo XIX hablaban de las leyes de oferta y demanda como si fuesen leyes económicas generales. Después vinieron los marxistas con sus críticas, señalando que estas leyes eran verdaderas sólo para un cierto tipo de economía de mercado pero que, de ninguna manera, eran leyes de

la naturaleza. En muchos campos - biología, sociología, antropología, economía - hay leyes que parecen cumplirse de forma general, pero únicamente porque su autor no traspasó los límites de su país, o de su continente, o de su periodo histórico. Las leyes pensadas para expresar un comportamiento moral universal o formas universales de culto religioso resultaron ser leyes limitadas cuando se descubrió que otras culturas se comportaban de manera distinta. Hoy en día se sospecha que puede haber vida en otros planetas. Si es el caso, entonces muchas leyes de la biología, que son universales con respecto a los seres vivos sobre la Tierra, podría no aplicar a otras formas de vida en la galaxia. Al parecer, pues, hay muchas leyes que no son accidentales pero que se cumplen sólo en ciertas regiones limitadas del espacio-tiempo, y no universalmente. Es necesario distinguir entre tales leyes y las leyes universales. Se cree que las leyes llamadas leyes de la física se cumplen en todas partes. Maxwell, cuando formuló sus ecuaciones para el electromagnetismo, estaba convencido de que prevalecían no sólo en su laboratorio, sino en cualquier laboratorio, y no sólo sobre la Tierra, sino también en el espacio y sobre la Luna y sobre Marte. Creía que estaba formulando leyes que eran universales a lo largo de todo el Universo. Aunque sus leyes se han visto un tanto modificadas por la mecánica cuántica, únicamente han sido modificadas. En sus aspectos esenciales, aún se consideran como universales, y, siempre que un físico contemporáneo establece una ley básica, pretende que sea universal. Tales leyes básicas deben distinguirse de las leyes espacio-temporalmente restringidas y de leyes derivadas que se cumplen sólo para ciertos tipos de sistemas físicos, para ciertas sustancias, etc.

El problema de definir de manera precisa lo que se quiere decir con forma gnómica, esto es, con la forma de una posible ley básica, aún no ha sido resuelto. Ciertamente la condición de Maxwell de que la ley debe aplicar a todos los tiempos y lugares debe ser parte de la definición. Pero debe haber otras condiciones. Se han propuesto muchas, pero los filósofos de la ciencia todavía no se ponen de acuerdo sobre cuáles deben ser estas condiciones adicionales. Dejando de lado este problema sin resolver, asumamos que hay una definición exacta de forma gnómica. Ahora indicaré cómo, en mi opinión, esta forma gnómica puede proporcionar la base para definir algunos otros conceptos importantes.

Primero, definiré una *ley básica* de la naturaleza como una declaración que tiene una forma gnómica y que también es verdadera. Quizá el lector se sienta incómodo con esta definición. Algunos de mis colegas sostienen que un empirista nunca debe hablar de una ley como siendo verdadera; una ley se refiere a una infinitud de casos a lo largo

de todo el espacio y el tiempo, y ningún ser humano está en posición de saber con certeza si se cumple universalmente o no. Estoy de acuerdo. Pero debe hacerse una clara distinción entre certeza y verdad. Nunca hay, desde luego, certeza alguna. En realidad, hay menos certeza con respecto a una ley básica que con respecto a un hecho particular. Tengo más certeza de que este lápiz particular acaba de caer de mi mano a la mesa de la que tengo sobre la universalidad de las leyes de la gravitación. Pero eso no impide que uno hable significativamente de una ley verdadera o no verdadera. No hay ninguna razón por la que el concepto de verdad no pueda utilizarse al definir qué se *entiende* por una ley básica.

Mis colegas argumentan que preferirían decir, en lugar de “verdad”, “confirmado a un alto grado”. Reichenbach, en su libro *Nomological Statements and Admissible Operations*, citado anteriormente, llega a la misma conclusión, aunque empleando una terminología distinta. Por “verdad” se refiere a “bien establecido” o a “altamente confirmado sobre la base de la evidencia disponible en algún tiempo pasado, presente, o futuro”. Pero sospecho que esto no es lo que los científicos *quieren decir* cuando hablan de una ley básica de la naturaleza. Por “ley básica” se refieren a algo que se cumple en la naturaleza sin importar si algún humano está consciente de ello. Estoy convencido de que esto es lo que la mayoría de los autores del pasado así como la mayoría de los científicos contemporáneos quieren decir cuando hablan de una ley de la naturaleza. El problema de definir “ley básica” no tiene nada que ver con el grado al que ha sido confirmada la ley; tal confirmación, desde luego, nunca puede ser lo suficientemente completa como para proporcionar certeza. El problema únicamente tiene que ver con el significado pretendido cuando se utiliza este concepto en el discurso de los científicos.

Muchos empiristas se sienten incómodos cuando abordan esta cuestión. Sienten que un empirista nunca debe emplear una palabra tan terrible como “verdad”. Otto Neurath, por ejemplo, dijo que sería un pecado en contra del empirismo hablar de leyes verdaderas. Los pragmatistas americanos, incluyendo a William James y a John Dewey, sostuvieron posturas similares. En mi opinión, este juicio se explica por un fracaso al distinguir claramente entre dos conceptos distintos: (1) el grado al que una ley es establecida en un determinado tiempo, y (2) el concepto semántico de la verdad de una ley. Una vez hecha esta distinción y teniendo en cuenta que, en la semántica, puede proporcionarse una definición precisa de verdad, ya no hay ninguna razón para dudar en utilizar la palabra “verdad” al definir una “ley básica de la naturaleza”.

Propondré la siguiente definición: una declaración es *causalmente verdadera*, o C-verdadera, si es una consecuencia lógica de la clase de todas las leyes básicas. Las leyes básicas están definidas como declaraciones que tienen forma gnómica y que son verdaderas. Tales declaraciones C-verdaderas que tienen forma universal son leyes en el sentido más amplio, siendo leyes básicas o leyes derivadas. Las leyes derivadas incluyen a las restringidas en el espacio y en el tiempo, como las leyes meteorológicas sobre la Tierra.

Consideremos las siguientes dos declaraciones. “En la ciudad de Brookfield, durante marzo de 1950, cada día que la temperatura se mantenía por debajo del punto de congelación desde la medianoche hasta las cinco de la mañana, a las cinco de la mañana el estanque de la ciudad estaba cubierto de hielo.” Esta es una ley derivada. Comparémosla con la segunda declaración, que es como la primera excepto al final: “...después, por la tarde, había un partido de fútbol en el estadio.”. Esta declaración también es verdadera. Hubo un partido de fútbol todos los sábados, y sucede que la condición de temperatura específica se cumplió sólo dos veces en marzo de 1950, ambas en un sábado por la mañana. Así, la segunda declaración, aunque verdadera y poseyendo la misma forma lógica que la primera, no es una ley. Es simplemente un universal accidental. Este ejemplo muestra que, entre las declaraciones *restringidas* de forma universal, aunque asumidas como verdaderas, no puede llevarse a cabo la distinción entre leyes (en este caso una ley derivada) y universales accidentales sobre la única base de un análisis semántico de las declaraciones. En mi opinión, esta distinción sólo puede hacerse indirectamente, con la ayuda del concepto de ley básica. Una ley derivada es una consecuencia lógica de la clase de leyes básicas; la declaración accidental no lo es. Sin embargo, pienso que puede llevarse a cabo la distinción entre las formas de las leyes básicas y de los universales accidentales a partir de un análisis semántico, sin tener que recurrir a conocimiento fáctico alguno.

En mi libro *Meaning and Necessity*<sup>26</sup> defiendo la perspectiva de que las modalidades lógicas son mejor interpretadas como propiedades de proposiciones, análogas a ciertas propiedades semánticas de las declaraciones que expresan tales proposiciones. Supongamos que una declaración  $D_1$  en un lenguaje  $L$  expresa la proposición  $p_1$ ; entonces  $p_1$  es una proposición lógicamente necesaria si y sólo si  $D_1$

---

<sup>26</sup> Rudolf Carnap, *Meaning and Necessity: A Study in Semantics and Modal Logic* (Chicago: University of Chicago Press, 1947); versión ampliada, tapa dura (1956), libro de bolsillo (1960).

es L-verdadera en lenguaje  $L$  (utilizo el término “L-verdadera” para “lógicamente verdadera”). Las siguientes dos declaraciones son, por tanto, equivalentes:

(1)  $D_1$  es L-verdadera (en  $L$ ).

(2)  $p_1$  es lógicamente necesaria.

En otras palabras, decir que una proposición es lógicamente necesaria es lo mismo que decir que cualquier declaración expresando esa proposición es L-verdadera. Los L-conceptos semánticos (L-verdad, L-falsedad, L-implicación, L-equivalencia) pueden ser definidos para lenguajes lo suficientemente fuertes como para contener todas las matemáticas y toda la física, así que se ha resuelto el problema de la interpretación de necesidad *lógica*. La mejor aproximación a otras modalidades, en particular a las modalidades causales es, en mi opinión, por analogía con esta modalidad.

Como ejemplo de lo que quiero decir, consideremos la diferencia entre las declaraciones (1) y (2) de arriba. “ $D_1$ ” es el nombre de una oración, por lo tanto, (1) es una declaración en el metalenguaje. Por otro lado, (2) es una declaración de lenguaje objeto, aunque no en un lenguaje de objeto extensional. Es un lenguaje objeto con conectivas que no son funciones de verdad. Para poner la oración (2) en forma simbólica, escribimos:

(3)  $N(p_1)$ .

Esto significa “ $p_1$  es una proposición lógicamente necesaria”.

De forma análoga, primero definiríamos “forma gnómica”, después “ley básica”, y por último “C-verdad” (causalmente verdadero). Todos estos son conceptos semánticos. Así, si tenemos la declaración:

(4)  $D_1$  es C-verdadera,

diríamos que la proposición expresada por  $D_1$  es necesaria en un sentido causal. Esto puede escribirse como sigue:

(5)  $p_1$  es causalmente necesaria.

O, en forma simbólica:

(6)  $N_c(p_1)$ .

Tal como defino los términos, la clase de proposiciones causalmente necesarias es comprensiva. Contiene las proposiciones lógicamente necesarias. Desde mi punto de vista, esto es más conveniente que las otras formas de definir los mismos términos, aunque todo esto es, desde luego, una cuestión de conveniencia. El tema de las

modalidades causales no ha sido muy investigado. Es un asunto vasto y complicado, y ya no entraremos en más tecnicismos aquí.

## CAPÍTULO 22

### Determinismo y libre albedrío

“Causalidad” y “estructura causal del mundo” son términos que prefiero utilizar en un sentido extremadamente amplio. Las leyes causales son aquellas por las cuales pueden predecirse y explicarse los eventos. La totalidad de todas estas leyes describe la estructura causal del mundo.

Claro está que el discurso cotidiano no habla de *A* causando *B* a menos que *B* sea posterior en el tiempo a *A* y a menos que haya una línea directa de eventos causales desde *A* hasta *B*. Si se ve una huella humana sobre la arena, puede inferirse que alguien caminó sobre ella. Pero no se dirá que la huella *causó* que alguien caminara sobre la arena, incluso si el caminar puede inferirse de la huella sobre la base de leyes causales. Similarmente, cuando *A* y *B* son los resultados finales de largas cadenas causales que se remiten a una causa común, no se dice que *A causó B*. Si es de día, la llegada de la noche puede predecirse porque el día y la noche tienen una causa común, pero no se dice que uno causa al otro. Después de mirar un programa de llegadas y salidas, puede predecirse que un tren llegará en un cierto tiempo; pero no se piensa que la entrada en el programa sea la causa de la llegada del tren. Aquí, de nuevo, ambos eventos se remiten a una causa común. Una decisión de la dirección de la compañía de trenes comenzó dos cadenas separadas de eventos causalmente relacionados que culminaron en *A* y *B*. Cuando leemos el programa hacemos una inferencia causal que se remonta a lo largo de una cadena y hacia adelante a lo largo de la otra, pero este es un proceso tan indirecto que no decimos que *B* es causado por *A*. No obstante, el proceso es una inferencia causal. No hay razón alguna por la cual el término “ley causal” no pueda utilizarse en una forma exhaustiva que aplique a todas las leyes por las cuales se predicen y explican determinados eventos sobre la base de otros eventos, sin importar si las inferencias van hacia adelante o hacia atrás en el tiempo.

En este contexto, ¿qué puede decirse sobre el significado del término “determinismo”? En mi opinión, el determinismo es una tesis especial sobre la estructura causal del mundo. Es una tesis que sostiene que esta estructura causal es tan fuerte que, dada una descripción completa de todo el estado del mundo en un instante en el tiempo, entonces con la ayuda de ciertas leyes, puede calcularse cualquier evento

pasado o futuro. Esta fue la perspectiva mecanicista sostenida por Newton y analizada a detalle por Laplace. Desde luego incluye, dentro de la descripción de un estado instantáneo del mundo, no solamente una descripción de la posición de cada partícula en el mundo, sino también de su velocidad. Si la estructura causal del mundo es lo suficientemente fuerte como para permitir esta tesis - y he establecido esta tesis tal como lo hizo Laplace -, puede decirse que este mundo no sólo tiene una estructura causal, sino que, más específicamente, una *estructura determinista*.

En la física de hoy en día, la mecánica cuántica tiene una estructura causal que la mayoría de los físicos y filósofos de la ciencia describirían como no determinista. Es, por así decirlo, más débil que la estructura de la física clásica porque contiene leyes básicas que son esencialmente probabilísticas; no puede dárseles una forma determinista como: “Si ciertas magnitudes tienen ciertos valores, entonces otras ciertas magnitudes tienen exactamente otros valores específicos.” Una ley estadística o probabilística dice que si ciertas magnitudes tienen ciertos valores, hay una distribución de probabilidad específica de los valores de otras magnitudes. Si algunas leyes básicas del mundo son probabilísticas, la tesis del determinismo no se sostiene. Hoy en día, es verdad que la mayoría de los físicos no aceptan el determinismo en el sentido estricto en el que hemos usado el término aquí. Solamente una pequeña minoría cree que la física podrá volver algún día a él. El propio Einstein nunca abandonó esta creencia. Toda su vida estuvo convencido de que el actual rechazo al determinismo en la física es sólo una fase temporal. Al día de hoy no se sabe si Einstein tenía o no razón.

En la historia de la filosofía, el problema del determinismo está, desde luego, íntimamente relacionado con el problema del libre albedrío. ¿Puede un hombre elegir entre distintas acciones posibles, o es su sensación de libertad una mera ilusión? Aquí no ofreceremos una discusión detallada de este tema, porque, en mi opinión, no se ve afectado por ninguno de los conceptos o teorías fundamentales de la ciencia. No comparto la opinión de Reichenbach de que, si la física hubiese retenido la posición clásica de un determinismo estricto, no podríamos hablar significativamente de hacer elecciones, decantarnos por una preferencia, llevar a cabo una decisión racional, hacernos responsables de nuestros actos, y así sucesivamente. Creo que todas esas cosas son completamente significativas, incluso en un mundo determinista en el sentido fuerte.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Una discusión detallada de esta cuestión, desde un punto de vista que comparto, puede encontrarse en “The Freedom of the Will”, capítulo 6 de *Knowledge and Society*, un volumen escrito por varios

La posición que rechazo - la posición sostenida por Reichenbach y otros - puede resumirse como sigue. Si Laplace está en lo correcto - esto es, si todo el pasado y el futuro del mundo están determinados por cualquier sección temporal dada del mundo - entonces la palabra “elección” no tiene ningún significado. El libre albedrío es una ilusión. Pensamos tener una elección que hacemos en nuestras mentes pero, en realidad, todo está predeterminado por lo que sucedió antes, incluso antes de que naciéramos. Para restaurar un significado a “elección”, tendríamos necesariamente que voltear la mirada hacia la indeterminación de la nueva física.

Rechazo este razonamiento porque creo que supone una confusión entre determinación en el sentido teórico, en donde un evento está determinado por un evento previo de acuerdo con ciertas leyes (que no significa otra cosa que previsibilidad sobre la base de ciertas regularidades observadas), y coacción. Olvidemos por un momento que, en la física de hoy en día, el determinismo en el sentido fuerte no se sostiene. Pensemos únicamente en la perspectiva del siglo XIX. La opinión comúnmente aceptada de la física fue la establecida por Laplace. Dado un estado instantáneo del Universo, un hombre que poseyera una descripción completa de tal estado, junto con todas las leyes que lo rigen (desde luego no hay un hombre así, pero asumimos su existencia), podría calcular cualquier evento del pasado o del futuro. Incluso si esta perspectiva fuerte del determinismo se sostiene, de esto no se sigue que las leyes *coaccionen* a nadie para actuar como lo hace. La previsibilidad y la coacción son dos cosas completamente distintas.

Para explicar esto, consideremos un prisionero en una celda. Le gustaría escapar, pero está rodeado por paredes gruesas y la puerta está cerrada con seguros. Esta es una coacción real. Podríamos llamarla coacción negativa porque le impide hacer algo que quiere hacer. También hay una coacción positiva. Yo soy más fuerte que tú y tú tienes una pistola en tu mano. Puede que no quieras usarla, pero si yo sujeto tu mano, apunto a alguien con la pistola, y aprieto fuertemente tu dedo hasta que éste jale del gatillo, entonces te he coaccionado a disparar, a hacer algo que no querías hacer. La ley reconocerá que fui yo, y no tú, el responsable del disparo. Esto es coacción positiva en

---

profesores de Berkeley, G. P. Adams y otros, “the University of California Associates” (Nueva York: Appleton-Century Co., 1938). Los autores de los capítulos individuales no están identificados, pero entiendo que Paul Marhenke fue el autor principal - quizá el único autor - del capítulo 6. Como los principales puntos del capítulo concuerdan con las perspectivas de Moritz Schlick, quien fue profesor visitante en Berkeley algunos años antes de la publicación de este libro, creo que el capítulo muestra los efectos de su influencia.

un sentido físico amplio. En un sentido todavía más amplio, una persona puede coaccionar a otra por todo tipo de medios no físicos, como la amenaza.

Ahora comparemos la coacción, en estas distintas formas, con la determinación en el sentido de regularidades que ocurren en la naturaleza. Es sabido que los seres humanos poseen ciertos rasgos de carácter que dan una regularidad a su comportamiento. Tengo un amigo que es muy aficionado a ciertas composiciones musicales de Bach que rara vez son ejecutadas. Supe que un grupo de excelentes músicos ofrecía un concierto privado de Bach, en la casa de otro amigo, y que algunas de estas composiciones estarían en el programa. Se me invitó y me dijeron que podía llevar a alguien. Llamé a mi amigo, pero antes de hacerlo estuve casi seguro de que querría ir. Ahora bien, ¿sobre qué base hice esta predicción? La hice, claro está, porque conozco sus rasgos de carácter y ciertas leyes de la psicología. Supongamos que decide venir conmigo, tal como yo esperaba. ¿Estuvo obligado a ir? No, fue por su propia voluntad. Y en realidad nunca fue más libre que cuando hizo una elección de este tipo.

Si alguien le pregunta: “¿Fuiste obligado a venir a este concierto? ¿Ejerció alguien algún tipo de presión moral sobre ti, como decirte que el anfitrión o los músicos se sentirían ofendidos si no vinieses?”, él responderá: “Nada de eso. Nadie ejerció la presión más mínima. Soy muy aficionado de Bach, y tenía muchas ganas de venir. Fue esa la razón por la que vine.”

La libre elección de este hombre es ciertamente compatible con la perspectiva de Laplace. Incluso si toda la información sobre el Universo, anterior a su decisión, hiciera posible predecir que iría al concierto, tampoco podría decirse que fue coaccionado para ir. Solamente es coacción cuando se ve forzado por agentes externos a hacer algo contrario a su deseo. Pero si el acto surge de su propio carácter en conformidad con las leyes de la psicología, entonces decimos que actuó libremente. Claro está que su carácter está moldeado por su educación, por todas las experiencias que ha tenido desde que nació, pero eso no nos impide hablar de elecciones libres si éstas surgen de su carácter. Quizá a este hombre aficionado de Bach también le guste salir a pasear por la noche. En esta noche en particular, quiso escuchar a Bach más que salir a pasear. Actuó de acuerdo con su propio sistema de preferencias. Hizo, pues, una elección libre. Este es el lado negativo de la cuestión, un rechazo de la noción de que el determinismo clásico haría imposible hablar significativamente de elecciones humanas libres.

El lado positivo de la cuestión es igualmente importante. A menos que haya una regularidad causal, que no necesita ser determinista en el sentido fuerte, sino que puede

ser de un tipo más débil, a menos que haya alguna regularidad causal, decía, no es posible hacer una elección libre en absoluto. Una elección supone una preferencia deliberada por un curso de acción sobre otro. ¿Cómo sería posible hacer una elección si las consecuencias de los cursos de acción alternativos no pudiesen ser previstas? Incluso las elecciones más simples dependen de prever posibles consecuencias. Uno toma agua porque se sabe que, de acuerdo con ciertas leyes de la fisiología, saciará su sed. Desde luego, las consecuencias son conocidas únicamente con diversos grados de probabilidad. Incluso si el Universo fuese determinista en el sentido clásico, esto sigue siendo cierto. Nunca tenemos a nuestra disposición la suficiente información como para poder predecir con certeza. El hombre imaginario en la formulación de Laplace puede hacer predicciones perfectas, pero no existe ningún hombre así. La situación práctica es que el conocimiento del futuro es probabilístico, sin importar si el determinismo se cumple o no en el sentido fuerte. Pero para poder llevar a cabo cualquier tipo de elección libre, debe ser posible sopesar los probables resultados de los cursos de acción alternativos, y esto no podría ser a menos que haya suficiente regularidad en la estructura causal del mundo. Sin tales regularidades, no habría responsabilidad moral ni legal. Una persona incapaz de prever las consecuencias de un acto ciertamente no podría ser hecho responsable por ese acto. Un padre, un maestro, un juez consideran a un niño responsable sólo en aquellas situaciones en donde éste puede prever las consecuencias de sus actos. Sin causalidad en el mundo, no tendría sentido educar a las personas, no tendría sentido hacer ningún tipo de apelación moral o política. Tales actividades tienen sentido sólo si se presupone una cierta cantidad de regularidad causal en el mundo.

Estos puntos pueden resumirse así. El mundo tiene una estructura causal. No se sabe si esta estructura es determinista en el sentido clásico o tiene una forma más débil. En cualquier caso hay un alto grado de regularidad. Esta regularidad es esencial para lo que llamamos elección. Cuando una persona hace una elección, ésta es parte de una de las cadenas causales del mundo. Si no está supuesta ninguna coacción, lo que significa que la elección está basada sobre sus propias preferencias, que surge de su propio carácter, no hay razón alguna para no llamarla una elección libre. Es verdad que su carácter fue la causa de que eligiera como lo hizo, y que éste, a su vez, está condicionado por causas previas. Pero no hay ninguna razón para decir que su carácter lo *coaccionó* a elegir como lo hizo, porque la palabra “coacción” está definida en términos de factores causales externos. Por supuesto es posible que un psicópata se encuentre en un estado mental altamente anormal; podría decirse que cometió un crimen

porque su naturaleza le obligó a hacerlo. Pero aquí utilizamos el término “obligó” porque sentimos que su anormalidad le impidió ver con claridad las consecuencias de distintos cursos de acción. Lo hizo incapaz de tomar una decisión y deliberación racionales. Hay un serio problema relativo a dónde trazar la línea entre un comportamiento premeditado, voluntarioso, y las acciones impuestas por estados mentales anormales. Pero, en general, la elección libre es una decisión hecha por alguien capaz de prever las consecuencias de cursos de acción alternativos y de elegir el que prefiera. Desde mi punto de vista no hay ninguna contradicción entre la elección libre, entendida de esta forma, y el determinismo, incluso el del tipo clásico fuerte.

