HEMPEL, Carl G. (1987), ***Filosofía de la Ciencia Natural***, Alianza Ed., Madrid, Cap. 2, 3 y 4.

2. LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA: INVENCIÓN Y CONTRASTACIÓN.

1. Un caso histórico a título de ejemplo

Como simple ilustración de algunos aspectos importantes de la investigación científica, parémonos a considerar los trabajos de Semmelweis en relación con la fiebre puerperal. Ignaz Semmelweis, un médico de origen húngaro, realizó esos trabajos entre *1844 y 1848* en el Hospital General de Viena. Como miembro del equipo médico de la Primera División de Maternidad del hospital, Semmelweis se sentía angustiado al ver que una gran proporción de las mujeres que habían dado a luz en esa división contraía una seria y con frecuencia fatal enfermedad conocida como fiebre puerperal o fiebre de post-parto. En *1844,* hasta *260,* de un total de *3.157* madres de la División Primera -un *8,2* %- murieron de esa enfermedad; en *1845,* el índice de muertes era del *6,8 %,* y en *1846,* del *11,4.* Estas cifras eran sumamente alarmantes, porque en la adyacente Segunda División de Maternidad del mismo hospital, en la que se hallaban instaladas casi tantas mujeres como en la Primera, el porcentaje de muertes por fiebre puerperal era mucho más bajo: *2,3, 2,0 y 2,7* en los mismos años. En un libro que escribió más tarde sobre las causas y la prevención de la fiebre puerperal, Semmelweis relata sus esfuerzos por resolver este terrible rompecabezas.

Semmelweis empezó por examinar varias explicaciones del fenómeno corrientes en la época; rechazó algunas que se mostraban incompatibles con hechos bien establecidos; a otras las sometió a contrastación.

Una opinión ampliamente aceptada atribuía las olas de fiebre puerperal a «influencias epidérmicas», que se describían vagamente como «cambios atmosférico-cósmico-telúricos», que se extendían por distritos-enteros y producían la fiebre puerperal en mujeres que se hallaban de postparto. Pero, ¿cómo -argüía Semmelweis podían esas influencias haber infestado durante años la División Primera y haber respetado la Segunda? Y ¿cómo podía hacerse compatible esta concepción con el hecho de que mientras la fiebre asolaba el hospital, apenas se producía caso alguno en la ciudad de Viena o sus alrededores? Una epidemia de verdad, como el cólera, no sería tan selectiva. Finalmente, Semmelweis señala que algunas de las mujeres internadas en la División Primera que vivían lejos del hospital se habían visto sorprendidas por los dolores de parto cuando iban de camino, y habían dado a luz en la calle; sin embargo, a pesar de estas condiciones adversas, el porcentaje de muertes por fiebre puerperal entre estos casos de «parto callejero» era más bajo que el de la División Primera.

Según otra opinión, una causa de mortandad en la División Primera. era el hacinamiento. Pero Semmelweis señala que de hecho el hacinamiento era mayor en la División Segunda, en parte como consecuencia de los esfuerzos desesperados de las pacientes para evitar que las ingresaran en la tristemente célebre División Primera Semmelweis descartó asimismo dos conjeturas similares haciendo notar que no había diferencias entre las dos divisiones en lo que se refería a la dieta y al cuidado general de las pacientes.

En *1846,* una comisión designada para investigar el asunto atribuyó la frecuencia de la enfermedad en la División Primera a las lesiones producidas por los reconocimientos poco cuidadosos a que sometían a las pacientes los estudiantes de medicina, todos los cuales realizaban sus prácticas de obstetricia en esta División. Semmelweis señala, para refutar esta opinión, que (a) las lesiones producidas naturalmente en el proceso del parto son mucho mayores que las que pudiera producir un examen poco cuidadoso; (b) las comadronas que recibían enseñanzas en la División Segunda reconocían a sus pacientes de modo muy análogo, sin por ello producir los mismos efectos; (c) cuando, respondiendo al informe de la comisión, se redujo a la mitad el número de estudiantes y se restringió al mínimo el reconocimiento de las mujeres por parte de ellos, la mortalidad, después de un breve descenso, alcanzó sus cotas más altas.

Se acudió a varias explicaciones psicológicas. Una de ellas hacía notar que la División Primera estaba organizada de tal modo que un sacerdote que portaba los últimos auxilios a una moribunda tenía que pasar por cinco salas antes de llegar a la enfermería: se sostenía que la aparición del sacerdote, precedido por un acólito que hacía sonar una campanilla, producía un efecto terrorífico y debilitante en las pacientes de las salas y las hacía así más propicias a contraer la fiebre puerperal. En la División Segunda no se daba este factor adverso, porque el sacerdote tenía acceso directo a la enfermería. Semmelweis decidió someter a prueba esta suposición. Convenció al sacerdote de que debía dar un rodeo y suprimir el toque de campanilla para conseguir que llegara a la habitación de la enferma en silencio y sin ser observado. Pero la mortalidad no decreció en la División Primera.