En los últimos años, algunos autores han sugerido que los saltos cuánticos indeterminados, que la mayoría de los físicos considera como aleatorios en un sentido básico, pueden desempeñar un papel en la toma de decisiones.<sup>28</sup> Es muy cierto que, bajo ciertas condiciones, una microcausa - como lo es un salto cuántico - puede conducir a un macroefecto observable. En una bomba atómica, por ejemplo, se desata una reacción en cadena sólo cuando se libera un número suficiente de neutrones. También es posible que en el organismo humano, más que en la mayoría de los sistemas físicos inanimados, haya ciertos puntos en donde un solo salto cuántico pueda conducir a un macroefecto observable. Pero no es probable que estos sean los puntos en donde se toman las decisiones humanas.

Pensemos por un momento en un ser humano en el instante en el que hace una decisión. Si, en este punto, se encuentra el tipo de indeterminación exhibido por un salto cuántico, entonces la decisión hecha en este punto sería igualmente aleatoria. Tal aleatoriedad no ayuda en fortalecer el significado del término “elección libre”. Una elección como esta no sería una elección en absoluto, sino que sería una decisión casual, azarosa, como una decisión entre dos cursos de acción posibles lanzando una moneda. Por fortuna, el rango de indeterminación en la teoría cuántica es extremadamente pequeño. Si fuese mucho mayor, podría suceder que una mesa explotara de repente, o que una piedra que cae espontáneamente se mueva de manera horizontal o retroceda hacia arriba. Sería posible sobrevivir en un mundo así, pero ciertamente no aumentaría la posibilidad de elecciones libres, sino que, por el contrario, haría que tales elecciones fuesen considerablemente arduas, porque sería más difícil considerar las consecuencias

---

<sup>28</sup> Henry Margenau señala este punto en su *Open Vistas: Philosophical Perspectives of Modern Science* (New Haven: Yale University Press, 1961). Philipp Frank, *Philosophy of Science* (Englewood, N. J.: Prentice-Hall, 1957), capítulo 10, sección 4, ofrece citas de muchos autores a ambos lados de la controversia.

de las acciones. Cuando uno arroja una piedra, se espera que ésta caiga al suelo. En lugar de esto, se movería en espiral y le pegaría a alguien en la cabeza. Entonces se pensaría que uno es responsable por ello cuando en realidad no tenía esa intención. Es evidente, pues, que si las consecuencias de las acciones fuesen más difíciles de prever de lo que son ahora, las probabilidades de que los efectos deseados tengan lugar serían menores. Esto haría al comportamiento moral deliberado mucho más difícil. Lo mismo aplica para procesos aleatorios que puedan existir dentro del organismo humano. En la medida en que influyen sobre las decisiones, simplemente añadirían azar a éstas. Habría *menos* elección que antes, y podría plantearse un argumento incluso más destructivo en contra de la posibilidad del libre albedrío.

En mi opinión, y sobre el nivel práctico de la vida cotidiana, no hay diferencia entre la física clásica, con su determinismo fuerte, y la física cuántica moderna, con sus microcausas aleatorias. La incertidumbre en la teoría cuántica es mucho menor que la incertidumbre en la vida cotidiana que surge de las limitaciones del conocimiento. Hay un hombre en un mundo descrito por la física clásica. Hay otro hombre en un mundo descrito por la física moderna. No hay ninguna diferencia en ambas descripciones que tenga efecto significativo alguno sobre la cuestión de las elecciones libres y del comportamiento moral. En ambos casos el hombre puede predecir los resultados de sus acciones, no con certeza, pero sí con algún grado de probabilidad. La incertidumbre en la mecánica cuántica no tiene ningún efecto observable sobre lo que le sucede a una piedra cuando cada hombre la arroja, porque la piedra es un complejo enorme consistente en billones de partículas. En el macromundo que ocupa a los seres humanos, la incertidumbre de la mecánica cuántica no desempeña ningún papel. Es por esta razón que considero una equivocación suponer que la incertidumbre en el nivel subatómico tiene alguna incidencia en la cuestión de las decisiones libres. Pero hay un buen número de prominentes científicos y filósofos de la ciencia que piensan de otra forma, y esto debe aceptarse sólo como mi opinión.

Parte V

LEYES TEORÉTICAS Y CONCEPTOS  
TEORÉTICOS

CAPÍTULO 23

Teorías y no observables

Una de las distinciones más importantes entre dos tipos de leyes en la ciencia es la distinción entre lo que podría llamarse (no hay una terminología generalmente aceptada para ellas) leyes empíricas y leyes teóricas. Las leyes empíricas son aquellas que pueden ser confirmadas directamente por observaciones empíricas. El término “observable” a menudo se utiliza para cualquier fenómeno que pueda ser directamente observado, así que puede decirse que las leyes empíricas son leyes sobre observables.

Aquí debemos hacer una advertencia. Los filósofos y los científicos tienen formas muy distintas de utilizar los términos “observable” y “no observable”. Para un filósofo, “observable” tiene un significado muy estrecho. Aplica para propiedades como “azul”, “duro”, “caliente”. Estas son propiedades percibidas directamente por los sentidos. Para el físico, la palabra tiene un significado mucho más amplio. Incluye cualquier magnitud cuantitativa que pueda ser medida de una forma relativamente simple, directa. Un filósofo no consideraría una temperatura de, quizá,  $80^{\circ}\text{C}$ , o un peso de  $93\frac{1}{2}$  kilos como un observable, porque no hay una percepción sensorial directa de tales magnitudes. Para un físico, ambas son observables porque pueden ser medidas de una forma extremadamente simple. Se pone el objeto a ser pesado sobre una balanza. La temperatura se mide con un termómetro. El físico no diría que la masa de una molécula, sin hablar de la masa de un electrón, es algo observable, porque aquí los procedimientos de medición son mucho más complicados e indirectos. Pero aquellas magnitudes que pueden establecerse a partir de procedimientos relativamente simples - la longitud con una regla, el tiempo con un reloj, o la frecuencia de ondas de luz con un espectrómetro - son llamadas observables.

Un filósofo podría objetar que la intensidad de una corriente eléctrica no es realmente observada. Sólo se observó la posición de un indicador. Se unió un amperímetro al circuito y se observó que el indicador apuntaba a una marca etiquetada como 5.3. Ciertamente no se observó la intensidad de la corriente. Se *infirió* de lo que se observó. El físico respondería que esto es muy cierto, pero que la inferencia no es muy complicada. El procedimiento de medición es tan simple, está tan bien establecido, que no podría dudarse de que el amperímetro ofrece una medición precisa de la intensidad de la corriente. Por lo tanto, está incluida en lo que se conoce como observables.

No se trata de quién utiliza el término “observable” correctamente. Hay un continuo que comienza con observaciones sensoriales directas y procede hasta métodos de observación indirecta enormemente complejos. Es evidente que no puede trazarse una línea clara a través de este continuo, porque es una cuestión de grados. Un filósofo está seguro de que el sonido de la voz de su esposa, viniendo del otro lado de la habitación, es un observable. Pero supongamos que escucha su voz por teléfono. ¿Es su voz un observable o no? Un físico ciertamente diría que cuando mira algo a través de un microscopio ordinario lo está observando directamente. ¿También es este el caso cuando mira en un microscopio electrónico? ¿Observa la trayectoria de una partícula cuando mira el rastro que deja en una cámara de burbujas? En general, el físico habla de observables en un sentido muy amplio comparado con el estrecho sentido del filósofo, pero, en ambos casos, la línea que separa lo observable de lo no observable es sumamente arbitraria. Conviene tener esto en mente al momento de encontrarnos con estos términos en un libro filosófico o científico. Los autores trazarán la línea donde les convenga, dependiendo de sus puntos de vista, y no hay razón por la que no deban tener este privilegio.

Las leyes empíricas, en mi terminología, son leyes que contienen términos o bien directamente observables por los sentidos, o bien mensurables por técnicas relativamente simples. A veces a tales leyes se les llama generalizaciones empíricas, como un recordatorio de que se han obtenido por generalizar resultados encontrados a partir de observaciones y mediciones. Incluyen no sólo leyes cualitativas simples (como “Todos los cuervos son negros.”), sino también leyes cuantitativas que surgen de mediciones simples. Las leyes relativas a la presión, el volumen, y la temperatura son de este tipo. La ley de Ohm, que conecta la diferencia de potencial eléctrico, la resistencia, y la intensidad de una corriente, constituye otro ejemplo familiar. El científico hace mediciones repetidas, encuentra ciertas regularidades, y las expresa en una ley. Estas

son las leyes empíricas. Como ya dijimos en capítulos anteriores, se utilizan para explicar hechos observados y para predecir eventos observables futuros.

No hay un término comúnmente aceptado para el segundo tipo de leyes, las que yo he llamado *leyes teóricas*. A veces se les llama leyes abstractas o hipotéticas. “Hipotéticas” no es muy apropiado porque sugiere que la distinción entre los dos tipos de leyes está basada sobre el grado al cual éstas se confirman. Pero una ley empírica, si es una hipótesis tentativa, confirmada solamente en un grado bajo, seguiría siendo una ley empírica aunque podría decirse que es más bien hipotética. Una ley teórica no se distingue de una ley empírica por el hecho de que no esté bien establecida, sino por el hecho de que contiene términos de un tipo distinto. Los términos de una ley teórica no se refieren a observables aun cuando se adopte el amplio significado del físico para lo que puede ser observado. Son leyes que se refieren a entidades como las moléculas, los átomos, los electrones, los protones, los campos electromagnéticos, y otras que no pueden medirse simple y directamente.

Si hay un campo estático de grandes dimensiones, que no varía de un punto a otro, los físicos lo llaman un campo observable porque puede ser medido con la ayuda de un aparato sencillo. Pero si el campo cambia de punto a punto en distancias muy pequeñas, o varía muy rápido en el tiempo, quizá cambiando billones de veces cada segundo, entonces no puede ser directamente medido con la ayuda de técnicas sencillas. Los físicos no llamarían a un campo así un observable. Algunas veces un físico distinguirá entre observables y no observables justo de esta forma. Si la magnitud sigue siendo la misma dentro de distancias espaciales lo suficientemente grandes, o dentro de intervalos de tiempo lo suficientemente grandes, de tal manera que pueda aplicarse un aparato para una medición directa de la magnitud, entonces se le llama *macroevento*. Si la magnitud cambia dentro de intervalos de tiempo y espacio tan extremadamente pequeños que no pueda ser directamente medida con la ayuda de un aparato sencillo, entonces es un *microevento*. (Algunos autores más tempranos utilizaban los términos “microscópico” y “macroscópico”, pero hoy en día muchos han abreviado estos términos a “micro” y “macro”.)

Un microproceso es simplemente un proceso que supone intervalos de espacio y tiempo extremadamente pequeños. Por ejemplo, la oscilación de una onda electromagnética de luz visible es un microproceso. Ningún instrumento puede medir cómo es que varía su intensidad. La distinción entre macro y microconceptos a veces se considera paralela a lo observable y lo no observable. No es exactamente lo mismo,

pero es más o menos así. Las leyes teóricas se refieren a los no observables, y muy seguido éstos son microprocesos. Si es así, las leyes son algunas veces llamadas microleyes. Yo utilizo el término “leyes teóricas” en un sentido más amplio que este, para así incluir a todas aquellas leyes que contienen no observables, sin importar si son microconceptos o macroconceptos.

Es verdad, como mostramos antes, que los conceptos “observable” y “no observable” no pueden ser nítidamente definidos porque yacen sobre un continuo. Pero en la práctica real la diferencia suele ser lo suficientemente grande como para que no haya necesidad de debatir sobre esta cuestión. Todos los físicos estarían de acuerdo en que las leyes que se refieren a la presión, el volumen, y la temperatura de un gas, por ejemplo, son leyes empíricas. Aquí, la cantidad de gas es lo suficientemente grande - de tal suerte que las magnitudes a ser medidas permanecen constantes por un volumen de espacio y por un periodo de tiempo lo suficientemente grandes - como para permitir mediciones directas y simples que pueden después generalizarse en leyes. Todos los físicos estarían de acuerdo en que las leyes relativas al comportamiento de moléculas individuales son teóricas. Tales leyes conciernen a un microproceso sobre el cual las generalizaciones no pueden estar basadas en mediciones simples, directas.

Las leyes teóricas son, desde luego, más generales que las leyes empíricas. Pero es importante comprender que a las leyes teóricas no se puede llegar simplemente tomando las leyes empíricas y después generalizándolas unos cuantos pasos más. ¿Cómo es que un físico llega a una ley empírica? Lo hace observando ciertos eventos en la naturaleza. Nota cierta regularidad, y la describe a partir de una generalización inductiva. Podría suponerse que ahora podría reunir un grupo de leyes empíricas, observar algún tipo de patrón, y después hacer una generalización inductiva más amplia, para de esta forma llegar a una ley teórica. Pero esto no es así.

Para aclarar esto, supongamos que se ha observado que una determinada barra de hierro se expande cuando es calentada. Después de haber repetido el experimento muchas veces, siempre con el mismo resultado, la regularidad se generaliza diciendo que esta barra se expande cuando es calentada. Se ha establecido una ley empírica, aun cuando tiene un rango estrecho y aplica solamente a una barra de hierro particular. Ahora se hacen más pruebas con otros objetos de hierro y subsecuentemente se descubre que cada vez que se calienta un objeto de hierro, éste se expande. Esto permite formular una ley más general, a saber, que todos los cuerpos de hierro se expanden cuando se les calienta. De manera similar, se desarrollan las leyes todavía más generales

“Todos los metales...”, y después “Todos los cuerpos sólidos...”. Todas estas son generalizaciones simples, cada una un poco más general que la anterior, pero todas son leyes empíricas. ¿Por qué? Porque en cada caso los objetos tratados son observables (hierro, cobre, metal, cuerpos sólidos); en cada caso el incremento en la temperatura y en la longitud es mensurable por técnicas simples y directas.

Por el contrario, una ley teórica relacionada con este proceso se referiría al comportamiento de las moléculas en la barra de hierro. ¿De qué forma está conectado el comportamiento de las moléculas con la expansión de la barra cuando es calentada? Inmediatamente se ve que ahora estamos hablando de no observables. Debemos introducir una teoría - la teoría atómica de la materia - y rápidamente nos sumergimos en las leyes atómicas que suponen conceptos radicalmente distintos de aquellos que teníamos antes. Es verdad que estos conceptos teóricos difieren de los conceptos de longitud y temperatura únicamente en el grado al que son directa o indirectamente observados, pero esta diferencia es tan grande que no hay debate alguno sobre la naturaleza radicalmente distinta de las leyes a ser formuladas.

Las leyes teóricas están relacionadas con las leyes empíricas de una forma un tanto análoga a la forma en que las leyes empíricas están relacionadas con los hechos individuales. Una ley empírica ayuda a explicar un hecho que ha sido observado y a predecir un hecho aún no observado. De manera similar, la ley teórica ayuda a explicar leyes empíricas ya formuladas, y permite la derivación de nuevas leyes empíricas. Así como los hechos individuales, separados, encajan en un patrón ordenado cuando son generalizados en una ley empírica, las leyes empíricas individuales y separadas encajan en el patrón ordenado de una ley teórica. Esto plantea uno de los principales problemas en la metodología científica. ¿Cómo puede obtenerse el tipo de conocimiento que justifica la afirmación de una ley teórica? Una ley empírica puede justificarse por medio de observaciones de hechos individuales. Pero para justificar una ley teórica no pueden llevarse a cabo observaciones comparables porque las entidades referidas en una ley teórica son no observables.

Antes de abordar este problema, debemos repetir algunas observaciones hechas en un capítulo anterior relativas al uso de la palabra “hecho”. Es importante, en el contexto presente, ser extremadamente cuidadoso con el uso de esta palabra, porque algunos autores, especialmente los científicos, utilizan “hecho” o “hecho empírico” para algunas proposiciones que yo llamaría leyes empíricas. Por ejemplo, muchos físicos se referirán al “hecho” de que el calor específico del cobre es .090. Yo llamaría a esto una

ley porque, en su formulación completa, se ve que es una declaración condicional universal: “Para cualquier  $x$  y cualquier tiempo  $t$ , si  $x$  es un cuerpo sólido de cobre, entonces el calor específico de  $x$  en  $t$  es .090.” Algunos físicos incluso podrían hablar de la ley de expansión térmica, de la ley de Ohm, etc., como hechos. Claro está que pueden decir que las leyes teoréticas ayudan a explicar tales hechos. Esto suena como mi declaración de que las leyes empíricas explican hechos, pero la palabra “hecho” está siendo utilizada en dos formas distintas. Yo restrinjo la palabra a los hechos particulares, concretos, que pueden ser especificados espaciotemporalmente, y no a la expansión térmica en general, sino a *la* expansión de esta barra de hierro observada a las 10 de la mañana de este día cuando fue calentada. Es importante tener en mente la forma restringida en la que estoy hablando de los hechos. Si la palabra “hecho” es utilizada de una manera ambigua, entonces la diferencia importante entre las formas en las que las leyes empíricas y teoréticas sirven para la explicación se borrará por completo.

¿Cómo pueden descubrirse las leyes teoréticas? No podemos decir: “Simplemente coleccionemos más y más datos, y después generalicemos más allá de las leyes empíricas hasta que hayamos alcanzado leyes teoréticas.” Ninguna ley teorética fue descubierta de esta manera. Observamos piedras, árboles, y flores, notamos diversas regularidades y las describimos a partir de leyes empíricas. Pero no importa por cuánto tiempo o qué tan cuidadosamente hayamos observado tales cosas, nunca llegaremos a un punto en donde observemos una molécula. El término “molécula” nunca surge como resultado de la observación. Por esta razón, ninguna cantidad de generalización de observaciones producirá nunca una teoría de procesos moleculares. Una teoría así debe surgir de otra manera. No se establece como una generalización de hechos, sino como una hipótesis. La hipótesis es después probada de una forma análoga, en cierto sentido, a la prueba de una ley empírica. De la hipótesis se derivan ciertas leyes empíricas, y éstas se prueban, a su vez, por la observación de hechos. Quizá las leyes empíricas derivadas de la teoría ya son conocidas y están confirmadas. (Tales leyes incluso podrán haber motivado la formulación de la ley teorética.) Independientemente de si las leyes empíricas derivadas son conocidas y están confirmadas, o si son nuevas leyes confirmadas por nuevas observaciones, la confirmación de tales leyes derivadas proporciona una confirmación indirecta de la ley teorética.

El punto que quiero dejar en claro es este. Un científico no comienza con una ley empírica, quizá la ley para los gases de Boyle, y después busca una teoría sobre las

moléculas desde la cual derivar esta ley. El científico intenta formular una teoría mucho más general desde la cual pueda derivarse una variedad de leyes empíricas. Entre más leyes de este tipo, entre mayor su variedad y aparente ausencia de conexión una con otra, más fuerte será la teoría que las explica. Algunas de estas leyes derivadas podrán haber sido conocidas antes, pero la teoría también podrá hacer posible derivar nuevas leyes empíricas que pueden ser confirmadas a partir de nuevas pruebas. Si este es el caso, puede decirse que la teoría hizo posible predecir nuevas leyes empíricas. La predicción está comprendida de una manera hipotética. Si la teoría se cumple, también se cumplirán ciertas leyes empíricas. La ley empírica predicha habla de relaciones entre observables, así que ahora es posible hacer experimentos para ver si la ley empírica se cumple. Si se confirma la ley empírica, entonces proporciona una confirmación indirecta de la teoría. Cada confirmación de una ley, empírica o teórica, es, desde luego, únicamente parcial, y nunca completa o absoluta. Pero en el caso de las leyes empíricas, es una confirmación más directa. La confirmación de una ley teórica es indirecta porque tiene lugar sólo mediante la confirmación de leyes empíricas derivadas de la teoría.

El valor supremo de una nueva teoría es su poder para predecir nuevas leyes empíricas. Es cierto que también tiene valor en explicar leyes empíricas conocidas, pero este es un valor menor. Si un científico propone un nuevo sistema teórico, desde el cual no puedan derivarse nuevas leyes, entonces es lógicamente equivalente al conjunto de todas las leyes empíricas ya conocidas. La teoría podrá ser elegante, y podrá simplificar en algún grado el conjunto de todas las leyes conocidas, aunque es poco probable que haya una simplificación esencial. Por otro lado, toda nueva teoría en la física que ha conducido a un gran salto adelante ha sido una teoría desde la cual pueden derivarse nuevas leyes empíricas. Si Einstein no hubiera hecho más que proponer su teoría de la relatividad como una nueva y elegante teoría que abarcara ciertas leyes conocidas - incluso también simplificándolas en cierto grado -, su teoría no habría tenido un efecto tan revolucionario.

Pero claro está que no fue así. La teoría de la relatividad condujo a nuevas leyes empíricas que explicaban por primera vez fenómenos como el movimiento del perihelio de Mercurio, y la curvatura de los rayos de luz en la vecindad del Sol. Estas predicciones mostraron que la teoría de la relatividad era más que una nueva forma de expresar las viejas leyes. En realidad, era una teoría con un gran poder predictivo. Las consecuencias que pueden derivarse de la teoría de Einstein están lejos de agotarse.

Estas son consecuencias que no podrían haberse derivado de teorías anteriores. Usualmente, una teoría con tal poder es también elegante, y tiene un efecto unificador sobre leyes conocidas. Es más sencilla que la colección total de leyes conocidas. Pero el gran valor de la teoría se encuentra en su poder para sugerir nuevas leyes que puedan ser confirmadas por medios empíricos.

## CAPÍTULO 24

### Reglas de correspondencia

Es momento de añadir una importante reserva a la discusión sobre las leyes teóricas y los términos ofrecidos en el último capítulo. La declaración de que las leyes empíricas se derivan de las leyes teóricas es una simplificación. No es posible derivarlas directamente porque una ley teórica contiene términos teóricos, mientras que una ley empírica únicamente contiene términos observables. Esto impide cualquier deducción directa de una ley empírica de una teórica.

Para comprender esto, imaginemos estar en el siglo XIX, preparándonos para establecer, por primera vez, algunas leyes teóricas relativas a las moléculas en un gas. Estas leyes han de describir el número de moléculas por unidad de volumen del gas, las velocidades moleculares, y así sucesivamente. Para simplificar las cosas, asumimos que todas las moléculas tienen la misma velocidad. (En realidad, esta fue la suposición original; más tarde se abandonó a favor de una cierta distribución de probabilidad de las velocidades.) Debemos hacer más suposiciones sobre lo que ocurre cuando las moléculas colisionan. No conocemos la forma exacta de las moléculas, así que supondremos que son pequeñas esferas. ¿Cómo colisionan las esferas? Existen leyes sobre esferas que colisionan, pero se refieren a cuerpos grandes. Como no podemos observar directamente las moléculas, asumimos que sus colisiones son análogas a las de los cuerpos grandes; quizá se comportan como bolas de billar sobre una mesa sin fricción. Todas estas son, desde luego, únicamente suposiciones; conjeturas sugeridas por analogías con ciertas macroleyes conocidas.

Pero ahora nos enfrentamos con un problema difícil. Nuestras leyes teóricas solamente tratan con el comportamiento de las moléculas, que no pueden ser observadas. ¿Cómo, entonces, podemos deducir de tales leyes una ley concerniente a propiedades observables como la presión o la temperatura de un gas, o a propiedades de las ondas sonoras que pasan por el gas? Las leyes teóricas sólo contienen términos teóricos. Lo que buscamos son leyes empíricas que contengan términos observables. Evidentemente, tales leyes no pueden derivarse sin tener algo más que las leyes teóricas.

El algo más es esto: un conjunto de reglas que conecten los términos teóricos con los términos observables. Por mucho tiempo los científicos y los filósofos de la ciencia han reconocido la necesidad de tal conjunto de reglas, y también han discutido sobre su naturaleza. Un ejemplo de una regla así es: “Si hay una oscilación electromagnética de una frecuencia específica, entonces hay un color azul verdoso visible de una cierta tonalidad.” Aquí se conecta algo observable con un microproceso no observable.

Otro ejemplo es: “La temperatura (medida por un termómetro y, por lo tanto, un observable en el sentido más amplio ya explicado) de un gas es proporcional a la energía cinética media de sus moléculas.” Esta regla conecta un no observable en la teoría molecular, la energía cinética de las moléculas, con un observable, la temperatura del gas. Si no existiesen declaraciones de este tipo, no habría manera de derivar leyes empíricas sobre observables de leyes teóricas sobre no observables.

Los nombres para estas reglas varían de autor a autor. Yo las llamo “reglas de correspondencia”. P. W. Bridgman las llama reglas operacionales. Norman R. Campbell se refiere a ellas como el “Diccionario”.<sup>29</sup> Como las reglas conectan un término en una terminología con otro término en otra terminología, el uso de las reglas es análogo al uso de un diccionario Francés-Español. ¿Qué significa la palabra francesa “cheval”? Uno busca en el diccionario y encuentra que significa “caballo”. Ciertamente no es tan sencillo cuando se utiliza un conjunto de reglas para conectar no observables con observables, pero aquí hay una analogía que hace que el “Diccionario” de Campbell sea un nombre sugestivo para el conjunto de reglas.

A veces existe la tentación de pensar que este conjunto de reglas provee de un medio para definir términos teóricos, visto que lo opuesto es realmente verdadero. Un término teórico nunca puede ser explícitamente definido sobre la base de términos observables, aunque algunas veces un observable sí puede ser definido en términos teóricos. Por ejemplo, “hierro” puede definirse como una sustancia consistente en pequeñas partes cristalinas, cada una teniendo una determinada disposición atómica y cada átomo siendo una configuración de partículas de un cierto tipo. En términos teóricos, pues, es posible expresar qué se quiere decir por el término observable “hierro”, pero lo opuesto no es verdad.

---

<sup>29</sup> Véase Percy W. Bridgman, *The Logic of Modern Physics* (Nueva York: Macmillan, 1927), y Norman R. Campbell, *Physics: The Elements* (Cambridge: Cambridge University Press, 1920); reimpresso como *Foundations of Science* (Nueva York: Dover, 1957). Las reglas de correspondencia son discutidas por Ernest Nagel, *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace & World, 1961), pp. 97-105.

No hay una respuesta a la pregunta: “Exactamente, ¿qué es un electrón?” Más tarde regresaremos a esta pregunta, porque es del tipo que los filósofos siempre preguntan a los científicos. Pretenden que el físico les diga qué es exactamente lo que quiere decir por “electricidad”, “magnetismo”, “gravedad”, “una molécula”. Si el físico lo explica en términos teóricos, puede que el filósofo quede decepcionado. “Eso no es a lo que me refería.”, dirá, “Quiero que me digas, en un lenguaje ordinario, qué significan esos términos.” Algunas veces sucede que el filósofo en cuestión escribe un libro en donde habla de los grandes misterios de la naturaleza. “Nadie”, escribe, “ha sido capaz hasta ahora, y quizá nunca nadie lo sea, de ofrecernos una respuesta sencilla de la pregunta: ‘¿Qué es la electricidad?’ Y es así que la electricidad permanece por siempre como uno de los misterios más grandes, insondables, del Universo.”

Pero aquí no hay ningún misterio especial. Solamente hay una pregunta mal planteada. Las definiciones que, en la naturaleza del caso, no pueden ser ofrecidas, no deben ser demandadas. Si un niño no sabe qué es un elefante, podemos decirle que es un animal enorme con grandes orejas y un tronco largo. Podemos mostrarle la fotografía de un elefante. Esto sirve admirablemente para definir un elefante en términos observables que pueden ser comprendidos por un niño. Por analogía, existe la tentación de creer que, cuando un científico introduce términos teóricos, debe ser capaz de definirlos en términos familiares. Pero esto no es posible. No hay forma en que un físico pueda mostrarnos una fotografía de la electricidad en la forma en que puede mostrarle a un niño la fotografía de un elefante. Incluso la célula de un organismo, aunque no puede ser vista a ojo desnudo, puede ser representada por una imagen porque la célula puede ser vista por un microscopio. Pero no poseemos la fotografía de un electrón. No podemos decir cómo se ve o cómo se siente, porque no puede ser visto o tocado. Lo más que podemos hacer es decir que es un cuerpo extremadamente pequeño que se comporta de cierta manera. Esto puede parecer análogo a nuestra descripción del elefante. Podemos describir un elefante como un animal que se comporta de cierta manera. ¿Por qué no hacer lo mismo con un electrón?

La respuesta es que un físico puede describir el comportamiento de un electrón únicamente estableciendo leyes teóricas, y éstas contienen sólo términos teóricos. Describen el campo producido por un electrón, la reacción de un electrón a un campo, etc. Si un electrón se encuentra en un campo electrostático, su velocidad acelerará de cierta forma. Desafortunadamente, la aceleración del electrón es un no observable. No es como la aceleración de una bola de billar, que puede estudiarse por observación

directa. No hay manera en que un concepto teórico pueda definirse en términos de observables. Debemos, por tanto, resignarnos al hecho de que las definiciones del tipo que se pueden suministrar para los términos observables no pueden ser formuladas para los términos teóricos.

Es cierto que algunos autores, incluyendo a Bridgman, se han referido a estas reglas como “definiciones operacionales”. Bridgman tenía cierta justificación, porque utilizó sus reglas en una forma un tanto distinta, pienso, de la forma en que la mayoría de los físicos las utilizaron. Bridgman era un gran físico, y era muy consciente de su desviación del uso común de estas reglas, pero estaba dispuesto a aceptar ciertas formas de expresión nada comunes, y esto explica su desviación. En un capítulo anterior señalamos que Bridgman prefería decir que no hay un único concepto de intensidad en las corrientes eléctricas, sino una docena de conceptos. Cada procedimiento por el cual se puede medir una magnitud proporciona una definición operacional para tal magnitud. Debido a que hay distintos procedimientos para medir la corriente, hay también distintos conceptos. En aras de la conveniencia, el físico habla de un solo concepto de corriente. Estrictamente hablando, creía Bridgman, uno debe reconocer muchos conceptos distintos, cada uno definido por un procedimiento de medición operacional distinto.

Nos encontramos ante una elección entre dos lenguajes físicos distintos. Si se opta por seguir el procedimiento habitual, entonces los diversos conceptos de corriente serán remplazados por un solo concepto. Esto significa, de todos modos, que uno pone al concepto en sus leyes teóricas, porque las reglas operacionales sólo son reglas de correspondencia, como yo las llamo, que conectan los términos teóricos con los empíricos. Debe renunciarse a cualquier pretensión de poseer una definición - esto es, una definición operacional - del concepto teórico. Bridgman podía hablar de tener reglas operacionales para sus términos teóricos porque no se refería a un concepto general. Se refería a conceptos parciales, cada uno definido por un procedimiento empírico distinto.

Incluso en la terminología de Bridgman la cuestión de si sus conceptos parciales pueden ser bien definidos por reglas operacionales es problemática. Reichenbach habla a menudo de lo que llama “definiciones de coordinación”. (En sus publicaciones en alemán las llama *Zuordnungsdefinitionen*, de *zuordnen*, que significa coordinar.) Quizá “coordinación” es un mejor término que “definición” para lo que en realidad hace Bridgman. En la geometría, por ejemplo, Reichenbach señala que el sistema axiomático

de esta ciencia, como fue desarrollado por David Hilbert, por ejemplo, es un sistema axiomático no interpretado. Los conceptos básicos de punto, línea, y plano bien podrían llamarse “clase alfa”, “clase beta”, y “clase gama”. Pero no debemos dejarnos llevar por el sonido familiar de las palabras, como “punto” y “línea”, y pensar que deben ser tomadas en su significado ordinario. En el sistema axiomático, son términos no interpretados. Pero cuando aplicamos la geometría a la física, estos términos deben ser conectados con algo en el mundo físico. Podemos decir, por ejemplo, que las líneas de la geometría están ejemplificadas por rayos de luz en un vacío o por cuerdas estiradas. Para conectar los términos no interpretados con los fenómenos físicos observables, debemos tener reglas para establecer la conexión.

El cómo llamemos a estas reglas es, desde luego, sólo una cuestión terminológica; debemos tener cuidado y no hablar de ellas como definiciones. No son definiciones en ningún sentido estricto. No podemos ofrecer una definición realmente adecuada del concepto geométrico de “línea” si nos referimos a cualquier cosa en la naturaleza. Los rayos de luz, las cuerdas estiradas, etc., son sólo aproximadamente rectas; es más, ni siquiera son líneas, sino segmentos lineales. En la geometría, una línea es infinita en longitud y totalmente recta, y ninguna de estas propiedades se encuentra en fenómeno alguno en la naturaleza. Es por esto que no es posible ofrecer una definición operacional, en el sentido estricto de la palabra, de los conceptos en la geometría teórica. Lo mismo es cierto para todos los demás conceptos teóricos de la física. Estrictamente hablando, no hay “definiciones” de tales conceptos. Yo prefiero no hablar de “definiciones operacionales”, ni tampoco utilizar el término “definiciones de coordinación” de Reichenbach. En mis publicaciones (solamente he escrito sobre esto en los últimos años) las he llamado “reglas de correspondencia”.

Campbell y otros autores suelen hablar de las entidades en la física teórica como entidades matemáticas. Por esto quieren decir que las entidades están relacionadas unas con otras en formas que pueden expresarse por funciones matemáticas. Pero no son entidades matemáticas del tipo que se puede definir en las matemáticas puras. En éstas, es posible definir diversos tipos de números, la función del logaritmo, la función exponencial, etc. Pero no es posible definir términos como “electrón” y “temperatura” a partir de las matemáticas puras. Los términos físicos pueden ser introducidos sólo con la ayuda de constantes no lógicas, basadas sobre observaciones del mundo real. Aquí se presenta una diferencia esencial entre un sistema axiomático en las matemáticas y un sistema axiomático en la física.

Si queremos ofrecer la interpretación de un término en un sistema axiomático matemático, podemos hacerlo ofreciendo una definición en la lógica. Consideremos, por ejemplo, el término “número” tal como se utiliza en el sistema axiomático de Peano. Podemos definirlo en términos lógicos a partir del método de Frege-Russell, por ejemplo. De esta forma el concepto de “número” adquiere una definición completa, explícita, sobre la base de la lógica pura. No hay necesidad de establecer una conexión entre el número 5 y observables como “azul” y “caliente”. Los términos únicamente tienen una interpretación lógica; no se necesita ninguna conexión con el mundo real. A veces suele llamársele teoría a un sistema axiomático en las matemáticas. Los matemáticos hablan de teoría de conjuntos, teoría de grupos, teoría de matrices, teoría de la probabilidad. En este caso, la palabra “teoría” es utilizada de una forma puramente analítica. Denota un sistema deductivo que no hace referencia alguna al mundo real. Siempre debemos tener en mente que un uso así de la palabra “teoría” es completamente distinto de su uso referente a teorías empíricas como la teoría de la relatividad, la teoría cuántica, la teoría psicoanalítica, y la teoría económica keynesiana.

Un sistema de postulados en la física no puede tener, como sí lo hacen las teorías matemáticas, un aislamiento espléndido del mundo. Sus términos axiomáticos - “electrón”, “campo”, etc. - deben ser interpretados a partir de reglas de correspondencia que los conecten con fenómenos observables. Esta interpretación es necesariamente incompleta, y como es incompleta, el sistema siempre está abierto a la posibilidad de que se añadan nuevas reglas de correspondencia. En realidad, esto es lo que sucede continuamente en la historia de la física. No estoy pensando en una revolución en la física en donde se desarrolla una teoría completamente nueva, sino en cambios menos radicales que modifican las teorías existentes. La física del siglo XIX es un buen ejemplo de esto, porque se establecieron la mecánica y el electromagnetismo clásicos y, por muchas décadas, hubo relativamente pocos cambios en sus leyes fundamentales. Las teorías básicas de la física se mantuvieron sin cambios. Sin embargo, hubo una adición constante de nuevas reglas de correspondencia, porque continuamente se desarrollaban nuevos procedimientos para medir tal o cual magnitud.

Desde luego, los físicos siempre se enfrentan al peligro de que puedan desarrollar reglas de correspondencia que resulten incompatibles entre sí o con las leyes teóricas. Pero siempre que no ocurra una incompatibilidad así, son libres de añadir nuevas reglas de correspondencia. El procedimiento es interminable. Siempre existe la posibilidad de añadir nuevas reglas y, de este modo, de incrementar la cantidad de

interpretación específica para los términos teóricos; pero no importa qué tanto aumente esto, la interpretación nunca es definitiva. En un sistema matemático sucede lo contrario. Ahí, la interpretación lógica de un término axiomático *es* completa. Aquí tenemos otra razón más para renunciar a hablar de términos teóricos como “definidos” a partir de reglas de correspondencia. Esto tiende a difuminar la importante distinción entre la naturaleza de un sistema axiomático en las matemáticas puras y en la física teórica.

¿No es posible interpretar un término teórico por reglas de correspondencia tan completas que no sean posibles más interpretaciones? Quizá el mundo real está limitado en su estructura y en sus leyes. Eventualmente podría llegarse a un punto más allá del cual ya no haya lugar para fortalecer la interpretación de un término por nuevas reglas de correspondencia. En este caso, ¿no proporcionarían las reglas una definición final, explícita, para el término? Sí, pero entonces el término ya no sería teórico. Se volvería parte del lenguaje de observación. La historia de la física aún no ha mostrado que la física se volverá completa; únicamente ha habido una adición constante de nuevas reglas de correspondencia y una modificación continua en las interpretaciones de los términos teóricos. No hay forma de saber si este proceso es infinito o si, eventualmente, llegará a una especie de final.

Puede mirarse de esta manera. No hay ninguna prohibición en la física en contra de hacer reglas de correspondencia para un término tan fuertes que éste se vuelva explícitamente definido y, por tanto, deje de ser teórico. Tampoco hay base alguna para asumir que siempre será posible añadir nuevas reglas de correspondencia. Pero como la historia de la física ha mostrado una modificación de conceptos teóricos constante, incesante, la mayoría de los físicos desaconsejarían reglas de correspondencia tan fuertes que un término teórico se vuelva explícitamente definido. Además, es un procedimiento totalmente innecesario. Nada se gana con él. Incluso podría tener el efecto no deseado de impedir el progreso.

Claro está que, de nuevo, debemos reconocer que la distinción entre observables y no observables es una cuestión de grado. Podríamos ofrecer una definición explícita, por procedimientos empíricos, de un concepto como la longitud, porque es fácil y directamente medible, y poco probable que sea modificado por nuevas observaciones. Pero sería temerario buscar reglas de correspondencia tan fuertes que permitan que un término como “electrón” sea explícitamente definido. El concepto “electrón” está tan

lejos de las observaciones simples, directas, que es mejor mantenerlo teórico, abierto a modificaciones a partir de nuevas observaciones.

## CAPÍTULO 25

### Cómo nuevas leyes empíricas se derivan de leyes teóricas

En el capítulo 24, nuestra discusión se ocupó de las formas en que se utilizan las reglas de correspondencia para unir los términos no observables de una teoría con los términos observables de las leyes empíricas. Esto lo podemos aclarar más con unos cuantos ejemplos de la manera en que las leyes empíricas en realidad han sido derivadas de las leyes de una teoría.

El primer ejemplo se refiere a la teoría cinética de los gases. Su modelo, o cuadro esquemático, es uno de pequeñas partículas llamadas átomos, todas en una agitación constante. En su forma original, la teoría consideró estas partículas como pequeñas pelotas, todas con la misma masa y, cuando la temperatura del gas es constante, la misma velocidad constante. Más tarde se descubrió que el gas no estaría en un estado constante si cada partícula tuviese la misma velocidad, y fue necesario encontrar una distribución probable de las velocidades que se mantuviese estable. De acuerdo con esta distribución, había una cierta probabilidad de que cualquier molécula se encontrase dentro de un determinado rango sobre una escala de velocidad.

Cuando la teoría cinética de los gases fue desarrollada por primera vez, muchas de las magnitudes que tenían lugar en las leyes de la teoría eran desconocidas. Nadie conocía la masa de una molécula, o cuántas moléculas estaban contenidas en un centímetro cúbico de gas con una cierta temperatura y presión. Estas magnitudes eran expresadas por determinados parámetros escritos en las leyes. Después de formuladas las ecuaciones, se confeccionaba un diccionario de reglas de correspondencia. Estas reglas de correspondencia conectaban los términos teóricos con los fenómenos observables en una forma tal que fue posible determinar indirectamente los valores de los parámetros en la ecuación. Esto, a su vez, hizo posible derivar leyes empíricas. Una regla de correspondencia establece que la temperatura del gas corresponde a la energía cinética media de las moléculas. Otra regla de correspondencia conecta la presión del gas con el impacto de las moléculas sobre la pared de confinamiento de un recipiente. Aunque este es un proceso discontinuo que supone moléculas discretas, el efecto total puede ser considerado como una fuerza de presión constante sobre la pared del

recipiente. Así, por medio de reglas de correspondencia, la presión medida macroscópicamente por un manómetro puede expresarse en términos de la mecánica estadística de las moléculas.

¿Cuál es la densidad del gas? Densidad es masa por unidad de volumen, pero ¿cómo medimos la densidad de una molécula? De nuevo, nuestro diccionario - un diccionario muy sencillo - proporciona la regla de correspondencia. La masa total  $M$  del gas es la suma de las masas  $m$  de las moléculas.  $M$  es observable (simplemente basta con pesar el gas), pero  $m$  es teórica. El diccionario de reglas de correspondencia da la conexión entre los dos conceptos. Con su ayuda, son posibles las pruebas empíricas de diversas leyes derivadas de nuestra teoría. Sobre la base de la teoría, es posible calcular qué le sucederá a la presión del gas cuando su volumen permanece constante y su temperatura es incrementada. Podemos calcular qué le sucederá a una onda sonora producida por haber golpeado un costado del recipiente, y qué le sucederá si únicamente calentamos una parte del gas. Estas leyes teóricas están elaboradas en términos de diversos parámetros que tienen lugar dentro de las ecuaciones de la teoría. El diccionario de las reglas de correspondencia nos permite expresar estas ecuaciones como leyes empíricas, en donde los conceptos son mensurables, para que los procedimientos empíricos puedan suministrar valores para los parámetros. Si pueden confirmarse las leyes empíricas, esto supone una confirmación indirecta de la teoría. Muchas de las leyes empíricas para los gases eran conocidas, desde luego, antes de desarrollada la teoría cinética. Para estas leyes, la teoría supuso una explicación. Además, la teoría condujo a leyes empíricas hasta entonces desconocidas.

El poder de una teoría para predecir nuevas leyes empíricas está asombrosamente ejemplificado por la teoría del electromagnetismo, desarrollada alrededor de 1860 por dos grandes físicos ingleses, Michael Faraday y James Clerk Maxwell. (Faraday hizo casi todo el trabajo experimental, mientras que Maxwell hizo casi todo el trabajo matemático.) La teoría trataba con cargas eléctricas y cómo se comportaban en campos eléctricos y magnéticos. El concepto de electrón - una partícula diminuta con una carga eléctrica elemental - no fue formulado hasta finales de ese siglo. El célebre conjunto de ecuaciones diferenciales de Maxwell para describir los campos electromagnéticos únicamente suponía pequeños cuerpos discretos de una naturaleza desconocida, capaces de llevar una carga eléctrica o un polo magnético. ¿Qué sucede cuando una corriente se mueve a lo largo de un alambre de cobre? El diccionario de la teoría hizo este fenómeno observable corresponder con el movimiento real de pequeños

cuerpos con carga a lo largo de un cable. A partir del modelo teórico de Maxwell fue posible (con la ayuda de reglas de correspondencia, desde luego) derivar muchas de las leyes conocidas de la electricidad y el magnetismo.

El modelo hizo mucho más que esto. En las ecuaciones de Maxwell había un determinado parámetro  $c$ . De acuerdo con su modelo, una perturbación en un campo electromagnético se propagaría por ondas teniendo la velocidad  $c$ . Experimentos eléctricos mostraron que el valor de  $c$  es de aproximadamente  $3 \times 10^{10}$  centímetros por segundo. Éste era el mismo que el valor conocido para la velocidad de la luz, y parecía poco probable que fuese un mero accidente. ¿Es posible, se preguntaron los físicos, que la luz sea simplemente un caso especial de la propagación de una oscilación electromagnética? No pasó mucho tiempo antes de que las ecuaciones de Maxwell proporcionasen explicaciones para todo tipo de leyes ópticas, incluyendo la refracción, la velocidad de la luz en distintos medios, y muchos otros.

Los físicos habrían quedado lo suficientemente satisfechos con descubrir que el modelo de Maxwell explicaba leyes eléctricas y magnéticas conocidas; pero recibieron una doble recompensa. ¡La teoría también explicaba leyes ópticas! Finalmente, la gran fuerza del nuevo modelo la reveló su poder de predecir, de formular leyes empíricas previamente desconocidas.

El primer ejemplo lo proporcionó Heinrich Hertz, el físico alemán. Alrededor de 1890 comenzó sus célebres experimentos para ver si las ondas electromagnéticas de baja frecuencia podían producirse y detectarse en el laboratorio. La luz es una oscilación y propagación electromagnética de ondas a muy alta frecuencia. Pero las leyes de Maxwell hicieron posible que tales ondas tuvieran *cualquier* frecuencia. Los experimentos de Hertz resultaron en su descubrimiento de lo que en un principio se llamó ondas de Hertz. Ahora se les llama ondas de radio. En un primer momento, Hertz fue capaz de transmitir estas ondas de un oscilador a otro sólo por una distancia pequeña; primero unos pocos centímetros, después un metro o más. Hoy en día, una estación de radio envía sus ondas por miles de kilómetros.

El descubrimiento de las ondas de radio fue sólo el comienzo de la derivación de nuevas leyes a partir del modelo teórico de Maxwell. Se descubrieron los rayos X y, al principio, se pensó que eran partículas con una enorme velocidad y poder penetrativo. Después a los físicos se les ocurrió que, al igual que la luz y las ondas de radio, los rayos X podían ser ondas electromagnéticas aunque de una frecuencia extremadamente alta, mucho más alta que la frecuencia de la luz visible. Esto también fue confirmado

posteriormente, y las leyes relativas a los rayos X fueron derivadas de las ecuaciones de campo de Maxwell fundamentales. Los rayos X probaron ser ondas de un determinado rango de frecuencia dentro de la mucho más amplia banda de frecuencia de los rayos gama. Los rayos X empleados hoy en la medicina son simplemente rayos gama de una cierta frecuencia. Todo esto fue en gran parte previsible sobre la base del modelo de Maxwell. Sus leyes teóricas, junto con las reglas de correspondencia, condujeron a una enorme variedad de nuevas leyes empíricas.

La gran variedad de campos en donde se encontró una confirmación experimental contribuyó de manera especial a la fuerte confirmación general de la teoría de Maxwell. Originalmente, las diversas ramas de la física se habían desarrollado por razones prácticas; en la mayoría de los casos, las divisiones estaban basadas sobre nuestros distintos órganos sensoriales. Como los ojos perciben la luz y el color, llamamos ópticos a esos fenómenos; como nuestros oídos escuchan sonidos, llamamos acústica a una rama de la física, y como nuestros cuerpos sienten calor, tenemos una teoría del calor. Encontramos útil construir máquinas simples basadas sobre los movimientos de los cuerpos, y a eso lo llamamos mecánica. Otros fenómenos, como la electricidad y el magnetismo, no pueden ser directamente percibidos, aunque sus consecuencias sí pueden ser observadas.

En la historia de la física siempre ha sido un gran paso hacia adelante cuando una rama de la física puede explicarse por medio de otra. Se encontró que la acústica, por ejemplo, era sólo una parte de la mecánica, porque las ondas sonoras son simplemente ondas elásticas en los sólidos, líquidos, y gases. Ya hemos hablado de cómo se explicaron las leyes de los gases por la mecánica de las moléculas en movimiento. La teoría de Maxwell fue otro gran salto hacia la unificación de la física. Se encontró que la óptica era una parte de la teoría electromagnética. Poco a poco, creció la noción de que toda la física podría llegar algún día a unificarse en una gran teoría. En la actualidad, existe una enorme brecha entre el electromagnetismo por un lado, y la gravitación por el otro. Einstein hizo varios intentos por desarrollar una teoría de campo unificada que pudiera cerrar esta brecha, y más recientemente, Heisenberg y otros han hecho intentos similares. Pero hasta ahora no se ha ideado teoría alguna que sea completamente satisfactoria o que proporcione nuevas leyes empíricas capaces de ser confirmadas.

La física comenzó, originalmente, como una macrofísica descriptiva, conteniendo una enorme cantidad de leyes empíricas sin conexiones aparentes entre

ellas. Al comienzo de una ciencia, los científicos pueden estar muy orgullosos de haber descubierto cientos de leyes. Pero, a medida que las leyes proliferan, se vuelven infelices con este estado de cosas; comienzan a buscar principios subyacentes, unificadores. En el siglo XIX hubo una considerable controversia sobre la cuestión de los principios subyacentes. Algunos sentían que la ciencia debe encontrar tales principios, porque de otra forma no sería más que una descripción de la naturaleza, y no una explicación real. Otros pensaban que ese era un enfoque incorrecto, que los principios subyacentes sólo pertenecen a la metafísica. Sentían que la tarea del científico consiste simplemente en describir, en descubrir *cómo* ocurren los fenómenos naturales, y no *por qué*.

Hoy en día sonreímos un poco con la gran controversia sobre la descripción versus la explicación. Podemos ver que había algo que decir para ambos lados, pero que su modo de debatir la cuestión era estéril. No hay una oposición real entre la explicación y la descripción. Desde luego, si tomamos la descripción en el sentido más estricto, como simplemente describiendo lo que un determinado científico hizo en un cierto día con determinados materiales, entonces los oponentes de la mera descripción tenían mucha razón en pedir más, en pedir una explicación real. Pero hoy vemos que la descripción en el sentido más amplio, el de poner fenómenos en el contexto de leyes más generales, proporciona el único tipo de explicación que puede ofrecerse para cualquier fenómeno. Similarmente, si los proponentes de la explicación se referían a una explicación metafísica, no sustentada en procedimientos empíricos, entonces sus oponentes tenían razón en insistir que la ciencia debe ocuparse solamente de la descripción. Cada lado tenía un punto válido. Tanto la descripción como la explicación, bien entendidas, son aspectos esenciales de la ciencia.

Los primeros esfuerzos de explicación, aquellos de los filósofos naturales de Jonia, eran sin duda parcialmente metafísicos; el mundo es todo fuego, o todo agua, o todo cambio. Esos primeros esfuerzos de explicación científica pueden ser vistos de dos maneras distintas. Podemos decir: “Esto no es ciencia, sino pura metafísica. No hay posibilidad de confirmación, no hay reglas de correspondencia para conectar la teoría con fenómenos observables.” Por otra parte, podemos decir: “Estas teorías jónicas son ciertamente no científicas, pero por lo menos son visiones pictóricas de teorías. Son los primeros comienzos primitivos de la ciencia.”

No debemos olvidar que, tanto en la historia de la ciencia como en la historia psicológica de cualquier científico creativo, a menudo una teoría apareció primero como

un tipo de visualización, una visión que llega como inspiración a un científico mucho antes de que se descubran reglas de correspondencia que puedan ayudar en confirmar su teoría. Cuando Demócrito dijo que todo consiste en átomos, ciertamente no tuvo la menor confirmación para su teoría. No obstante, fue un golpe de genio, una visión profunda, porque dos mil años después su visión fue confirmada. No debemos, por tanto, rechazar precipitadamente cualquier visión anticipatoria de una teoría, siempre que sea una que pueda ser probada en algún tiempo futuro. Sin embargo, estamos en tierra firme si lanzamos la advertencia de que ninguna hipótesis puede clamar ser científica a menos que exista la *posibilidad* de que pueda ser probada. No tiene que ser confirmada para ser una hipótesis, pero debe haber reglas de correspondencia que permitan, en principio, medios para confirmar o desconfirmar la teoría. Puede ser extremadamente difícil pensar en experimentos que puedan probar la teoría; este es hoy el caso con varias teorías del campo unificado que se han propuesto. Pero si tales pruebas son posibles en principio, la teoría puede llamarse teoría científica. Cuando una teoría es propuesta por primera vez, no debemos demandar más que esto.

El desarrollo de la ciencia desde la filosofía temprana fue un proceso gradual, de un paso a otro. Los filósofos jónicos tenían sólo las teorías más primitivas. Por el contrario, el pensamiento de Aristóteles fue mucho más claro y con una base científica más sólida. Aristóteles llevó a cabo experimentos, y sabía de la importancia de éstos, aunque en otros aspectos fue un apriorista. Estos fueron los comienzos de la ciencia. Pero no fue hasta el tiempo de Galileo Galilei, alrededor de 1600, que se puso un énfasis realmente grande en el método científico por encima del razonamiento apriorístico de la naturaleza. Si bien muchos de los conceptos de Galileo ya habían sido establecidos como conceptos teóricos, él fue el primero en colocar la física teórica sobre un fundamento empírico sólido. Es ciertamente la física de Newton (alrededor de 1670) la que exhibe la primera teoría exhaustiva, sistemática, que contiene no observables como conceptos teóricos: la fuerza universal de la gravitación, un concepto general de masa, propiedades teóricas de los rayos de luz, etc. Su teoría de la gravedad fue de una gran generalidad. Antes que Newton propusiera esta teoría, la ciencia carecía de explicación alguna que diera cuenta tanto de la caída de una piedra como de los movimientos de los planetas alrededor del Sol.

Hoy nos es muy fácil comentar qué extraño es que a nadie antes que a Newton se le haya ocurrido que la misma fuerza podría ser la causante de que las manzanas caigan y de que la Luna gire alrededor de la Tierra. En realidad, no es probable que este

pensamiento se le ocurriera a cualquiera. No es que la *respuesta* fuese difícil; es que nadie había hecho la *pregunta*. Este es un punto vital. Nadie había preguntado: “¿Cuál es la relación entre las fuerzas que ejercen los cuerpos celestes entre sí y las fuerzas terrestres que causan que los objetos caigan al suelo?” Incluso hablar en términos como “terrestre” y “celeste” es hacer una bipartición, cortar la naturaleza en dos regiones fundamentalmente distintas. Newton requirió de una gran perspicacia para romper esta división, para afirmar que no hay una escisión tan fundamental. Hay una naturaleza, un mundo. La ley de la gravitación universal de Newton fue la ley teórica que explicó por primera vez tanto la caída de una manzana como las leyes de Kepler para los movimientos de los planetas. En los días de Newton, era una dificultad psicológica, una aventura extremadamente osada pensar en términos tan generales.

Más tarde, desde luego, por medio de reglas de correspondencia, los científicos descubrieron cómo determinar las masas de los cuerpos astronómicos. La teoría de Newton también dijo que dos manzanas, una al lado de otra sobre una mesa, se atraen entre sí. No se mueven una hacia la otra porque la fuerza de atracción es extremadamente pequeña y la fricción sobre la mesa muy grande. Eventualmente, los físicos fueron capaces de medir las fuerzas gravitacionales entre dos cuerpos en el laboratorio. Utilizaron una balanza de torsión consistente en una barra con una bola de metal en cada extremo, suspendida en su centro por un largo cable atado a un techo alto. (Entre más alto y delgado el cable, más fácil girará la barra.) En realidad, la barra nunca llegó a un reposo absoluto, sino que siempre oscilaba un poco. Pero sí podía establecerse el punto medio de la oscilación de la barra. Después de haber determinado la posición exacta del punto medio, cerca de la barra se colocaba un gran montón de ladrillos de plomo. (Se recurrió al plomo debido a su gran gravedad específica. El oro tiene una gravedad específica mayor, pero los ladrillos de oro son caros.) Se encontró que la media de la barra oscilante se había desplazado lo suficiente como para que una de las bolas de metal en uno de los extremos de la barra se acercase a la pila de plomo. El desplazamiento fue de sólo una fracción de milímetro, pero fue suficiente para proporcionar la primera observación de un efecto gravitacional entre dos cuerpos en un laboratorio; un efecto que había sido previsto por la teoría de la gravitación de Newton.

Antes que Newton ya se sabía que las manzanas caían al suelo y que la Luna giraba alrededor de la Tierra. Nadie antes que Newton pudo haber previsto el resultado del experimento con la balanza de torsión. Este es un ejemplo clásico del poder de una teoría para predecir un nuevo fenómeno no observado con anterioridad.

## CAPÍTULO 26

### La oración de Ramsey

La teoría científica, en el sentido en que hemos utilizado el término - postulados teóricos combinados con reglas de correspondencia que unen términos teóricos y observacionales -, ha sido intensamente analizada y discutida por los filósofos de la ciencia en los últimos años. Mucha de esta discusión es tan nueva que aún no ha sido publicada. En este capítulo introduciremos un nuevo enfoque importante para el tema, uno que se remite a un artículo poco conocido del lógico y economista de Cambridge, Frank Plumpton Ramsey.

Ramsey murió en 1930 a la edad de 26 años. No vivió para escribir un libro, pero después de su muerte Richard Bevan Braithwaite editó una colección de sus trabajos bajo el título *The Foundations of Mathematics*,<sup>30</sup> publicado en 1931. En el libro aparece un pequeño artículo titulado “Theories”. En mi opinión, este artículo merece mucho más reconocimiento del que ha recibido. Quizá el título del libro atrajo únicamente la atención de lectores interesados en los fundamentos lógicos de las matemáticas, de tal suerte que otros artículos importantes en el libro, como el artículo sobre las teorías, tendieron a pasarse por alto.

Ramsey estaba desconcertado por el hecho de que los términos teóricos - términos para los objetos, propiedades, fuerzas, y eventos descritos en una teoría - no son significativos en el mismo sentido en que los términos observacionales - “barra de hierro”, “caliente”, y “rojo” - son significativos. ¿Cómo, pues, adquiere significado un término teórico? Todo mundo concuerda con que deriva su significado del contexto de la teoría. “Gen” deriva su significado de la teoría genética. “Electrón” está interpretado por los postulados de la física de partículas. Pero nos encontramos con muchas cuestiones confusas, perturbadoras. ¿Cómo puede determinarse el significado *empírico* de un término teórico? ¿Qué nos dice una teoría dada sobre el mundo real? ¿Describe la estructura del mundo real, o es sólo un dispositivo abstracto, artificial, utilizado para poner orden en la gran masa de experiencias un tanto a la manera en que un sistema de contabilidad hace posible mantener en orden los registros de las transacciones

---

<sup>30</sup> Ramsey, *The Foundations of Mathematics* (Londres: Routledge and Kegan Paul, 1931), reimpresso en libro de bolsillo, Littlefield, Adams (1960).

financieras de una empresa? ¿Puede decirse que un electrón “existe” en el mismo sentido en que una barra de hierro existe?

Existen procedimientos que miden las propiedades de una barra de una manera simple y directa. Pueden determinarse con gran precisión su volumen y su peso. Podemos medir las longitudes de onda de la luz emitida por la superficie de una barra de hierro calentada, y definir, de forma precisa, a qué nos referimos cuando decimos que la barra de hierro está “roja”. Pero cuando tratamos con las propiedades de las entidades teóricas, como el “espín” de una partícula elemental, sólo tenemos procedimientos complejos e indirectos para dar al término un significado empírico. Primero debemos introducir “espín” en el contexto de una elaborada teoría de la mecánica cuántica, y después conectar la teoría con observables de laboratorio a partir de otro complejo conjunto de postulados: las reglas de correspondencia. Claramente, el espín no está empíricamente fundamentado de la manera simple y directa en que lo está la rojez de una barra de hierro calentada. ¿Exactamente cuál es su estatus cognitivo? ¿Cómo pueden distinguirse los términos teóricos, que en algún sentido deben estar conectados con el mundo real y sujetos a pruebas empíricas, de aquellos términos metafísicos que uno encuentra a menudo en la filosofía tradicional (términos que carecen de un significado empírico)? ¿Cómo puede estar justificado el derecho de un científico a hablar de conceptos teóricos sin, al mismo tiempo, justificar el derecho de un filósofo a utilizar términos metafísicos?

Al buscar respuestas para estas preguntas desconcertantes, Ramsey sugirió algo novedoso y asombroso. Propuso que el sistema combinado de postulados teóricos y de correspondencia de una teoría fuese remplazado por lo que hoy se conoce como “la oración de Ramsey de una teoría”. En la oración de Ramsey, que es equivalente a los postulados de la teoría, los términos teóricos no ocurren en absoluto. En otras palabras, las desconcertantes cuestiones son pulcramente eludidas por la eliminación de los mismos términos sobre los cuales se plantean las cuestiones.

Supongamos que estamos ocupados con una teoría que contiene  $n$  términos teóricos: " $T_1$ ", " $T_2$ ", " $T_3$ ", ..., " $T_n$ ". Estos términos son introducidos por los postulados de la teoría. Están conectados con términos directamente observables por las reglas de correspondencia de la teoría. En estas reglas de correspondencia ocurren  $m$  términos observacionales: " $O_1$ ", " $O_2$ ", " $O_3$ ", ..., " $O_m$ ". La teoría misma es una conjunción de todos los postulados teóricos junto con todos los postulados de correspondencia. Una

declaración completa de la teoría contendrá, por tanto, los conjuntos combinados de los términos  $T$  y  $O$ : " $T_1, T_2, \dots, T_n; O_1, O_2, \dots, O_m$ ". Ramsey propuso que, en esta oración, la declaración completa de la teoría, todos los términos teóricos han de ser remplazados por variables de correspondencia: " $U_1, U_2, \dots, U_n$ ", y que a esta fórmula debe añadirse lo que los lógicos llaman "cuantificadores existenciales": " $(\exists U_1), (\exists U_2), \dots, (\exists U_n)$ ". Es esta nueva oración, con sus variables  $U$  y sus cuantificadores existenciales, lo que se llama "oración de Ramsey".

Para ver exactamente cómo se elabora esto, consideremos el siguiente ejemplo. Tomemos el símbolo "Mol" para la clase de las moléculas. En lugar de llamar a algo "una molécula", la llamaremos "un elemento de Mol". Similarmente, "Himol" representará "la clase de las moléculas de hidrógeno", y "una molécula de hidrógeno" es "un elemento de Himol". Se asume que hemos fijado un sistema de coordenadas de espacio-tiempo, así que puede representarse un punto de espacio-tiempo por sus cuatro coordenadas:  $x, y, z, t$ . Adoptemos el símbolo "Temp" para el concepto de temperatura. Entonces "la temperatura (absoluta) del cuerpo  $b$ , en el tiempo  $t$ , es 500", puede escribirse como " $\text{Temp}(b, t) = 500$ ". De esta forma, la temperatura es expresada como una relación que involucra un cuerpo, un punto en el tiempo, y un número. "La presión de un cuerpo  $b$ , en el tiempo  $t$ ", puede escribirse como " $\text{Pres}(b, t)$ ". El concepto de masa está representado por el símbolo "Masa". Para "la masa del cuerpo  $b$  (en gramos) es 150", escribimos, " $\text{Masa}(b) = 150$ ". La masa es una relación entre un cuerpo y un número. Represente "Vel" la velocidad de un cuerpo (puede ser un macrocuerpo o un microcuerpo). Por ejemplo, " $\text{Vel}(b, t) = (r_1, r_2, r_3)$ ", en donde el lado derecho de la ecuación se refiere a un tripló de números reales, a saber, los componentes de la velocidad en las direcciones  $x, y$ , y  $z$ . Así, Vel es una relación que supone un cuerpo, una coordenada de tiempo, y un tripló de números reales.

En términos generales, el lenguaje teórico contiene "términos de clase" (como los términos para los macrocuerpos, los microcuerpos, y los eventos) y "términos de relación" (como los términos para las distintas magnitudes físicas).

Consideremos la teoría  $TC$ . (" $T$ " representa los postulados teóricos de la teoría, y " $C$ " los postulados que dan las reglas de correspondencia.) Los postulados de esta teoría incluyen algunas leyes de la teoría cinética de los gases, leyes relativas a los movimientos de las moléculas, sus velocidades, colisiones, etc. Existen leyes generales sobre cualquier gas, y leyes especiales sobre el hidrógeno. Además, hay leyes de la

teoría-macro-gas sobre la temperatura, la presión, y la masa total de un macro-cuerpo de gas. Supongamos que los postulados teóricos de la teoría *TC* contienen todos los términos mencionados. En aras de la brevedad, en lugar de escribir todos los postulados *T*, escribiremos únicamente los términos teóricos, e indicaremos con puntos el simbolismo de conexión:

*(T)...Mol...Himol...Temp...P...Masa...Vel...*

Para completar la simbolización de la teoría *TC*, debemos considerar los postulados de correspondencia para algunos, aunque no necesariamente para todos, de los términos teóricos. Estos postulados *C* pueden ser reglas operacionales para la medición de la temperatura y la presión (esto es, la descripción de la construcción de un termómetro y un manómetro, y las reglas para determinar los valores de la temperatura y la presión a partir de la lectura de los números en las escalas de los instrumentos). Los postulados *C* contendrán los términos teóricos “Temp” y “P”, así como un número de términos observacionales: "*O*<sub>1</sub>", "*O*<sub>2</sub>", ..., "*O*<sub>*m*</sub>". Así, los postulados *C* pueden expresarse brevemente escribiendo:

*(C)...Temp...O<sub>1</sub>...O<sub>2</sub>...O<sub>3</sub>...P...O<sub>4</sub>...O<sub>m</sub>...*

Toda la teoría puede ahora indicarse de la siguiente forma:

*(TC)...Mol...Himol...Temp...P...Masa...Vel...Temp...O<sub>1</sub>...O<sub>2</sub>...O<sub>3</sub>...P...O<sub>4</sub>...O<sub>m</sub>...*

Para transformar esta teoría *TC* en su oración de Ramsey se requieren dos pasos. Primero, remplazar todos los términos teóricos (términos de clase y términos de relación) por variables de clase y relación escogidas arbitrariamente. Siempre que “Mol” tenga lugar en la teoría, sustituir la variable "*C*<sub>1</sub>", por ejemplo. Siempre que “Himol” tenga lugar en la teoría, sustituirla por otra variable de clase, como "*C*<sub>2</sub>". El término de relación “Temp” es remplazado en todos lados (tanto en las partes *T* como *C* de la teoría) por una variable de relación, como "*R*<sub>1</sub>". De la misma forma, por ejemplo,

“P”, “Masa”, y “Vel” son remplazadas por otras tres variables de relación, " $R_2$ ", " $R_3$ ", y " $R_4$ ", respectivamente. El resultado final puede indicarse como sigue:

$$\dots C_1 \dots C_2 \dots R_1 \dots R_2 \dots R_3 \dots R_4 \dots; \dots R_1 \dots O_1 \dots O_2 \dots O_3 \dots R_2 \dots O_4 \dots O_m \dots$$

Este resultado (que debe pensarse como escrito en su totalidad, y no sólo abreviado como está aquí con la ayuda de puntos) ya no es una oración (como sí lo son  $T$ ,  $C$ , y  $TC$ ). Es una fórmula de oración abierta o, como a veces se le llama, una forma de oración o una función de oración.

El segundo paso, que transforma la fórmula de oración abierta en la oración de Ramsey  ${}^R TC$ , consiste en escribir, delante de la fórmula de oración, seis cuantificadores existenciales, uno para cada una de las seis variables:

$$({}^R TC)(\exists C_1)(\exists C_2)(\exists R_1)(\exists R_2)(\exists R_3)(\exists R_4)[\dots C_1 \dots C_2 \dots R_1 \dots R_2 \dots R_3 \dots R_4 \dots; \dots R_1 \dots O_1 \dots O_2 \dots O_3 \dots R_2 \dots O_4 \dots O_m \dots]$$

Una fórmula precedida por un cuantificador existencial afirma que hay por lo menos una entidad (del tipo al que se refiere) que satisface la condición expresada por la fórmula. Así, la oración de Ramsey indicada arriba dice (más o menos) que hay (por lo menos) una clase  $C_1$ , una clase  $C_2$ , una relación  $R_1$ , una  $R_2$ , una  $R_3$ , y una  $R_4$  de tal manera que:

- (1) las seis clases y relaciones están conectadas entre sí de una forma específica (a saber, como especifica la primera parte o la parte  $T$  de la fórmula),
- (2) las dos relaciones  $R_1$  y  $R_2$  están conectadas con las  $m$  entidades observacionales  $O_1, \dots, O_m$  de una cierta forma (a saber, como especifica la segunda parte o la parte  $C$  de la fórmula).

Lo importante a destacar es que en la oración de Ramsey han desaparecido los términos teóricos. En su lugar hay variables. La variable " $C_1$ " no se refiere a ninguna clase particular. La afirmación es sólo que hay por lo menos una clase que satisface ciertas condiciones. El significado de la oración de Ramsey no cambia de ninguna

manera si las variables son cambiadas arbitrariamente. Por ejemplo, los símbolos " $C_1$ " y " $C_2$ " pueden ser intercambiados o remplazados por otras variables arbitrarias, como " $X_1$ " y " $X_2$ ". El significado de la oración sigue siendo el mismo.

Podría parecer que la oración de Ramsey no es más que otra forma un tanto indirecta de expresar la teoría original. En cierto sentido, esto es verdad. Es fácil mostrar que cualquier declaración sobre el mundo real que se siga de la teoría y que no contenga términos teóricos - es decir, cualquier declaración capaz de ser confirmada empíricamente - también se seguirá de la oración de Ramsey. En otras palabras, la oración de Ramsey tiene precisamente el *mismo poder explicativo y predictivo* que el sistema de postulados original. Ramsey fue el primero en ver esto. Fue una idea importante, aunque pocos de sus colegas le prestaron atención. Una de las excepciones fue Braithwaite, amigo de Ramsey y editor de sus trabajos. En su libro *Scientific Explanation* (1953) Braithwaite discute la idea de Ramsey, enfatizando su importancia.

Lo importante es que ahora podemos evitar todas las molestas cuestiones metafísicas que infestan la formulación original de las teorías, y podemos introducir una simplificación en su propia formulación. Antes de esto teníamos términos teóricos, como "electrón", de dudosa "realidad", debido a que estaban muy alejados del mundo observable. Cualquier significado empírico parcial que pudiese dársele a estos términos sólo podía ser a partir del procedimiento indirecto de establecer un sistema de postulados teóricos y conectar éstos con observaciones empíricas por medio de reglas de correspondencia. En la forma de hablar de Ramsey sobre el mundo externo, un término como "electrón" desaparece. Esto de ninguna manera implica que los electrones desaparezcan, o, más precisamente, que sea lo que sea que en el mundo exterior es simbolizado por la palabra "electrón" desaparezca. La oración de Ramsey sigue afirmando, por medio de sus cuantificadores existenciales, que hay algo en el mundo exterior que tiene todas las propiedades que los físicos asignan al electrón. No cuestiona la existencia - la "realidad" - de este algo. Simplemente propone una manera distinta de hablar sobre ese algo. La molesta cuestión que evita no es "¿Existen los electrones?", sino "¿Cuál es el *significado* exacto del término 'electrón'?" En la forma de hablar de Ramsey sobre el mundo no surge esta cuestión. Ya no es necesario indagar el significado de "electrón", porque el propio término no aparece en el lenguaje de Ramsey.

Es importante comprender - y este punto no fue lo suficientemente recalado por Ramsey - que no puede decirse que este enfoque traiga las teorías al lenguaje observacional si “lenguaje observacional” significa (como suele ser el caso) un lenguaje que únicamente contiene términos observacionales y los términos de la lógica y las matemáticas elementales. La física moderna requiere de matemáticas extremadamente complicadas, de alto nivel. La teoría de la relatividad, por ejemplo, requiere de la geometría no euclidiana y del cálculo tensorial, y la mecánica cuántica requiere de conceptos matemáticos igualmente sofisticados. No puede decirse, por tanto, que una teoría física, expresada como una oración de Ramsey, sea una oración en un lenguaje observacional *simple*. Requiere un lenguaje observacional *extendido*, que sea observacional porque no contenga términos teóricos, pero que haya sido extendido para incluir una lógica avanzada y complicada, que abarque prácticamente la totalidad de las matemáticas.

Supongamos que, en la parte lógica de este lenguaje observacional extendido, ofrecemos una serie  $D_0, D_1, D_2, \dots$  de dominios de entidades matemáticas de tal manera que:

- (1) El dominio  $D_0$  contiene los números naturales  $(0, 1, 2, \dots)$ .
- (2) Para cualquier dominio  $D_n$ , el dominio  $D_{n+1}$  contiene todas las clases de elementos de  $D_n$ .

El lenguaje extendido contiene variables para todos estos tipos de entidades, junto con reglas lógicas aptas para utilizarlos. Es mi opinión que este lenguaje es suficiente no sólo para formular todas las teorías actuales de la física, sino también para todas las teorías futuras, por lo menos por un buen tiempo. Claro está que no es posible prever los tipos de partículas, campos, interacciones, u otros conceptos que los físicos puedan introducir en los siguientes siglos. Pero creo que tales conceptos teóricos, sin importar qué tan bizarros y complejos puedan ser, pueden ser formulados - por medio del dispositivo de Ramsey - esencialmente en el mismo lenguaje observacional

extendido que tenemos ahora, que contiene los términos observacionales combinados con lógica y matemáticas avanzadas.<sup>31</sup>

Por otro lado, Ramsey ciertamente no quiso decir - y nadie lo ha sugerido - que los físicos deban abandonar los términos teóricos en sus discursos y escritos. Hacer esto requeriría declaraciones enormemente complejas. Por ejemplo, es fácil decir, en el lenguaje común, que un cierto objeto tiene una masa de cinco gramos. En la notación simbólica de una teoría, antes de ser cambiada a una oración de Ramsey, uno puede decir que un cierto objeto No. 17 tiene una masa de cinco gramos al escribir " $Masa(17) = 5$ ". Sin embargo, en el lenguaje de Ramsey el término teórico "Masa" no aparece. Sólo está la variable " $R_3$ " (como en el ejemplo anterior). ¿Cómo puede traducirse la oración " $Masa(17) = 5$ " en lenguaje de Ramsey? " $R_3(17) = 5$ " obviamente no nos vale, porque ni siquiera es una oración. La fórmula debe completarse con los supuestos relativos a la relación  $R_3$  que estén especificados en la oración de Ramsey. Además, no es suficiente con elegir sólo aquellas fórmulas-postulados que contiene " $R_3$ ". Se necesitan *todos* los postulados. Por lo tanto, incluso la traducción de esta breve oración al lenguaje de Ramsey requiere de una oración inmensa, que contenga las fórmulas correspondientes a todos los postulados teóricos, a todos los postulados de correspondencia, y a sus cuantificadores existenciales. Inclusive si adoptamos la forma abreviada utilizada anteriormente, la traducción es muy larga:

$$(\exists C_1)(\exists C_2)\dots(\exists R_3)(\exists R_4)[\dots C_1\dots C_2\dots R_1\dots R_2\dots R_3\dots R_4\dots\dots R_1\dots O_1\dots O_2\dots O_3\dots R_2\dots O_4\dots O_m\dots y R_3(17) = 5].$$

Es evidente la inconveniencia de sustituir la forma de hablar de Ramsey para el discurso ordinario de la física en donde se utilizan términos teóricos. Ramsey simplemente quiso dejar en claro que era *posible* formular cualquier teoría en un lenguaje que no requiriese términos teóricos pero que dijera lo mismo que el lenguaje convencional.

Cuando decimos que "dice lo mismo" nos referimos a esto sólo en lo relativo a todas las consecuencias observables. Desde luego, no dice *exactamente* lo mismo. El

---

<sup>31</sup> He defendido esta perspectiva a detalle en mi artículo "Beobachtungssprache und theoretische Sprache", *Dialectica*, 12 (1958), 236-248; reimpresso en W. Ackermann et al, *Logica: Studia Paul Bernays Dedicata* (Neuchâtel (Suiza): Éditions du Griffon, 1959), pp. 32-44.

primer lenguaje presupone que los términos teóricos, como “electrón” y “masa”, apuntan a algo que de alguna manera es *más* que lo que proporciona el contexto de la propia teoría. Algunos autores llaman a esto el “significado excedente” de un término. Cuando tomamos en cuenta este significado excedente, ciertamente los dos lenguajes no son equivalentes. La oración de Ramsey representa todo el *contenido observacional* de una teoría. Se debe a la gran comprensión de Ramsey el que este contenido observacional sea todo lo necesario para que la teoría funcione como teoría, esto es, para explicar hechos conocidos y predecir nuevos.

Es verdad que los físicos encuentran mucho más conveniente hablar en el lenguaje abreviado que incluye términos teóricos, como “protón”, “electrón”, y “neutrón”. Pero si se les pregunta si los electrones existen “realmente”, podrán responder de distintas formas. Algunos físicos se conforman con pensar en términos como “electrón” a la manera de Ramsey. Evitan la cuestión sobre la existencia al afirmar que hay ciertos eventos observables, en cámaras de burbujas, etc., que pueden ser descritos por determinadas funciones matemáticas, dentro del marco de un cierto sistema teórico. Más allá de eso no afirmarán nada. Preguntar si realmente *hay* electrones es lo mismo que preguntar - desde el punto de vista de Ramsey - si la física cuántica es verdadera. La respuesta es que, en la medida en que la física cuántica ha sido confirmada por pruebas, es justificable decir que hay instancias de ciertos tipos de eventos que, en el lenguaje de la teoría, son llamados “electrones”.

Con respecto a la naturaleza de las teorías y de las entidades referidas en las teorías, hay hoy en día dos puntos de vista principales, a menudo llamados “instrumentalismo” y “realismo”.<sup>32</sup> El punto de vista instrumentalista es cercano a la posición defendida por Charles Peirce, John Dewey, y otros pragmatistas, así como por muchos otros filósofos de la ciencia. Desde esta perspectiva, las teorías no son sobre la “realidad”. Simplemente son herramientas del lenguaje para organizar los fenómenos observacionales de la experiencia en algún tipo de patrón que funcione eficientemente para predecir nuevos observables. Los términos teóricos son símbolos convenientes. Adoptamos los postulados que los contienen porque nos resultan útiles, no porque sean “verdaderos”. No tienen un significado excedente más allá de la forma en que funcionan

---

<sup>32</sup> Un debate esclarecedor de los dos o tres puntos de vista sobre esta controversia lo ofrece Ernest Nagel, *The Structure of Science* (Nueva York: Harcourt, Brace & World, 1961), capítulo 6, “The Cognitive Status of Theories”.

en el sistema. No tiene sentido hablar de un electrón “real” o de un campo electromagnético “real”.

Contraria a esta perspectiva está la perspectiva “descriptiva” o “realista” de las teorías. (A veces se distingue entre ellas, pero aquí no es necesario ahondar en estas sutiles diferencias.) Los defensores de este enfoque encuentran conveniente y psicológicamente reconfortante pensar en electrones, campos magnéticos, y ondas gravitacionales como entidades reales sobre las cuales la ciencia aprende cada vez más. Señalan que no hay una línea clara que separe un observable, como una manzana, de un no observable, como un neutrón. Una ameba no es observable para el ojo desnudo, pero sí es observable por medio de un microscopio de luz. Un virus no es observable ni siquiera por medio de un microscopio de luz, pero su estructura puede verse distintamente por medio de un microscopio electrónico. Un protón no puede observarse de esta forma directa, pero sí puede observarse su trayectoria por una cámara de burbujas. Si es permisible decir que la ameba es “real”, entonces no hay razón por la que no lo sea decir que el protón es igualmente real. La perspectiva cambiante sobre la estructura de los electrones, genes, y otras cosas no significa que no haya algo “ahí”, detrás de cada fenómeno observable; simplemente muestra que cada vez se aprende más sobre la estructura de tales entidades.

Los proponentes de la perspectiva descriptiva nos recuerdan que las entidades no observables tienen la costumbre de pasarse al reino de lo observable a medida que se desarrollan instrumentos de observación más poderosos. En el pasado, “virus” era un término teórico. Lo mismo es cierto para “molécula”. Ernst Mach estaba tan en contra de pensar en una molécula como en una “cosa” existente que alguna vez la llamó “imagen sin valor”. Hoy en día, incluso los átomos en una red cristalina pueden ser fotografiados si se les bombardea con partículas elementales; en cierto sentido, el propio átomo se ha vuelto un observable. Los defensores de este punto de vista argumentan que es tan razonable decir que un átomo “existe” como lo es decir que una estrella distante, observable sólo como un pálido punto de luz sobre una placa fotográfica de larga exposición, existe. No hay, desde luego, una forma comparable de observar un electrón. Pero esa no es razón para decir que no existe. Hoy se sabe poco sobre su estructura, pero mañana podría saberse mucho. Es tan correcto, dicen los defensores del enfoque descriptivo, hablar de un electrón como una cosa existente como lo es hablar de manzanas y mesas y galaxias como cosas existentes.

Es evidente que existe una diferencia entre los significados de las formas de hablar de los instrumentalistas y de los realistas. Mi punto de vista, que no desarrollaré aquí, es esencialmente este. Creo que la cuestión no debe discutirse en la forma: “¿Son reales las entidades teóricas?”, sino más bien en la forma: “¿Debemos preferir un lenguaje de la física (y de la ciencia en general) que contenga términos teóricos, o un lenguaje sin tales términos?” Desde este punto de vista, la cuestión se reduce a una de preferencias y decisiones prácticas.<sup>33</sup>

---

<sup>33</sup> Creo que se puede ganar mucho en claridad si las discusiones sobre si ciertas entidades son reales se reemplazan por discusiones sobre preferencias de formas del lenguaje. Esta perspectiva la defiendo a detalle en mi “Empiricism, Semantics, and Ontology”, *Revue internationale de philosophie*, 4 (1950), 20-40. El artículo está reimpresso en Philip Wiener, *Readings*.

## CAPÍTULO 27

### Analiticidad en un lenguaje de observación

Una de las dicotomías más viejas y persistentes en la historia de la filosofía es la dicotomía entre verdad analítica y verdad fáctica. Ha sido expresada de muchas maneras distintas. Kant introdujo la distinción, como ya vimos en el capítulo 18, en términos de lo que llamó declaraciones “analíticas” y “sintéticas”. Autores anteriores hablaron de verdad “necesaria” y verdad “contingente”.

En mi opinión, una clara distinción entre lo analítico y lo sintético supone una importancia suprema para la filosofía de la ciencia. La teoría de la relatividad, por ejemplo, no podría haberse desarrollado si Einstein no se hubiese dado cuenta que la estructura del espacio y tiempo físicos no puede determinarse sin pruebas físicas. Vio claramente la marcada línea divisoria que siempre debe tenerse en mente entre las matemáticas puras, con sus muchos tipos de geometrías lógicamente consistentes, y la física, en donde sólo el experimento y la observación pueden determinar qué geometrías pueden aplicarse de forma más útil al mundo físico. La distinción entre la verdad analítica (que incluye a la verdad lógica y matemática) y la verdad fáctica es igualmente importante en la mecánica cuántica, ya que los físicos exploran la naturaleza de las partículas elementales y buscan una teoría de campo que una la mecánica cuántica con la relatividad. En este capítulo y en el siguiente nos ocuparemos de cómo puede hacerse precisa esta antigua distinción en todo el lenguaje de la ciencia moderna.

Por muchos años ha resultado útil dividir los términos de un lenguaje científico en tres principales grupos:

1. Los términos lógicos, incluyendo todos los términos de las matemáticas puras.
2. Los términos observacionales, o términos-O.
3. Los términos teóricos, o términos-T (a veces llamados “construcciones”).

Es cierto, desde luego, y como ya hemos enfatizado en capítulos anteriores, que no hay un límite claro que separe los términos-O de los términos-T. La elección de una línea de división exacta es un tanto arbitraria. Pero desde un punto de vista práctico la distinción suele ser evidente. Todo mundo estaría de acuerdo en que las palabras para las propiedades, como “azul”, “duro”, “frío”, y las palabras para las relaciones, como “más caliente”, “más pesado”, “más brillante”, son términos-O, mientras que “carga

eléctrica”, “protón”, “campo electromagnético”, son términos-T, que se refieren a entidades que no pueden ser observadas de una manera relativamente simple y directa.

Con respecto a las oraciones en el lenguaje de la ciencia, existe una triple división similar:

1. Oraciones lógicas, que no contienen términos descriptivos.
2. Oraciones observacionales, u oraciones-O, que contienen términos-O pero no términos-T.
3. Oraciones teóricas, u oraciones-T, que contienen términos-T. Las oraciones-T, no obstante, son de dos tipos:
  - a. Oraciones mixtas, que contienen tanto términos-O como términos-T, y
  - b. Oraciones puramente teóricas, que contienen términos-T pero no términos-O.

Todo el lenguaje  $L$  de la ciencia está convenientemente dividido en dos partes. Cada una contiene toda la lógica (incluyendo a las matemáticas). Únicamente difieren con respecto a sus elementos descriptivos, no lógicos.

1. El lenguaje de observación, o lenguaje-O ( $L_O$ ), que contiene oraciones lógicas y oraciones-O, pero no términos-T.
2. El lenguaje teórico, o lenguaje-T ( $L_T$ ), que contiene oraciones lógicas y oraciones-T (con o sin términos-O además de los términos-T).

Los términos-T son introducidos en el lenguaje de la ciencia por una teoría  $T$  que descansa sobre dos tipos de postulados: los teóricos, o postulados-T, y los de correspondencia, o postulados-C. Los postulados-T son las leyes de la teoría. Son puras oraciones-T. Los postulados-C, las reglas de correspondencia, son oraciones mixtas, que combinan términos-T con términos-O. Como ya mostramos, constituyen lo que Campbell llamó el diccionario para unir los lenguajes observacionales y teóricos, lo que Reichenbach llamó definiciones de coordinación, y lo que, en la terminología de Bridgman, podría llamarse postulados operacionales o reglas operacionales.

Con este antecedente, regresemos al problema de distinguir entre una verdad analítica y una fáctica en el lenguaje observacional.

El primer tipo de verdad analítica es la verdad lógica, o “verdad-L” en nuestra terminología. Una oración es L-verdadera cuando es verdadera en virtud de su forma y de los significados de los términos lógicos que tienen lugar en ella. Por ejemplo, la oración “Si ningún soltero es un hombre feliz, entonces ningún hombre feliz es un soltero” es L-verdadera, porque uno puede reconocer su verdad si se conocen los significados y la forma en que se utilizan las palabras lógicas “si”, “entonces”, “ningún”, y “es”, incluso si no se conoce el significado de las palabras descriptivas “soltero”, “feliz”, y “hombre”. Todas las declaraciones (principios y teoremas) de la lógica y de las matemáticas son de este tipo. (El que las matemáticas puras sean reducibles a la lógica fue mostrado por Frege y Russell, aunque algunos puntos de su reducción son controvertidos. Aquí no discutiremos esta cuestión.)

Por otro lado, como ha hecho claro Willard V. O. Quine, el lenguaje observacional es rico en oraciones que son analíticas en un sentido mucho más amplio que L-verdaderas. Estas oraciones no pueden describirse como verdaderas o falsas hasta que se hayan comprendido los significados de sus términos descriptivos así como los significados de sus términos lógicos. El conocido ejemplo de Quine es: “Ningún soltero está casado.” La verdad de esta oración no es, evidentemente, una cuestión de los hechos contingentes del mundo, pero tampoco puede llamarse verdadera únicamente por su forma lógica. Además de conocer el significado de “ningún” y de “es”, es necesario saber qué se quiere decir con “soltero” y “casado”. En este caso, todo el que hable castellano estaría de acuerdo con que “soltero” tiene el mismo significado que “un hombre que no está casado”. Una vez aceptados estos significados, es inmediatamente claro que la oración es verdadera, no debido a la naturaleza del mundo, sino a los significados que nuestro lenguaje asigna a las palabras descriptivas. Ni siquiera es necesario comprender estos significados por completo. Basta con saber que las dos palabras tienen significados incompatibles, que un hombre no puede ser descrito, simultáneamente, como soltero y como casado.

Quine propuso, y lo sigo en esto, que el término “analítico” sea utilizado para “lógicamente verdadero” en el sentido amplio, el sentido que incluye oraciones del tipo recién discutido, así como oraciones L-verdaderas. “A-verdadero” es el término que empleo para la verdad analítica en este sentido amplio. De esta forma, todas las oraciones L-verdaderas son A-verdaderas, aunque no todas las oraciones A-verdaderas son L-verdaderas. Una oración L-verdadera es verdadera únicamente por su forma lógica. Una oración A-verdadera, no L-verdadera, es verdadera por los significados

asignados a sus términos descriptivos así como por los significados de sus términos lógicos. Por el contrario, la verdad o falsedad de una oración sintética no está determinada por los significados de sus términos, sino por la información fáctica sobre el mundo físico. “Los objetos caen a la Tierra con una aceleración de 32 pies por segundo por segundo.” No puede decidirse si esta declaración es verdadera o falsa simplemente examinando su significado. Es necesaria una prueba empírica. Una declaración así tiene un “contenido fáctico”. Nos dice algo sobre el mundo real.

Desde luego, ningún lenguaje natural, como el castellano, es tan preciso como para que todo mundo comprenda cada palabra de la misma forma. Por esta razón, no es difícil formular oraciones que sean ambiguas con respecto a su analiticidad; son oraciones cuya analiticidad o sinteticidad discutiremos ahora.

Consideremos, por ejemplo, la afirmación “Todos los pájaros carpinteros cabecirrojos tienen cabezas rojas.” ¿Es analítica o sintética? Al principio uno responderá que es, por supuesto, analítica. “Pájaros carpinteros cabecirrojos” *significa* “pájaros carpinteros que tienen cabezas rojas”, así que la oración es equivalente a la afirmación de que todos los pájaros carpinteros con cabezas rojas tienen cabezas rojas. Una oración así no es sólo A-verdadera, sino también L-verdadera.

Se tiene razón *si* el significado de “pájaro carpintero cabecirrojo” es tal que “tener una cabeza roja” es, en realidad, un componente esencial del significado. Pero, ¿es un componente esencial? Un ornitólogo podría tener una comprensión distinta de “pájaro carpintero cabecirrojo”. Para él, el término podría referirse a una especie de pájaro definida por una determinada estructura corporal, una forma específica del pico, y ciertos hábitos de comportamiento. Podría considerar como muy posible que la especie de este pájaro, en alguna región aislada, pudo haber sufrido una mutación que cambió el color de su cabeza a blanco, digamos. Por razones puramente taxonómicas, seguiría llamando a tales pájaros “pájaros carpinteros cabecirrojos”, aun cuando sus cabezas no fuesen rojas. Serían una variante de la especie. Incluso podría referirse a ellos como “pájaros carpinteros cabeciblancos”. Por lo tanto, si “pájaro carpintero cabecirrojo” es interpretado de una forma tal que tener una cabeza roja *no* sea un componente esencial, entonces la oración es sintética. Es necesario hacer un estudio empírico de todos los pájaros carpinteros cabecirrojos para determinar si todos ellos tienen, en realidad, cabezas rojas.

Incluso la declaración “Si el Sr. Smith es soltero, no tiene esposa.” podría tomarse como sintética por cualquiera que interpretase ciertas palabras de una manera

poco ortodoxa. Por ejemplo, para un abogado la palabra “esposa” puede tener un significado amplio que incluya “concubina”. Si un abogado interpreta “soltero” para significar un hombre no casado legalmente pero toma “esposa” en este sentido amplio, entonces claramente la oración es sintética. Uno debe investigar la vida privada del Sr. Smith para descubrir si la oración es verdadera o falsa.

El problema de la analiticidad puede discutirse con respecto a un lenguaje observacional artificial que pueda construirse estableciendo reglas precisas. Estas reglas no necesitan especificar los significados completos de todas las palabras descriptivas en el lenguaje, sino que deben hacer claras las relaciones de significado entre ciertas palabras a partir de reglas que alguna vez llamé “postulados de significado”, pero que ahora prefiero llamar, sencillamente, “postulados-A” (postulados de analiticidad). Fácilmente podemos imaginar cómo *pueden* darse especificaciones completas para todas las palabras descriptivas del lenguaje. Por ejemplo, podemos especificar los significados de “animal”, “pájaro”, y “pájaro carpintero cabecirrojo” a partir de las siguientes reglas de designación:

(D1) El término “animal” designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., (3)..., (4)..., (5)... (aquí se daría una lista completa de las propiedades definitorias).

(D2) El término “pájaro” designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., (3)..., (4)..., (5) (como en D1), más las propiedades adicionales (6)..., (7)..., (8)..., (9)..., (10)... (todas las propiedades necesarias para especificar el significado de “pájaro”).

(D3) El término “pájaro carpintero cabecirrojo” designa la conjunción de las siguientes propiedades (1)..., (2)..., ..., (5)... (como en D1), más (6)..., (7)..., ..., (10)..., (como en D2), más las propiedades adicionales (11)..., (12)..., (13)..., (14)..., (15)... (todas las propiedades necesarias para especificar el significado de “pájaro carpintero cabecirrojo”).

Si se escriben todas las propiedades requeridas en los espacios indicados por puntos, es evidente que las reglas serían inmensas y pesadas. Algo parecido a esto sería necesario si se insistiese en una especificación completa de los significados de todos los términos descriptivos en nuestro lenguaje artificial. Por fortuna, no es necesario recurrir a descripciones tan tediosas. Los postulados-A pueden limitarse para especificar las *relaciones de significado* que se sostienen entre los términos descriptivos del lenguaje.

Por ejemplo, para los tres términos recién discutidos, sólo se requieren dos postulados-A.

(A1) Todos los pájaros son animales.

(A2) Todos los pájaros carpinteros cabecirrojos son pájaros.

Si se dan las tres reglas-D, los dos postulados-A pueden obviamente derivarse de ellas. Pero como las reglas-D son tan pesadas, no es necesario formularlas cuando el propósito es únicamente indicar la estructura analítica de un lenguaje. Sólo necesitan darse los postulados-A. Son mucho más simples, y proporcionan una base suficiente para llevar a cabo la distinción entre declaraciones analíticas y sintéticas en el lenguaje.

Asumamos que el lenguaje artificial está basado sobre el lenguaje natural del castellano, pero que queremos dar postulados-A para que sea posible, en todos los casos, determinar si una oración dada en el lenguaje es analítica. En algunos casos, los postulados-A pueden obtenerse simplemente consultando un diccionario de español común y corriente. Consideremos la oración “Si se arroja una botella por una ventana, la botella es defenestrada.” ¿Es analítica o sintética? El postulado-A, derivado de la definición del diccionario, dice “ $x$  es defenestrada si y sólo si  $x$  es arrojada por una ventana.” Es evidente, de inmediato, que la oración es A-verdadera. No es necesario arrojar una botella por una ventana para ver si se vuelve o no defenestrada. La verdad de la oración se sigue de las relaciones de significado de sus palabras descriptivas, según lo especificado por el postulado-A.

Un diccionario común y corriente puede ser lo suficientemente preciso como para guiarnos con respecto a algunas oraciones, pero nos será de poca ayuda con respecto a otras. Por ejemplo, consideremos las tradicionales afirmaciones ambiguas “Todos los hombres son animales racionales” y “Todos los hombres son bípedos sin alas”. La principal dificultad aquí es la gran ambigüedad de lo que se quiere decir con “hombres”. En nuestro lenguaje artificial no hay ninguna dificultad porque la lista de nuestros postulados-A resuelve la cuestión por decreto. Si queremos interpretar “hombres” en una forma tal que “racionalidad” y “animalidad” sean componentes de significado esenciales de la palabra, entonces “Todos los hombres son racionales” y “Todos los hombres son animales” figuran entre los postulados-A. Sobre la base de estos postulados-A, la declaración “Todos los hombres son animales racionales” es A-verdadera. Por otro lado, si los postulados-A para “hombres” se refieren únicamente a la

estructura corporal de los hombres, entonces la declaración “Todos los hombres son animales racionales” es sintética. Si los postulados-A análogos no están establecidos para los términos “sin alas” y “bípedos”, esto indica que en nuestro lenguaje la “sinalasidad” y la “bipedidad” no se consideran componentes de significado esenciales de “hombres”. La afirmación “Todos los hombres son bípedos sin alas” también se vuelve sintética. En nuestro lenguaje, a un hombre con una sola pierna se le seguiría llamando hombre, y a un hombre que le crecen alas en su cabeza también seguiría llamándosele hombre.

El punto a comprender aquí es que mientras más precisa sea la lista de postulados-A, más precisa será la distinción entre las oraciones analíticas y sintéticas en nuestro lenguaje. En la medida en que las reglas sean vagas, el lenguaje construido contendrá oraciones confusas con respecto a su analiticidad. Cualquier confusión que permanezca - y este punto es esencial - no se deberá a la ausencia de claridad en comprender la dicotomía entre lo analítico y lo sintético. Se deberá a la confusión en comprender los significados de las palabras descriptivas del lenguaje.

Siempre hay que tener en mente que los postulados-A, aunque pueda parecer que lo hacen, no nos dicen nada sobre el mundo real. Consideremos, por ejemplo, el término “más caliente”. Es posible que queramos establecer un postulado-A al efecto de que la relación designada por este término es asimétrica. “Para cualquier  $x$  y cualquier  $y$ , si  $x$  es más caliente que  $y$ , entonces  $y$  no es más caliente que  $x$ .” Si alguien dice haber descubierto dos objetos  $A$  y  $B$ , de una naturaleza tal que  $A$  es más caliente que  $B$ , y que  $B$  es más caliente que  $A$ , no diremos: “¡Qué sorprendente! ¡Qué descubrimiento tan maravilloso!” Más bien diremos: “Usted y yo debemos tener comprensiones distintas de la palabra ‘más caliente’. Para mí significa una relación asimétrica; por tanto, la situación que usted ha encontrado no puede describirse tal como usted lo ha hecho.” El postulado-A que especifica el carácter asimétrico de la relación “más caliente” se ocupa únicamente del significado de la palabra como es utilizada en nuestro lenguaje. No dice nada sobre la naturaleza del mundo.

En los últimos años, el punto de vista de que puede trazarse una clara distinción entre las declaraciones analíticas y sintéticas ha sido fuertemente atacado por Quine, Morton White, y otros.<sup>34</sup> Mis propios puntos de vista sobre esta cuestión están

---

<sup>34</sup> El ataque de Quine se encuentra en su artículo “Two Dogmas of Empiricism”, *Philosophical Review*, 60 (1951), 20-43; reimpresso en *From a Logical Point of View* (Cambridge: Harvard University Press, 1953); (Nueva York: Harper Torchbooks, 1963). Véase también su ensayo “Carnap and Logical Truth”,

plasmados en dos artículos reimpresos en el apéndice de la segunda edición (1956) de mi ya citado libro *Meaning and Necessity*. El primero de estos artículos, sobre “postulados significativos”, replica a Quine mostrando, de manera formal (como aquí lo he hecho de manera informal), cómo puede hacerse precisa la distinción para un lenguaje observacional a partir del simple recurso de añadir postulados-A a las reglas del lenguaje. Mi segundo artículo, “Significado y sinonimia en los lenguajes naturales”, indica cómo puede hacerse la distinción, no desde un lenguaje artificial, sino desde un lenguaje de uso común, como el castellano de todos los días. Aquí la distinción debe basarse sobre una investigación empírica de los hábitos del habla. Esto supone nuevos problemas, discutidos en el artículo pero que no serán considerados aquí.

Hasta ahora, la analiticidad ha sido discutida sólo en lo referente a los lenguajes observacionales: el lenguaje observacional de la vida cotidiana, de la ciencia, y el lenguaje observacional construido por un filósofo de la ciencia. Estoy convencido de que el problema para distinguir las afirmaciones analíticas de las sintéticas en tales lenguajes ha sido resuelto, por lo menos en principio. Más aún, creo, y estoy convencido de que casi todos los científicos estarían de acuerdo, que, en el lenguaje observacional de la ciencia, esta distinción resulta útil. Sin embargo, cuando queremos aplicar la dicotomía al lenguaje *teórico* de la ciencia, nos encontramos con dificultades extraordinarias. En el capítulo 28 consideraremos algunas de estas dificultades y una forma posible de superarlas.

---

en Paul Arthur Schilpp, ed., *The Philosophy of Rudolf Carnap* (La Salle, III: Open Court, 1963), pp. 385-406, y mi respuesta, pp. 915-922. Para las animadversiones de Morton White, véase su artículo “The Analytic and the Synthetic: An Untenable Dualism”, en Sidney Hook, ed., *John Dewey* (Nueva York: Dial, 1950), y la parte 2 del trabajo de White *Toward Reunion in Philosophy* (Cambridge: Harvard University Press, 1956); (Nueva York: Atheneum libro de bolsillo, 1963). Una lista de algunos artículos importantes que replican a Quine se encuentra en Paul Edwards and Arthur Pap, eds., *A Modern Introduction to Philosophy*, 3era ed., (Nueva York: Free Press, 1973), pp. 744-745.

## CAPÍTULO 28

### Analiticidad en un lenguaje teórico

Antes de explicar cómo es que creo que puede hacerse una clara distinción entre lo analítico y lo sintético con respecto al lenguaje teórico de la ciencia, es importante comprender las enormes dificultades involucradas en esto y cómo surgen del hecho de que a los términos-T (términos teóricos) no pueden dárseles interpretaciones completas. En el lenguaje observacional no surge este problema. Se asume que todas las relaciones de significado entre los términos descriptivos del lenguaje de observación han sido expresadas por ciertos postulados-A que resultan convenientes, como lo explicamos en el capítulo anterior. Pero con respecto a los términos-T la situación es completamente distinta. No hay ninguna interpretación empírica completa para términos como “electrón”, “masa”, y “campo electromagnético”. Es cierto que puede observarse y explicarse una trayectoria en una cámara de burbujas como producida por un electrón que pasa por tal cámara. Pero estas observaciones proporcionan únicamente interpretaciones empíricas parciales e indirectas de los términos-T a los que están vinculadas.

Consideremos, por ejemplo, el término teórico “temperatura” tal como es utilizado en la teoría cinética de las moléculas. Ahí hay postulados-C (reglas de correspondencia) que conectan este término con la construcción y uso de un termómetro, por ejemplo. Después de que un termómetro es puesto en un líquido, se observa una lectura de la escala. Los postulados-C unen este procedimiento con el término-T “temperatura” de una forma tal que las lecturas de la escala proporcionan una interpretación parcial del término. Es parcial porque esta interpretación particular de “temperatura” no puede utilizarse para todas las oraciones de la teoría en donde tenga lugar el término. Un termómetro ordinario funciona sólo dentro de un intervalo estrecho sobre la escala de la temperatura. Existen temperaturas más abajo que congelarían cualquier líquido de ensayo, y temperaturas más arriba que vaporizarían cualquier líquido de ensayo. Para estas temperaturas deben utilizarse métodos de medición completamente distintos. Cada método está unido, por medio de postulados-C, con el concepto teórico de “temperatura”, pero no puede decirse que esto agota el significado

empírico de “temperatura”. En algún futuro, nuevas observaciones podrían producir nuevos postulados-C que amplíen la interpretación empírica del concepto.

Hempel, en la sección 7 de su monografía “Métodos de formación conceptual en la ciencia” (*Encyclopedia of Unified Science*, 1953), ha trazado una imagen memorable de la estructura de una teoría.

Una teoría científica podría, por tanto, compararse con una red espacial compleja: sus términos están representados por los nudos, mientras que los hilos que conectan a estos últimos corresponden, en parte, a las definiciones y, en parte, a las hipótesis fundamentales y derivadas incluidas en la teoría. Todo el sistema flota, por así decirlo, sobre el plano de observación, y está anclado a él por ciertas reglas de interpretación. Éstas pueden verse como cuerdas que no forman parte de la red pero que conectan ciertas partes de ésta con lugares específicos en el plano de observación. Por virtud de tales conexiones interpretativas, la red puede funcionar como una teoría científica: A partir de ciertos datos de observación, podemos ascender, a través de una cuerda interpretativa, a algún punto en la red teórica, y de ahí proceder, a través de las definiciones e hipótesis, a otros puntos, desde los cuales otra cuerda interpretativa permite descender al plano de observación.<sup>35</sup>

El problema es encontrar una forma de distinguir, en el lenguaje que habla sobre esta red, las oraciones que son analíticas y aquellas que son sintéticas. Es fácil identificar oraciones L-verdaderas, esto es, oraciones que son verdaderas en virtud de su forma lógica. “Si todos los electrones tienen momentos magnéticos y la partícula  $x$  no tiene momento magnético, entonces la partícula  $x$  no es un electrón.” Esta oración es claramente L-verdadera. No es necesario saber nada sobre los significados de sus palabras descriptivas para ver que es verdadera. Pero, ¿cómo debe hacerse la distinción entre oraciones que son analíticas (verdaderas en virtud de los significados de sus términos, incluyendo los términos descriptivos) y oraciones que son sintéticas (cuya verdad no puede decidirse sin observar el mundo real)?

Para reconocer declaraciones analíticas en un lenguaje teórico, es necesario tener postulados-A que especifiquen las relaciones de significado que se mantienen entre los términos teóricos. Una declaración es analítica si es una consecuencia lógica de los

---

<sup>35</sup> La cita es de Carl G. Hempel, *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 2, no. 7: *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science* (Chicago: University of Chicago Press, 1952), pp. 23-38.

postulados-A. Debe ser verdadera en una forma tal que no requiera observación alguna del mundo real; debe estar desprovista de contenido fáctico. Debe ser verdadera únicamente en virtud de los significados de sus términos, así como la declaración observacional “Ningún soltero está casado” es verdadera en virtud de los significados de “soltero” y “casado”. Estos significados pueden precisarse por medio de reglas del lenguaje de observación. ¿Cómo pueden formularse postulados-A comparables para identificar declaraciones analíticas en un lenguaje teórico que contiene términos teóricos para los cuales no hay interpretaciones completas?

Quizá lo primero que viene a la mente es que los postulados-T, por sí solos, pueden servir como postulados-A. Es cierto que una teoría deductiva puede construirse al combinar postulados-T con la lógica y las matemáticas, pero el resultado es un sistema deductivo abstracto, en donde los términos teóricos no tienen siquiera una interpretación parcial. La geometría euclidiana es un ejemplo conocido. Es una estructura sin interpretación de matemáticas puras. Para que sea una teoría científica, uno debe interpretar sus términos descriptivos, por lo menos parcialmente. Esto significa que a sus términos deben dárseles significados empíricos, lo que se hace, desde luego, por medio de reglas de correspondencia que conecten sus términos primitivos con aspectos del mundo físico. De este modo, la geometría euclidiana es transformada en geometría física. Decimos que la luz se mueve en “líneas rectas”, que los retículos en un telescopio intersectan en un “punto”, y que los planetas se mueven en “elipses” alrededor del Sol. Hasta que ha sido interpretada la estructura matemática abstracta (por lo menos parcialmente) por medio de postulados-C, el problema semántico de distinguir lo analítico de lo sintético ni siquiera se presenta. Los postulados-T de una teoría no pueden utilizarse como postulados-A porque no proveen a los términos-T de un significado empírico.

¿Pueden utilizarse los postulados-C para proporcionar postulados-A? Es claro que los postulados-C no pueden tomarse por sí solos. Para obtener la interpretación más completa posible (aunque todavía sólo parcial) para los términos-T, es necesario tomar toda la teoría, con sus postulados-C y -T combinados. Supongamos, pues, que suponemos toda la teoría. ¿Nos proporcionarán los postulados-C y -T combinados los postulados-A que estamos buscando? No; ahora hemos supuesto *demasiado*. En efecto, hemos obtenido todo el significado empírico que podemos tener para nuestros términos teóricos, pero también hemos obtenido información fáctica. La conjunción de

los postulados-C y -T, por lo tanto, nos da declaraciones sintéticas y, como hemos visto, tales declaraciones no pueden proporcionar postulados-A.

Un ejemplo aclarará esto. Supongamos que decimos que los postulados-T y -C de la teoría de la relatividad general nos servirán como postulados-A para identificar oraciones analíticas en la teoría. Sobre la base de ciertos postulados-T y -C, con la ayuda de la lógica y las matemáticas, deducimos que la luz de las estrellas será desviada por el campo gravitacional del Sol. ¿No podemos decir que esta conclusión es analítica, verdadera sólo en virtud de los significados empíricos asignados a todos los términos descriptivos? No podemos, porque la teoría de la relatividad general proporciona predicciones condicionales sobre el mundo que pueden confirmarse o refutarse por pruebas empíricas.

Consideremos, por ejemplo, la declaración “Estas dos placas fotográficas fueron hechas con el mismo patrón de estrellas. La primera fue hecha durante un eclipse total del Sol, cuando el disco cubierto del Sol estaba dentro del patrón de la estrella. La segunda fue hecha cuando el Sol no estaba cerca de este patrón.” Esta será la declaración *A*. La declaración *B* es: “En la primera placa, las imágenes de las estrellas muy cercanas al borde del Sol eclipsado se desplazarán ligeramente de sus posiciones, como lo muestra la segunda placa, y serán desplazadas en una dirección lejos del Sol.” La afirmación condicional “Si *A*, entonces *B*” es una declaración que puede ser derivada de la teoría de la relatividad general. Pero también es una declaración que puede ser probada por observación. En efecto, como dijimos en el capítulo 16, Finlay Freundlich hizo una prueba de esta afirmación en 1919. Freundlich sabía que *A* era verdadera. Después de haber hecho cuidadosas mediciones sobre los puntos de luz en ambas placas, descubrió que *B* también era verdadera. Si hubiese encontrado que *B* era falsa, la declaración condicional “Si *A*, entonces *B*” habría sido falseada. Esto, a su vez, habría refutado la teoría de la relatividad, desde la cual se derivó “Si *A*, entonces *B*”. Hay, por lo tanto, un contenido fáctico en la afirmación de la teoría de que la luz de las estrellas se desvía por los campos gravitacionales.

Para establecer el mismo punto de manera más formal: una vez especificados los postulados-T y -C de la teoría de la relatividad, es posible, sobre la base de un conjunto de premisas dado *A*, en el lenguaje observacional, derivar otro conjunto de oraciones *B*, también en el lenguaje observacional, que no puede ser derivado sin *TC*, la totalidad de la teoría. La declaración “Si *A*, entonces *B*” es, por tanto, una consecuencia lógica de la conjunción de *T* y *C*. Si *T* y *C* son tomados como postulados-A, sería necesario

considerar la declaración “Si  $A$ , entonces  $B$ ” como analítica. Pero es claro que no es analítica. Es una declaración sintética en el lenguaje observacional. Sería falseada si la observación del mundo real mostrase que  $A$  es verdadera y  $B$  es falsa.

Quine y otros filósofos de la ciencia han argumentado que las dificultades aquí son tan grandes que la dicotomía analítico-sintético, en su significado ordinario, no puede aplicarse al lenguaje teórico de la ciencia. Más recientemente, Hempel ha expuesto esta perspectiva con gran claridad.<sup>36</sup> Hempel estaba dispuesto, aunque quizá con cierta vacilación, a aceptar la dicotomía con respecto al lenguaje observacional. Pero con respecto a su utilidad en el lenguaje teórico expresó un fuerte escepticismo quineano. El doble papel de los postulados-T y -C, sostuvo, hace que el concepto de verdad analítica, con respecto al lenguaje teórico, sea totalmente esquivo. Es difícil imaginar, pensó, que exista una manera de dividir estas dos funciones de los postulados-T y -C de tal forma que pueda decirse que esta parte de ellos contribuye al significado, y que por tanto las oraciones que se basan en esta parte son, si son verdaderas, verdaderas sólo por el significado, mientras que las demás oraciones son oraciones fácticas.

Una forma extrema de resolver, o por lo menos de evitar, toda esta problemática relacionada con los términos teóricos es la propuesta por Ramsey. Como mostramos en el capítulo 26, es posible establecer todo el contenido observacional de una teoría en una oración conocida como la oración de Ramsey,  ${}^R TC$ , en donde únicamente tienen lugar términos observacionales y lógicos. Los términos teóricos son, por así decirlo, “cuantificados fuera”. Como no hay términos teóricos, no hay lenguaje teórico. El problema de definir la analiticidad para un lenguaje teórico desaparece. Esto, sin embargo, constituye un paso muy radical. Como mostramos anteriormente, renunciar a los términos teóricos de la ciencia conduce a grandes complejidades e inconveniencias. Los términos teóricos simplifican enormemente la tarea de formular leyes, y, sólo por esa razón, no pueden ser eliminados del lenguaje científico.

Creo que hay una forma de resolver el problema haciendo uso de la oración de Ramsey, pero únicamente haciéndolo de una manera que no nos fuerce a adoptar el paso final, extremo, de Ramsey. Llevando a cabo ciertas distinciones, podemos obtener la

---

<sup>36</sup> Véanse los dos artículos de Hempel, “The Theoretician’s Dilemma”, en Herbert Feigl, Michael Scriven, y Grover Maxwell, eds., *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (Minneapolis, Minn: University of Minnesota Press, 1956), vol. II, e “Implications of Carnap’s Work for the Philosophy of Science”, en Paul Arthur Schilpp, ed., *The Philosophy of Rudolf Carnap* (La Salle, Ill.: Open Court, 1963).

deseada dicotomía entre las verdades analíticas y sintéticas en el lenguaje teórico, y, al mismo tiempo, conservar todos los términos y oraciones teóricas de una teoría.

Hasta ahora, hemos considerado una teoría como consistente en dos “oraciones”: la oración  $T$ , la conjunción de todos los postulados- $T$ , y la oración  $C$ , la conjunción de todos los postulados- $C$ . La teoría  $TC$  es la conjunción de estas dos oraciones.

Propondré otra forma por la cual la teoría  $TC$  puede dividirse en dos oraciones que, tomadas en conjunción, son equivalentes a la teoría. [La teoría] será dividida en una oración  $A_T$  y una oración  $F_T$ . La oración  $A_T$  servirá como el postulado- $A$  para todos los términos teóricos de la teoría. Desde luego, debe estar desprovista de todo contenido fáctico. La oración  $F_T$  será la oración que expresa todo el contenido observacional o fáctico de la teoría. Como vimos, la propia oración de Ramsey,  ${}^R TC$ , hace exactamente esto. Expresa, en un lenguaje observacional extendido para incluir todas las matemáticas, todo lo que dice la teoría sobre el mundo real. No proporciona interpretación alguna de los términos teóricos, porque tales términos no aparecen en la oración. Así, la oración de Ramsey,  ${}^R TC$ , es tomada como el postulado fáctico  $F_T$ .

Las dos oraciones  $F_T$  y  $A_T$ , tomadas en conjunto, deben implicar lógicamente toda la teoría  $TC$ . ¿Cómo puede formularse una oración  $A_T$  que satisfaga estas condiciones? Para cualesquiera dos oraciones  $S_1$  y  $S_2$ , la oración más débil que, junto con  $S_1$ , implique lógicamente  $S_2$ , es la afirmación condicional “Si  $S_1$ , entonces  $S_2$ .”. En forma simbólica, esto lo expresamos con el símbolo para la implicación material: “ $S_1 \supset S_2$ ”. De esta manera, la forma más simple de formular un postulado- $A$   $A_T$ , para una teoría  $TC$ , es:

$$(A_T) {}^R TC \supset TC$$

Fácilmente puede mostrarse que esta oración está vacía de contenido fáctico. No nos dice nada sobre el mundo. Todo el contenido fáctico está en la oración  $F_T$ , que es la oración de Ramsey  ${}^R TC$ . La oración  $A_T$  simplemente afirma que *si* la oración de Ramsey es verdadera, entonces debemos comprender los términos teóricos en una forma tal que toda la teoría sea verdadera. Es una oración puramente analítica, porque su verdad semántica está basada sobre los significados destinados a los términos teóricos. Esta afirmación, junto con la propia oración de Ramsey, implicará- $L$  toda la teoría.

Veamos cómo este curioso postulado- $A$   ${}^R TC \supset TC$  proporciona una forma de distinguir entre las declaraciones analíticas y sintéticas en el lenguaje teórico. La

oración de Ramsey  ${}^R TC$  es sintética. Su verdad puede establecerse únicamente a partir de una observación real del mundo. Pero cualquier declaración implicada-L por el postulado-A dado será analítica.

Aquí, como con las oraciones analíticas en el lenguaje observacional, hay un sentido amplio en el que el postulado-A *dice* algo sobre el mundo. Pero, en un sentido estricto, no lo hace. El postulado-A establece que *si* existen las entidades (referidas por los cuantificadores existenciales de la oración de Ramsey) del tipo que están unidas por todas las relaciones expresadas en los postulados teóricos de la teoría y están relacionadas con entidades observacionales a partir de todas las relaciones especificadas por los postulados de correspondencia de la teoría, entonces la teoría en sí es verdadera. El postulado-A *parece* decir algo sobre el mundo, pero en realidad no lo hace. No nos dice si la teoría es verdadera. No nos dice que así es la forma del mundo. Únicamente dice que *si* el mundo es de esta forma, entonces los términos teóricos deben ser entendidos como satisfaciendo la teoría.

En el capítulo 26 consideramos un ejemplo de una teoría con seis conceptos teóricos, a saber, dos clases y cuatro relaciones. También ofrecimos una formulación esquemática (con el contexto indicado por puntos) de la teoría  $TC$  y de su oración de Ramsey  ${}^R TC$ . Con este ejemplo en mente, podemos formular el postulado-A para esta teoría como sigue:

$$(A_T)(\exists C_1)(\exists C_2)(\exists R_1)(\exists R_2)(\exists R_3)(\exists R_4)[\dots C_1 \dots C_2 \dots R_1 \dots R_2 \dots R_3 \dots R_4 \dots; \dots R_1 \dots O_1 \dots O_2 \dots O_3 \dots R_2 \dots O_4 \dots O_m \dots] \supset [\dots Mol \dots Himol \dots Temp \dots P \dots Masa \dots Vel \dots Temp \dots O_1 \dots O_2 \dots O_3 \dots P \dots O_4 \dots O_m \dots].$$

Esto dice que, si el mundo es tal que hay por lo menos un séxtuplo de entidades (dos clases y cuatro relaciones) que están relacionadas entre sí y con las entidades observacionales  $O_1, O_2, \dots, O_m$  tal como están especificadas en la teoría, entonces las entidades teóricas Mol, Himol, Temp, P, Masa, y Vel forman un séxtuplo que satisface la teoría. Es importante comprender que esta no es una declaración fáctica afirmando que, bajo las condiciones establecidas, seis entidades específicas, de hecho, satisfacen la teoría. Los seis términos teóricos no nombran seis entidades específicas. Antes de establecido el postulado-A  $A_T$ , estos términos no tienen interpretación, ni siquiera una parcial. La única interpretación que reciben en esta forma de la teoría es la interpretación parcial que obtienen *mediante este postulado-A*. Así, el postulado dice en

efecto que, si hay uno o más séxtuplos de entidades que satisfacen la teoría, entonces los seis términos teóricos han de ser interpretados como denotando seis entidades que forman un séxtuplo de ese tipo. Si en realidad hay séxtuplos de ese tipo, entonces el postulado ofrece una interpretación parcial de los términos teóricos al limitar los séxtuplos admitidos para la denotación a los séxtuplos de ese tipo. Si, por otro lado, no hay séxtuplos de ese tipo - en otras palabras, si la oración de Ramsey resulta ser falsa -, entonces el postulado es verdadero independientemente de su interpretación (porque, si "A" es falsa, " $A \supset B$ " es verdadera). Por lo tanto, no ofrece siquiera una interpretación parcial de los términos teóricos.

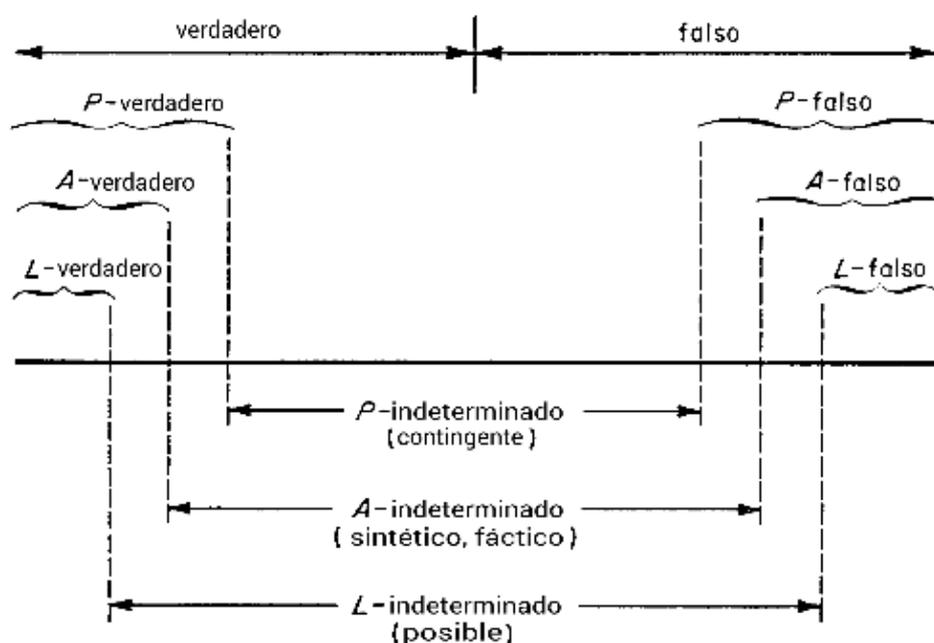
Una vez comprendido todo esto, ya no hay ninguna barrera que nos impida considerar la declaración condicional  ${}^R TC \supset TC$  como un postulado-A para  $TC$  en la misma forma en que los postulados-A son considerados en el lenguaje de observación. Como un postulado-A en el lenguaje de observación dice algo sobre el significado del término "más caliente", también el postulado-A para el lenguaje teórico ofrece alguna información sobre el significado de los términos teóricos, como "electrón" y "campo electromagnético". Esta información, a su vez, nos permite descubrir que ciertas oraciones teóricas son analíticas, a saber, aquellas que se siguen del postulado-A  $A_T$ .

Ahora es posible explicar, de manera precisa, qué queremos decir con verdad-A en el lenguaje total de la ciencia. Una oración es A-verdadera si está implicada-L por los postulados-A combinados, esto es, por los postulados-A del lenguaje de observación junto con el postulado-A de cualquier lenguaje teórico dado. Una oración es A-falsa si su negación es A-verdadera. Si no es ni A-verdadera ni A-falsa, es sintética.

Utilizo el término "verdad-P" (verdad basada sobre los postulados) para el tipo de verdad que poseen las oraciones si y sólo si están implicadas-L por los postulados, a saber, el postulado-F (la oración de Ramsey), junto con los postulados-A observacionales y teóricos. En otras palabras, la verdad-P está basada sobre los tres postulados  $F_T$ ,  $A_O$ , y  $A_T$ . Pero como  $F_T$  y  $A_T$  juntos son equivalentes a  $TC$ , la forma original de la teoría, puede estar igual de bien representar todos los postulados juntos como  $TC$  y  $A_O$ .

Sobre la base de los distintos tipos de verdad definidos y los correspondientes tipos de falsedad, obtenemos una clasificación general de las oraciones de un lenguaje científico. Podemos diagramarlo como se muestra en la figura 28-1. Esta clasificación corta la división anterior del lenguaje en oraciones lógicas, observacionales, teóricas, y

mixtas, que están basadas sobre los tipos de términos que tienen lugar en las oraciones. Como el lector podrá observar, el término tradicional “sintético” aparece como una alternativa para “A-indeterminado”; esto parece ser lo más natural, porque el término “A-verdadero” era utilizado para ese concepto definido como una explicación del término común “analítico” (o “analíticamente verdadero”). Por otra parte, el término “P-indeterminado” aplica a una clase más estrecha, a saber, a aquellas oraciones A-indeterminadas (o sintéticas) para las cuales la verdad o falsedad ni siquiera está determinada por los postulados de la teoría *TC*, como, por ejemplo, las leyes básicas de la física o algún otro campo de la ciencia. Aquí el término “contingente” se sugiere por sí mismo como una alternativa.



**Figura 28-1.**

No quiero ser muy dogmático con este programa de clasificación y, en particular, con la definición de verdad-A basada sobre el postulado-A propuesto. Más bien lo ofrezco como una solución tentativa al problema de definir la analiticidad para el lenguaje teórico. Antes, aunque no compartía el pesimismo de Quine y de Hempel, siempre admitía que este era un problema muy serio y que no podía ver una solución satisfactoria para él. Por un tiempo pensé que quizá tendríamos que resignarnos a considerar una oración que contuviese términos teóricos y términos no observacionales como analítica sólo bajo las condiciones más estrechas y triviales de que es L-

verdadera. Por ejemplo: “O bien una partícula es un electrón, o bien no es un electrón.” Finalmente, después de muchos años de búsqueda, encontré este nuevo enfoque, con el nuevo postulado-A.<sup>37</sup> Hasta ahora no se han encontrado dificultades en este enfoque. Ahora estoy seguro de que hay una solución y de que, si aparecen dificultades, será posible superarlas.

---

<sup>37</sup> Una presentación más formal de este enfoque se encuentra en mi artículo (1958) citado en el capítulo 26, nota 30, y en mi respuesta a Hempel en Paul Arthur Schilpp, ed., *The Philosophy of Rudolph Carnap* (La Salle, III, 1963), pp. 958-966.

# Parte VI

## MÁS ALLÁ DEL DETERMINISMO

### CAPÍTULO 29

#### Leyes estadísticas

En el pasado, los filósofos de la ciencia han estado muy ocupados con la siguiente cuestión: “¿Cuál es la naturaleza de la causalidad?” En capítulos anteriores he intentado aclarar por qué esta no es la mejor manera de plantear el problema. Todo tipo de causalidad que hay en el mundo está expresado por las leyes de la ciencia. Si queremos estudiar la causalidad, sólo podemos hacerlo examinando tales leyes, estudiando las formas en las que están expresadas y cómo se confirman o no por los experimentos.

Al examinar las leyes de la ciencia, se encontró conveniente distinguir las leyes empíricas, que tratan con observables, de las leyes teóricas, que tratan con no observables. Vimos que, aunque no hay una línea clara que separe los observables de los no observables, y por tanto, ninguna línea clara que separe las leyes empíricas de las teóricas, la distinción es útil. Otra distinción importante y útil, que corta tanto las leyes empíricas como las teóricas, es la distinción entre leyes deterministas y estadísticas. Esta distinción ya la consideramos antes, pero en este capítulo la trataremos con más detalle.

Una ley determinista es una que dice que, bajo ciertas condiciones, ciertas cosas serán el caso. Como ya mostramos, una ley de este tipo puede establecerse en términos cualitativos o cuantitativos. La afirmación de que, cuando se calienta una barra de hierro ésta aumenta de longitud, es una afirmación cualitativa. La afirmación de que, cuando la barra se calienta a una cierta temperatura su longitud aumentará en cierta cantidad, es una afirmación cuantitativa. Una ley determinista cuantitativa siempre establece que, si ciertas magnitudes tienen ciertos valores, otra magnitud (o una de aquellas magnitudes en otro tiempo) tendrá un cierto valor. En breve: la ley expresa una relación funcional entre los valores de dos o más magnitudes.

Pero una ley estadística sólo establece una distribución de probabilidad para los valores de una magnitud en casos particulares. Sólo ofrece el valor medio de una magnitud en una clase de muchos casos. Por ejemplo, una ley estadística establece que, si se arroja un dado cúbico sesenta veces, se espera que una determinada cara del dado salga aproximadamente diez veces. La ley no predice qué sucederá en ninguna de las veces que se arroja el dado, ni dice qué sucederá por seguro en las sesenta veces que se arroja el dado. En cambio, afirma que, si se arroja muchas veces, puede esperarse que cada cara del dado salga tantas veces como cualquier otra cara. Como hay seis caras igualmente probables, la probabilidad de que salga cualquiera de las caras es  $\frac{1}{6}$ . Aquí, la probabilidad es utilizada en un sentido estadístico, para significar frecuencia relativa en el largo plazo, y no en el sentido lógico o inductivo, que yo llamo grado de confirmación.

Las leyes estadísticas eran bastante comunes en el siglo XIX, pero ningún físico de entonces imaginó que tales leyes supusieran una ausencia de determinismo en las leyes básicas de la naturaleza. Se asumía que las leyes estadísticas eran hechas, o bien por razones de conveniencia, o bien porque no se disponía del conocimiento suficiente para describir una situación en forma determinista.

Las declaraciones emitidas por el gobierno después de un censo de población son ejemplos conocidos de declaraciones expresadas en forma estadística por razones de conveniencia, más bien que por razones de ignorancia. Durante un censo, el gobierno busca obtener de cada individuo un registro de su edad, sexo, raza, lugar de nacimiento, número de familiares, estado de salud, etc. Al contar cuidadosamente todos estos hechos, el gobierno puede emitir información estadística valiosa. (Antes el conteo y el cálculo se hacían a mano. Por lo general había un intervalo de diez años entre un censo y otro, y para cuando comenzaba el nuevo censo, todavía no se terminaba con los cálculos del anterior. Hoy los datos se ponen en tarjetas perforadoras y las computadoras hacen todo el trabajo.) Los datos revelan que un cierto porcentaje de individuos tiene más de sesenta años, que un cierto porcentaje es doctor, que un cierto porcentaje tiene tuberculosis, etc. Las declaraciones estadísticas de este tipo son necesarias para reducir un gigantesco número de hechos a una forma manejable. Esto no significa que los hechos individuales no estén disponibles; únicamente significa que sería extremadamente inconveniente expresarlos como hechos individuales. En lugar de hacer millones de declaraciones individuales, de la forma "...y también está la Sra.

Smith, de San Francisco, nacida en Seattle, Washington, de sesenta y cinco años, con cuatro hijos y diez nietos”, la información se comprime en pequeñas declaraciones estadísticas. Esto se hace por razones de conveniencia, incluso cuando todos los hechos subyacentes estén registrados.

Algunas veces sucede que los hechos individuales no están disponibles, pero sí es posible obtenerlos. Por ejemplo, en lugar de hacer un censo completo de cada individuo en una población grande, puede investigarse solamente una muestra representativa. Si la muestra indica que un cierto porcentaje de la población es dueño de sus propias casas, podría concluirse que aproximadamente el mismo porcentaje de toda la población es dueño de sus propias casas. Sería posible comprobar cada caso individual, pero, en lugar de perder el tiempo y el costo que supondría esa empresa, se comprueba la muestra. Si la muestra se elige con cuidado, de tal forma que haya buenas razones para considerarla como representativa, es posible obtener buenas estimaciones generales.

Incluso en las ciencias físicas y biológicas suele resultar conveniente hacer declaraciones estadísticas, aun cuando los hechos individuales sean conocidos o no sea difícil obtenerlos. Una persona dedicada al fitomejoramiento podría decir que aproximadamente mil plantas con flores rojas estuvieron sujetas a ciertas condiciones; en la siguiente generación de plantas, alrededor del 75% de las flores resultaron ser blancas y no rojas. El botánico podría saber el número exacto de las flores rojas y blancas, o, si no lo sabe, le sería posible obtener los números contando. Pero, si no hay necesidad de tal precisión, podría resultarle más conveniente expresar los resultados como un porcentaje aproximado.

A veces es extremadamente difícil, e incluso imposible, obtener información exacta sobre casos individuales, aunque es fácil ver cómo *podría* obtenerse. Por ejemplo, si pudiésemos medir todas las magnitudes relevantes involucradas en el arrojamiento de un dado - su posición exacta en el momento en el que abandona la mano, las velocidades exactas que le fueron impartidas, su peso y elasticidad, la naturaleza de la superficie sobre la que cae, y así sucesivamente -, sería posible predecir exactamente cómo caería el dado. Debido a que no contamos con máquinas que lleven a cabo tales mediciones, debemos contentarnos con una ley estadística que exprese una frecuencia de largo plazo.

En el siglo XIX, la teoría cinética de los gases condujo a la formulación de muchas leyes probabilísticas en el campo conocido como mecánica estadística. Si una

cierta cantidad de, digamos, oxígeno tiene una cierta presión y temperatura todo el tiempo, habrá una cierta distribución de la velocidad de sus moléculas. A esto se le llama ley de distribución de Maxwell-Boltzmann. Esta ley dice que, para cada uno de los tres componentes de la velocidad, la probabilidad de distribución es la llamada función normal (o gaussiana), representada por la conocida curva en forma de campana. Es una ley estadística sobre una situación en donde los hechos relativos a cada molécula individual eran técnicamente imposibles de obtener. Aquí la ignorancia - y este punto es importante - es más profunda que la ignorancia de los ejemplos anteriores. Incluso en el caso del dado es concebible que puedan construirse instrumentos para analizar todos los hechos relevantes. Los hechos podrían meterse en una computadora electrónica, y, antes de que el dado deje de rodar, la computadora informaría: "La cara que saldrá será el seis." Pero, con respecto a las moléculas de un gas, no hay técnica conocida por la cual puedan medirse la dirección y velocidad de cada molécula individual y después analizarse los billones de resultados para comprobar si se cumple la distribución de Maxwell-Boltzmann. Los físicos formularon esta ley como una microley, expresada en la teoría de los gases y confirmada al probar diversas consecuencias derivadas de la ley. Tales leyes estadísticas eran comunes, en el siglo XIX, en campos en los que era imposible obtener hechos individuales. Hoy en día, las leyes de este tipo se utilizan en cada campo de la ciencia, especialmente en las ciencias biológicas y sociales.

Los físicos del siglo XIX eran muy conscientes de que las leyes probabilísticas de los gases o las leyes relativas al comportamiento humano ocultaban una ignorancia más profunda que la ignorancia involucrada en el arrojamiento de un dado. Sin embargo, estaban convencidos de que, *en principio*, no era imposible obtener tal información. Sin duda no se contaba con los medios técnicos para medir moléculas individuales, pero eso era sólo una desafortunada limitación del poder de las herramientas disponibles. Por medio de un microscopio, los físicos podían ver partículas pequeñas, suspendidas en un líquido y bailando erráticamente a medida que eran empujadas de esta forma y de otra por colisiones con moléculas invisibles. Con mejores instrumentos podían observarse partículas cada vez más pequeñas. Quizá en el futuro podrían construirse instrumentos para medir las posiciones y las velocidades de moléculas individuales.

Desde luego existen serias limitaciones ópticas. Los físicos del siglo XIX también sabían que, cuando una partícula no es más grande que la longitud de onda de la luz visible, no es posible verla en ningún tipo de microscopio de luz concebible. Pero

esto no descarta la posibilidad de que otros tipos de instrumentos puedan medir partículas más pequeñas que la longitud de onda de la luz. En efecto, los microscopios electrónicos de hoy en día permiten que uno “vea” objetos que se encuentran por debajo del límite teórico de los microscopios ópticos. Los científicos del siglo diecinueve estaban convencidos de que, en principio, no hay límite a la precisión con la que pueden hacerse observaciones de objetos cada vez más pequeños.

También sabían que ninguna observación es *totalmente* precisa. Siempre hay un elemento de incertidumbre. *Todas* las leyes de la ciencia son, en este sentido, estadísticas; pero es un sentido trivial. El punto importante es que siempre puede aumentarse la precisión. Hoy, diría el físico del siglo diecinueve, es posible medir algo con una precisión de dos dígitos decimales. Mañana será posible alcanzar una precisión de tres dígitos decimales, y dentro de diez décadas quizá alcancemos una precisión de veinte o cien dígitos. No parecía haber límite alguno a las precisiones que podrían obtenerse con cualquier tipo de instrumentos. Los físicos del siglo diecinueve, así como muchos filósofos, dieron por sentado que, detrás de todas las macroleyes, con sus ineludibles errores de medición, hay microleyes que son exactas y deterministas. Claro está que las moléculas reales no pueden ser vistas. Pero sin duda, si dos moléculas colisionan, sus movimientos resultantes estarán completamente determinados por condiciones anteriores a la colisión. Si se pudiesen conocer todas estas condiciones, sería posible predecir exactamente cómo se comportan las moléculas que colisionan. ¿Cómo podría ser de otra forma? El comportamiento de las moléculas debe depender de *algo*. No puede ser arbitrario y azaroso. Las leyes básicas de la física deben ser deterministas.

Los físicos del siglo XIX también reconocían que las leyes básicas son idealizaciones raramente ejemplificadas en una forma pura, y esto debido a la influencia de factores externos. Esto lo expresaban distinguiendo entre leyes básicas y leyes “restringidas”, que derivan de las leyes básicas. Una ley restringida no es más que una ley formulada con una cláusula restrictiva; dice, por ejemplo, que esto o aquello sucederá sólo bajo ciertas “circunstancias normales”. Consideremos lo siguiente: “Una barra de hierro calentada desde la temperatura de congelación hasta la de agua hirviendo aumentará de longitud.” Esto no es cierto si la barra está sujeta a un tornillo fuerte que ejerza presión en los extremos. Si la presión es lo suficientemente fuerte, la expansión de la barra no tiene lugar. La ley está restringida, pues, en el sentido de que se entiende

que se mantiene sólo bajo circunstancias normales, esto es, cuando ninguna fuerza actúa sobre la barra como para perturbar el experimento.

Detrás de todas las leyes restringidas están las leyes fundamentales que hacen afirmaciones incondicionales: “Dos cuerpos se atraen entre sí con una fuerza gravitacional proporcional a cada una de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos.” Esta es una declaración incondicional. Podría haber, desde luego, otras fuerzas, como la atracción magnética, que cambiaran el movimiento de uno de los dos cuerpos, pero eso no cambiaría la cantidad o dirección de la fuerza gravitacional. No es necesario añadir ningún tipo de cláusulas restrictivas a la declaración de la ley. Otro ejemplo lo proporcionan las ecuaciones de Maxwell para el campo electromagnético. Fueron entendidas para sostenerse de manera incondicional, con una precisión absoluta. La gran imagen presentada por la física newtoniana fue la de un mundo en donde todos los eventos podían, en principio, ser explicados a partir de leyes básicas completamente libres de indeterminación. Como ya vimos en un capítulo anterior, Laplace ofreció una formulación clásica de esta perspectiva al decir que una mente imaginaria, que conociese todas las leyes y hechos fundamentales del mundo en un instante de su historia, sería capaz de calcular todos los eventos pasados y futuros del mundo.

Esta imagen utópica fue destrozada por el surgimiento de la física cuántica, como veremos en el siguiente y último capítulo.

## CAPÍTULO 30

### Indeterminismo en la física cuántica

El carácter esencialmente no determinista de la mecánica cuántica descansa sobre el principio de indeterminación, a veces llamado principio de incertidumbre, o relación de incertidumbre, establecido por Werner Heisenberg en 1927. Este principio dice, más o menos, que, para ciertos pares de magnitudes llamadas magnitudes “conjugadas”, es imposible, en principio, medir ambas en el mismo instante con alta precisión. Un ejemplo de un par así es:

- (1) La coordenada  $x$  ( $q_x$ ) de la posición de una partícula dada en un tiempo dado (con respecto a un sistema de coordenadas dado).
- (2) El componente  $x$  ( $p_x$ ) del momento de la misma partícula en el mismo tiempo. (Este componente es el producto de la masa de la partícula y el componente  $x$  de su velocidad.)

Lo mismo vale para el par  $q_y, p_y$ , y para el par  $q_z, p_z$ .

Supongamos que se hacen mediciones de las dos magnitudes conjugadas  $p$  y  $q$  y se descubre que  $p$  se encuentra dentro de un cierto intervalo de longitud  $\Delta p$  y  $q$  dentro de un cierto intervalo de longitud  $\Delta q$ . El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que, si intentamos medir  $p$  de forma precisa, esto es, haciendo  $\Delta p$  muy pequeño, no podemos, en el mismo instante, medir  $q$  de forma precisa, esto es, hacer  $\Delta q$  muy pequeño. Más específicamente, el producto de  $\Delta p$  y  $\Delta q$  no puede hacerse más pequeño que un cierto valor expresado en términos de  $h$ , la constante cuántica de Planck. Si las magnitudes conjugadas son componentes de momento y posición, el principio de incertidumbre dice que no es posible, en principio, medir ambas con un alto grado de precisión. Si sabemos exactamente dónde está una partícula, sus componentes de momento se vuelven brumosos. Y si sabemos exactamente cuál es su momento, no podemos precisar exactamente dónde está. Desde luego, en la práctica real la inexactitud de una medición de este tipo es, por lo general, mucho más grande que el mínimo ofrecido por el principio de incertidumbre. El punto importante, las implicaciones que son enormes, es que esta falta de exactitud es parte de las leyes básicas de la teoría cuántica. La limitación establecida por el principio de incertidumbre

no debe entenderse como debiéndose a las imperfecciones de los instrumentos de medición y, por tanto, como algo que pueda ser reducido a partir de mejoras en las técnicas de medición. Es una ley fundamental que debe retenerse siempre que se retengan las leyes de la teoría cuántica en su forma actual.

Esto no significa que las leyes aceptadas en la física no puedan ser cambiadas, o que el principio de incertidumbre de Heisenberg nunca será abandonado. Sin embargo, creo que es justo afirmar que eliminar este rasgo supondría un cambio revolucionario en la estructura básica de la física de hoy en día. Algunos físicos están convencidos (como lo estuvo Einstein) de que este rasgo de la mecánica cuántica moderna es cuestionable, y que algún día podrá ser descartado. Esa es una posibilidad. Pero el paso sería muy radical. Por el momento, nadie puede ver cómo es que el principio de incertidumbre pueda ser eliminado.

Otra diferencia relacionada e igualmente importante entre la teoría cuántica y la física clásica se encuentra en el concepto del estado instantáneo de un sistema físico. Consideremos, como ejemplo, un sistema físico consistente en un número de partículas. En la física clásica, el estado de este sistema en el tiempo  $t_1$  está completamente descrito al dar, para cada partícula, los valores de las siguientes magnitudes (a veces llamadas “variables del estado”, y que yo llamo “magnitudes del estado”):

- (a) Las tres coordenadas de posición en  $t_1$ .
- (b) Los tres componentes de momento en  $t_1$ .

Asumamos que este sistema permanece aislado durante el tiempo que transcurre de  $t_1$  a  $t_2$ ; es decir, durante este intervalo de tiempo no se ve afectado por ninguna perturbación exterior. Entonces, sobre la base del estado dado del sistema en  $t_1$ , las leyes de la mecánica clásica determinan inequívocamente su estado (los valores de todas las magnitudes del estado) en  $t_2$ .

La situación en la mecánica cuántica es completamente distinta. (Aquí obviaremos la diferencia en la naturaleza de aquellas partículas que son consideradas, como máximo, en el sentido de ser indivisibles. En la física moderna este carácter ya no está adscrito a los átomos, sino a partículas más pequeñas como los electrones y los protones. Aunque esta diferencia supone un gran paso hacia adelante en el desarrollo reciente de la física, no es esencial para nuestra discusión sobre los métodos formales para especificar el estado de un sistema.) En la mecánica cuántica, un conjunto de magnitudes de estado para un sistema dado en un tiempo dado es llamado conjunto

“completo” si, primero, es posible, en principio, medir todas las magnitudes del conjunto de manera simultánea, y si, segundo, para cualquier otra magnitud de estado que puede ser medida simultáneamente con todas las otras [magnitudes] en el conjunto, su valor está determinado por los valores de éstas. Así, en nuestro ejemplo de una clase de partículas, un conjunto completo podría consistir en las siguientes magnitudes: para algunas de las partículas, las coordenadas  $q_x$ ,  $q_y$ , y  $q_z$ ; para algunas otras partículas, los componentes de momento  $p_x$ ,  $p_y$ , y  $p_z$ ; para otras,  $p_x$ ,  $p_y$ ,  $p_z$ , o  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$ , y para unas cuantas más, otros apropiados conjuntos de tres magnitudes expresados en términos de  $qs$  y  $ps$ . De acuerdo con los principios de la mecánica cuántica, el estado de un sistema en un tiempo dado está completamente descrito al especificar los valores de cualquier conjunto completo de magnitudes de estado. Evidentemente, una descripción así sería considerada como incompleta desde el punto de vista clásico, porque, si el conjunto contiene  $q_x$ , entonces  $p_x$  no está ni dada ni determinada por otros valores en el conjunto. Pero esta restricción de la descripción de un estado está en consonancia con el principio de incertidumbre: si  $q_x$  es conocida,  $p_x$  es, en principio, desconocida. Fácilmente se ve que hay un número gigantesco - en realidad un número infinito - de distintas elecciones posibles de un conjunto completo de magnitudes de estado para un sistema dado. Podemos elegir libremente hacer mediciones de las magnitudes de *cualquiera* de los conjuntos completos, y después de haber medido los valores exactos de las magnitudes del conjunto elegido, entonces la descripción del estado que especifica tales valores es el que clamaremos conocer.

En la mecánica cuántica, cualquier estado de un sistema puede ser representado por una función de un tipo especial llamada “función de onda”. Una función de este tipo asigna valores numéricos a los puntos de un espacio. (Este espacio no es, sin embargo, nuestro conocido espacio tridimensional, sino un espacio abstracto de dimensiones superiores.) Si los valores de un conjunto completo de magnitudes de estado para el tiempo  $t_1$  están dados, la función de onda del sistema para  $t_1$  está inequívocamente determinada. Estas funciones de onda, aunque cada una está basada sobre un conjunto de magnitudes que parecerían incompletas desde el punto de vista de la física clásica, desempeñan, en la mecánica cuántica, un papel análogo al de las descripciones de estado en la mecánica clásica. Bajo una condición de aislamiento como la de antes, es posible determinar la función de onda para  $t_2$  sobre la base de la función de onda dada

para  $t_1$ . Esto se hace con la ayuda de una célebre ecuación conocida como la “ecuación diferencial de Schrödinger”, establecida por Erwin Schrödinger, el gran físico austriaco. Esta ecuación tiene la forma matemática de una ley determinista; produce la función de onda completa para  $t_2$ . Por lo tanto, si aceptamos las funciones de onda como representaciones completas de estados instantáneos, nos veríamos conducidos a decir que, por lo menos desde el nivel teórico, el determinismo se conserva en la física cuántica.

Una afirmación así, aun siendo hecha por algunos físicos, me parece engañosa, porque podría inducir al lector a pasar por alto el siguiente hecho. Cuando preguntamos qué nos dice la función de onda calculada para el punto de tiempo futuro  $t_2$  sobre los valores de las magnitudes de estado en  $t_2$ , la respuesta es: si en  $t_2$  planeamos hacer la medición de una magnitud de estado particular - por ejemplo, la coordenada  $y$  de la posición de la partícula número 5 -, la función de onda no predice el valor que encontrará nuestra medición; únicamente proporciona una distribución de probabilidad para los posibles valores de esta magnitud. Por lo general, la función de onda asignará probabilidades positivas a varios valores posibles (o a varios subintervalos de valores posibles). Solamente en algunos casos especiales uno de los valores alcanza, teóricamente, una probabilidad de 1 (certeza), permitiéndonos decir que el valor ha sido predicho definitivamente. Observemos que la función de onda calculada para  $t_2$  proporciona una distribución de probabilidad para los valores de *cada* magnitud de estado del sistema físico considerado. En nuestro ejemplo anterior, esto significa que proporciona distribuciones de probabilidad para todas las magnitudes mencionadas bajo (a) y (b). La teoría cuántica es fundamentalmente indeterminista en que no proporciona predicciones definitivas para los resultados de ciertas mediciones. Proporciona únicamente predicciones probabilísticas.

Debido a que la función de onda calculada para el tiempo  $t_2$  ofrece distribuciones de probabilidad para las magnitudes de estado primarias con respecto a partículas individuales, es igualmente posible derivar distribuciones de probabilidad para otras magnitudes definidas en términos de las primarias. Entre estas otras magnitudes están las magnitudes estadísticas con respecto al conjunto de todas las partículas del sistema físico, o a un subconjunto de estas partículas. Muchas de estas magnitudes estadísticas corresponden a propiedades macroobservables; por ejemplo, a la temperatura de un cuerpo pequeño pero visible, o a la posición o velocidad del centro

de gravedad de un cuerpo. Si el cuerpo está compuesto de billones de partículas - por ejemplo, un satélite artificial rodeando la Tierra -, su posición, velocidad, temperatura, y otras magnitudes mensurables pueden calcularse con gran precisión. En casos así, la curva de densidad de la probabilidad para una magnitud estadística tiene la forma de una colina muy estrecha, empinada. Podemos especificar, por lo tanto, un pequeño intervalo que incluya prácticamente toda la colina; como consecuencia de esto, la probabilidad del evento de que el valor de la magnitud se encuentre en este intervalo es extremadamente cercana a 1. Es tan cercana que, para todos los efectos prácticos, podemos descartar el carácter probabilístico de la predicción y tomarla como si fuese certera. Pero desde el punto de vista de la teoría cuántica, el satélite es un sistema compuesto de billones de partículas, y para cada partícula individual hay una borrosidad ineludible en las predicciones. La incertidumbre expresada por las leyes cuánticas también vale para el satélite, pero está reducida casi a cero por las leyes estadísticas cubriendo al gran número de partículas.

Por otro lado, hay situaciones de una naturaleza muy distinta en donde la ocurrencia de un evento es directamente observable en el sentido más fuerte, pero que, no obstante, depende del comportamiento de un número de partículas extremadamente pequeño, y a veces incluso de una sola partícula. En casos así, la considerable incertidumbre con respecto al comportamiento de la partícula vale igualmente para el macroevento. Esto ocurre con frecuencia en aquellas situaciones en que un microevento radioactivo “dispara” un macroevento; por ejemplo, cuando un electrón emitido en desintegración beta produce un clic claramente audible en un contador Geiger. Incluso si hacemos la suposición idealizada de que conocemos los valores de un conjunto completo de magnitudes de estado primarias para las partículas subatómicas en un pequeño conjunto de átomos radioactivos constituyendo el cuerpo  $B$  en el tiempo  $t_1$ , únicamente podemos derivar probabilidades para la ocurrencia de eventos como: ninguna partícula emitida, una partícula emitida, dos partículas emitidas, etc., dentro del primer segundo que sigue a  $t_1$ . Si el proceso es tal que la probabilidad de que no haya ninguna emisión en el intervalo de un segundo es cercana a 1, no podemos predecir, ni siquiera con una aproximación tosca, el tiempo en el que la primera emisión tendrá lugar y cause el clic en el contador Geiger. Sólo podemos determinar probabilidades y valores relacionados; por ejemplo, el valor esperado del tiempo del primer clic.

En vista de esta situación, yo diría que el determinismo del siglo diecinueve está descartado en la física moderna. Creo que la mayoría de los físicos de hoy preferirían esta forma de expresar la alteración radical que ha hecho la mecánica cuántica en el cuadro newtoniano clásico.

No me opongo a la perspectiva de algunos filósofos, como Ernest Nagel, y de algunos físicos, como Henry Margenau, cuando dicen que aún hay determinismo en las leyes sobre los estados de los sistemas y que sólo ha cambiado la definición de “estado de sistema”. Lo que dicen es cierto. Pero, en mi opinión, la palabra “sólo” puede ser engañosa. Da la impresión de que el cambio es solamente una respuesta distinta a la pregunta: ¿Cuáles son las magnitudes que caracterizan el estado de un sistema? En realidad, el cambio es mucho más fundamental. Los físicos clásicos estaban convencidos de que, con el progreso de la investigación, las leyes serían cada vez más exactas, y que no hay límite a la precisión que puede obtenerse al predecir eventos observables. En contraste con esto, la teoría cuántica establece un límite insuperable. Por esta razón pienso que hay menos riesgo de malentendidos si decimos que la estructura de causalidad - la estructura de las leyes - en la física moderna es fundamentalmente distinta de la que fue desde los tiempos de Newton hasta finales del siglo XIX. El determinismo, en el sentido clásico, ha sido abandonado.

Es fácil comprender por qué esta imagen radicalmente novedosa de las leyes físicas supuso, al principio, una dificultad psicológica para los físicos.<sup>38</sup> El propio Planck, conservador por naturaleza, estaba afligido cuando descubrió por primera vez que la emisión y absorción de la radiación no era un proceso continuo, sino más bien uno que procedía en unidades indivisibles. Esta discrecionalidad estaba tan en contra de todo el espíritu de la física tradicional que para muchos físicos fue extremadamente difícil, incluyendo a Planck, ajustarse a la nueva forma de pensar.

La naturaleza revolucionaria del principio de incertidumbre de Heisenberg ha llevado a algunos filósofos y físicos a sugerir ciertos cambios en el lenguaje de la física. Los físicos rara vez hablan del lenguaje que utilizan. Este tema suele interesar a unos pocos físicos que también están interesados en los fundamentos lógicos de la física, o a

---

<sup>38</sup> Sobre este punto recomiendo un pequeño libro escrito por Werner Heisenberg llamado *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science* (Nueva York: Harper, 1958). Contiene una descripción clara del desarrollo histórico de la teoría cuántica: los primeros pasos vacilantes de Planck, después las contribuciones de Einstein, Heisenberg, y otros. F. S. C. Northrop señala correctamente, en su introducción, que Heisenberg es demasiado modesto al discutir su propio papel en esta historia.

lógicos que han estudiado física. Estas personas se preguntan: “¿Debe modificarse el lenguaje de la física para acomodar las relaciones de incertidumbre? Si sí, ¿cómo?”

Las propuestas más extremas para una modificación de este tipo suponen un cambio en la forma de la lógica utilizada en la física. Philipp Frank y Moritz Schlick (Schlick fue después un filósofo en Viena y Frank un físico en Praga) expresaron juntos por primera vez la opinión de que, bajo ciertas condiciones, la conjunción de dos declaraciones significativas en la física debe considerarse como carente de sentido; por ejemplo, dos predicciones relativas a los valores de magnitudes conjugadas para el mismo sistema en el mismo tiempo. Predique la declaración *A* las coordenadas de posición exactas de una partícula para un cierto punto de tiempo. La declaración *B* ofrece los tres componentes de momento de la misma partícula para el mismo punto de tiempo. Sabemos, a partir del principio de incertidumbre de Heisenberg, que sólo tenemos dos opciones:

1. Podemos hacer un experimento por el cual conozcamos (desde luego, siempre que contemos con instrumentos lo suficientemente buenos) la posición de una partícula con alta, aunque no perfecta, precisión. En este caso, nuestra determinación del momento de la partícula será altamente imprecisa.

2. En lugar de eso, podemos hacer otro experimento por el cual midamos los componentes de momento de la partícula con gran precisión. En este caso, debemos contentarnos con una determinación altamente imprecisa de la posición de la partícula.

En breve, podemos probar, o bien para *A*, o bien para *B*. No podemos probar para la conjunción “*A* y *B*”. Martin Strauss, un alumno de Frank, escribió su tesis doctoral sobre estos problemas y otros relacionados. Más tarde trabajó con Niels Bohr en Copenhague. Strauss sostuvo que la conjunción de *A* y *B* debe tomarse como insignificativa porque no es verificable. Si queremos, podemos verificar *A* con cualquier precisión deseada. Podemos hacer lo mismo con *B*. No podemos hacerlo para “*A* y *B*”. La conjunción no debe, por tanto, ser considerada como una declaración significativa. Por esta razón, sostuvo Strauss, deben modificarse las reglas de formación (las reglas que especifican las formas de oraciones admitidas) del lenguaje de la física. Desde mi punto de vista, un cambio tan radical no es aconsejable.

Otra sugerencia similar fue formulada por los matemáticos Garrett Birkhoff y John von Neumann.<sup>39</sup> Ellos sugirieron un cambio, no en las reglas de formación, sino en

---

<sup>39</sup> Véase Garrett Birkhoff y John von Neumann, “The Logic of Quantum Mechanics”, *Annals of Mathematics*, 37 (1936), 823-843.

las reglas de transformación (reglas por las cuales una oración puede derivarse de una oración o de un conjunto de oraciones). Propusieron que los físicos abandonasen una de las leyes de distribución en la lógica proposicional.

Una tercera propuesta fue hecha por Hans Reichenbach, quien sugirió que la tradicional lógica de dos valores fuese remplazada por una lógica de tres valores.<sup>40</sup> En una lógica así, cada declaración tendría uno de tres valores posibles: *V* (verdadero), *F* (falso), e *I* (indeterminado). La clásica ley del tercero excluido (una declaración debe ser verdadera o falsa; no hay una tercera posibilidad) es remplazada por la ley del cuarto excluido. Cada declaración debe ser verdadera, falsa, o indeterminada; no hay una cuarta alternativa. Por ejemplo, la declaración *B*, sobre el momento de una partícula, puede resultar verdadera si se hace un experimento apropiado. En ese caso, la otra declaración *A*, sobre la posición de la partícula, es indeterminada. Es indeterminada porque es imposible determinar, en principio, su verdad o falsedad en el mismo instante en que se confirma la declaración *B*. Desde luego, podría haberse confirmado *A* en lugar de *B*. Entonces *B* sería indeterminada. En otras palabras, hay situaciones en la física moderna en las que, si ciertas declaraciones son verdaderas, otras declaraciones deben ser indeterminadas.

Para poder acomodar sus tres valores de verdad, Reichenbach encontró necesario redefinir las conectivas lógicas tradicionales (implicación, disyunción, conjunción, etc.) con tablas de verdad mucho más complicadas que las utilizadas para definir las conectivas de la acostumbrada lógica de dos valores. Además, introdujo nuevas conectivas. De nuevo, mi sensación es que, si fuese necesario complicar la lógica de esta forma para el lenguaje de la física, todo esto sería aceptable. Actualmente, sin embargo, no veo la necesidad de pasos tan radicales.

Claro está que debemos esperar para ver cómo van las cosas en el desarrollo futuro de la física. Desafortunadamente, los físicos rara vez presentan sus teorías en una forma que guste a los lógicos. No suelen decir: “Este es mi lenguaje, estos son mis términos primitivos, aquí están mis reglas de formación, allá están los axiomas lógicos.” (Si por lo menos ofreciesen sus axiomas lógicos, podríamos ver si concuerdan con los de von Neumann o con los de Reichenbach, o si prefieren retener la clásica lógica de dos valores.) También sería deseable tener los postulados de todo el campo de la física

---

<sup>40</sup> Véase Hans Reichenbach, *Philosophic Foundations of Quantum Mechanics* (Berkeley: University of California Press, 1944).

establecidos en una forma sistemática que incluya la lógica formal. Si esto se hiciese, sería más fácil determinar si hay buenas razones para cambiar la lógica subyacente.

Aquí tocamos problemas profundos, aún no resueltos, relativos al lenguaje de la física. Este lenguaje todavía es, excepto por su parte matemática, largamente un lenguaje natural; esto es, sus reglas son aprendidas implícitamente por la práctica, y rara vez son formuladas explícitamente. Desde luego se han adoptado miles de nuevos términos y frases propias al lenguaje de la física y, en algunos casos, se han ideado reglas especiales para manipular algunos de estos términos y símbolos técnicos. Al igual que los lenguajes de otras ciencias, el lenguaje de la física ha aumentado de manera constante en exactitud y eficiencia general. Esta tendencia seguramente continuará. Pero en este momento el desarrollo de la mecánica cuántica aún no se ha reflejado plenamente en una agudización del lenguaje de la física.

Es difícil predecir cómo cambiará el lenguaje de la física, pero estoy convencido de que dos tendencias, que han conducido a grandes mejoras en el lenguaje de las matemáticas durante el último medio siglo, serán igualmente efectivas en agudizar y clarificar el lenguaje de la física: la aplicación de la lógica moderna y de la teoría de conjuntos, y la adopción del método axiomático en su forma moderna, que presupone un sistema lingüístico formalizado. En la física de hoy en día, en donde no solamente está bajo discusión el contenido de sus teorías, sino también toda su estructura conceptual, ambos métodos podrían ser de enorme ayuda.

Enfrente tenemos un desafío emocionante, que requiere de una cooperación cercana entre los físicos y los lógicos (mejor aún, del trabajo de jóvenes que se han abocado al estudio de la física y de la lógica). La aplicación de la lógica moderna y del método axiomático a la física hará mucho más, creo yo, que sólo mejorar la comunicación entre los físicos y entre éstos y otros científicos. Conseguirá algo de mucha mayor importancia: hará que sea más fácil crear nuevos conceptos, formular supuestos frescos. Se ha recogido una enorme cantidad de nuevos resultados experimentales en los años recientes, muchos de ellos debidos a la gran mejora de los instrumentos experimentales, como los grandes aceleradores de partículas. Sobre la base de estos resultados, se ha progresado mucho en el desarrollo de la mecánica cuántica. Desafortunadamente, los esfuerzos para reconstruir la teoría en una forma tal que todos los nuevos datos encajen en ella no han sido exitosos. Han aparecido algunos enigmas sorprendentes y algunos dilemas desconcertantes. Su solución es una tarea urgente,

aunque muy difícil. Parece justo decir que el uso de nuevas herramientas conceptuales podría suponer una ayuda esencial.

Algunos físicos creen que hay una buena oportunidad para una nueva ruptura en un futuro no muy lejano. Ya sea que sea pronto o más tarde, debemos confiar - siempre que los estadistas del mundo se abstengan de la locura final que supone la guerra nuclear y permitan que la humanidad sobreviva - en que la ciencia continuará haciendo grandes progresos y en que nos conducirá a conocimientos cada vez más profundos sobre la estructura del mundo.

# Bibliografía

## LIBROS GENERALES

Richard B. Braithwaite. *Scientific Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press, 1953.

Percy W. Bridgman. *The Logic of Modern Physics*. Nueva York: Macmillan, 1927.

Norman R. Campbell. *Physics: The Elements*. Cambridge: Cambridge University Press, 1920; reimpresso como *Foundations of Science*, Nueva York: Dover, 1957.

Norman R. Campbell. *What is Science?* Londres: Methuen, 1921; reimpresso en Nueva York: Dover, 1953.

Philipp Frank. *Philosophy of Science*. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1957.

Werner Heisenberg. *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. Nueva York: Harper, 1958.

Carl G. Hempel. *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. Nueva York: Free Press, 1965.

Carl G. Hempel. *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. 2, n. 7: *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*. Chicago: University of Chicago Press, 1952.

Gerald Holton y Duane Roller. *Foundations of Modern Physical Science*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1958.

John Kemeny. *A Philosopher Looks at Science*. Princeton, N. J.: D. Van Nostrand, 1959.

Ernest Nagel. *The Structure of Science*. Nueva York: Harcourt, Brace & World, 1961.

Karl Popper. *The Logic of Scientific Discovery*. Nueva York: Basic Books, 1959.

Bertrand Russell. *Human Knowledge: Its Scope and Limits*. Nueva York: Simon & Schuster, 1948.

Israel Scheffler. *The Anatomy of Inquiry*. Nueva York: Knopf, 1963.

Stephen Toulmin. *The Philosophy of Science*. Londres: Hutchinson, 1953.

## COLECCIONES DE ARTÍCULOS

Arthur Danto y Sidney Morgenbesser, eds. *Philosophy of Science*. Nueva York: Meridian, 1960.

Herbert Feigl y May Brodbeck, eds. *Readings in the Philosophy of Science*. Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1953.

Herbert Feigl y Wilfrid Sellars, eds. *Readings in Philosophical Analysis*. Nueva York: Appleton-Century-Crofts, 1949.

Herbert Feigl, Michael Scriven, y Grover Maxwell, eds. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*. Mineápolis, Minn: University of Minnesota Press, vol. I, 1956; vol. II, 1958; vol. III, 1962.

Edward H. Madden, ed. *The Structure of Scientific Thought*. Boston, Mass.: Houghton Mifflin, 1960.

Paul Arthur Schilpp, ed. *The Philosophy of Rudolf Carnap*. La Salle, Ill.: Open Court, 1963.

Paul Arthur Schilpp, ed. *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Evanston, Ill: Library of Living Philosophers, 1949.

Philip Wiener, ed. *Readings in Philosophy of Science*. Nueva York: Scribner, 1953.

## MEDICIÓN

Norman R. Campbell. *Physics: The Elements*, op. cit., parte II: Measurement.

Carl G. Hempel. *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, op. cit., capítulo 3.

Victor F. Lenzen. *International Encyclopedia of Unified Science*, vol. I, n. 5: *Procedures of Empirical Science*. Chicago, Ill: University of Chicago Press, 1938.

## ESPACIO Y TIEMPO

Albert Einstein. *Sidelights on Relativity*. Londres: Methuen, 1922; reimpresso en Nueva York: Dover, 1983.

Philipp Frank. *Philosophy of Science*, op. cit., capítulos 3 y 6.

Adolf Grünbaum. *Philosophical Problems of Space and Time*. Nueva York: Knopf, 1963.

Max Jammer. *Concepts of Space*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1954, 1969; edición ampliada, Nueva York: Dover, 1993.

Ernest Nagel. *The Structure of Science*, op. cit., capítulos 8 y 9.

Henri Poincaré. *Science and Hypothesis*. Londres: Walter Scott, 1905; reimpresso en Nueva York: Dover, 1952.

Hans Reichenbach. *The Philosophy of Space and Time*. Nueva York: Dover, 1958.

## EL SIGNIFICADO DE CAUSALIDAD

Bertrand Russell. *Mysticism and Logic*, capítulo 9. Londres: Longmans, Green, 1918.

Bertrand Russell. *Our Knowledge of the External World*, capítulo 8. Londres: Allen & Unwin, 1914.

Moritz Schlick. "Causality in Everyday Life and in Recent Science". Reimpreso en Feigl y Sellars, *Readings in Philosophical Analysis*, op. cit., pp. 515-533.

#### DETERMINISMO Y LIBRE ALBEDRÍO

Bertrand Russell. *Our Knowledge of the External World*, op. cit., capítulo 8.

Moritz Schlick. *Problems of Ethics*, capítulo 7. Nueva York: Prentice-Hall, 1939.

Charles Stevenson. *Ethics and Language*. New Haven: Yale University Press, 1944.

Capítulo 11.