A Semmelweis se le ocurrió una nueva idea: las mujeres, en la División Primera, yacían de espaldas; en la Segunda, de lado. Aunque esta circunstancia le parecía irrelevante, decidió, aferrándose a un clavo ardiendo, probar a ver sí la diferencia de posición resultaba significativa. Hizo, pues, que las mujeres internadas en la División Primera se acostaran de lado, pero, una vez más, la mortalidad continuó.

Finalmente, en *1847,* la casualidad dio a Semmelweis la clave para la solución del problema. Un colega suyo, Kolletschka, recibió una herida penetrante en un dedo, producida por el escalpelo de un estudiante con el que estaba realizando una autopsia, y murió después de una agonía durante la cual mostró los mismos síntomas que Semmelweis había observado en las víctimas de la fiebre puerperal. Aunque por esa época no se había descubierto todavía el papel de los microorganismos en ese tipo de infecciones, Semmelweis comprendió que la «materia cadavérica» que el escalpelo del estudiante había introducido en la corriente sanguínea de Kolletschka había sido la causa de la fatal enfermedad de su colega, y las semejanzas entre el curso de la dolencia de Kolletschka y el de las mujeres de su clínica llevó a Semmelweis a la conclusión de que sus pacientes habían muerto por un envenenamiento de la sangre del mismo tipo: él, sus colegas y los estudiantes de medicina habían sido los portadores de la materia infecciosa, porque él y su equipo solían llegar a las salas inmediatamente después de realizar disecciones en la sala de autopsias, y reconocían a las parturientas después de haberse lavado las manos sólo de un modo superficial, de modo que éstas conservaban a menudo un característico olor a suciedad.

Una vez más, Semmelweis puso a prueba esta posibilidad. Argumentaba_él que si la suposición fuera correcta, entonces se podría prevenir la fiebre puerperal destruyendo químicamente el material infeccioso adherido a las manos. Dictó, por tanto, una orden por la que se exigía a todos los estudiantes de medicina que se lavaran las manos con una solución de cal clorurada antes de reconocer a ninguna enferma. La mortalidad puerperal comenzó a decrecer, y en el año *1848* descendió hasta el *1,27* % en la División Primera, frente al 1,33 de la Segunda.

En apoyo de su idea, o, como también diremos, de *su hipótesis,* Semmelweis hace notar además que con ella se explica el hecho de que la mortalidad en la División Segunda fuera mucho más baja: en ésta las pacientes estaban atendidas por comadronas, en cuya preparación no estaban incluidas las prácticas de anatomía mediante la disección de cadáveres.

La hipótesis explicaba también el hecho de que la mortalidad fuera menor entre los casos de «parto callejero»: a las mujeres que Regaban con el niño en brazos casi nunca se las sometía a reconocimiento después de su ingreso, y de este modo tenían mayores posibilidades de escapar a la infección.

Asímismo, la hipótesis daba cuenta del hecho de que todos los recién nacidos que habían contraído la fiebre puerperal fueran hijos de madres que habían contraído la enfermedad durante el parto; porque en ese caso la infección se le podía transmitir al niño antes de su nacimiento, a través de la corriente sanguínea común de madre e hijo, lo cual, en cambio, resultaba imposible cuando la madre estaba sana.

Posteriores experiencias clínicas llevaron pronto a Semmelweis a ampliar su hipótesis. En una ocasión, por ejemplo, él y sus colaboradores, después de haberse desinfectado cuidadosamente las manos, examinaron primero a una parturienta aquejada de cáncer cervical ulcerado; procedieron luego a examinar a otras doce mujeres de la misma sala, después de un lavado rutinario, sin desinfectarse de nuevo. Once de las doce pacientes murieron de fiebre puerperal. Semmelweis llegó a la conclusión de que la fiebre puerperal podía ser producida no sólo por materia cadavérica, sino también por «materia pútrida procedente de organismos vivos».

2. Etapas fundamentales en la contrastación de una hipótesis

Hemos visto cómo, en su intento de encontrar la causa de la fiebre puerperal, Semmelweis sometió a examen varias hipótesis que le habían sido sugeridas como respuestas posibles. Cómo se llega en un principio a esas hipótesis es una cuestión compleja que estudiaremos más adelante. Antes de eso, sin embargo, veamos cómo, una vez propuesta, se contrasta una hipótesis.

Hay ocasiones en que el procedimiento es simplemente directo. Pensemos en las suposiciones según las cuales las diferencias en el número de enfermos, o en la dieta, o en los cuidados generales, explicaban las diferencias en la mortalidad entre las dos divisiones. Como señala Semmelweis, esas hipótesis están en conflicto con hechos fácilmente observables. No existen esas diferencias entre las dos divisiones; las hipótesis, por tanto, han de ser rechazadas como falsas.

Pero lo normal es que la contrastación sea menos simple y directa. Tomemos la hipótesis que atribuye el alto índice de mortalidad en la División Primera al terror producido por la aparición del sacerdote con su acólito. La intensidad de ese terror, y especialmente sus efectos sobre la fiebre puerperal, no son tan directamente identificables como las diferencias en el número de enfermos 0 en la dieta, y Semmelweis utiliza un método indirecto de contratación. Se pregunta a sí mismo: ¿Qué efectos observables -si los hay- se producirían en el caso de que la hipótesis fuera verdadera? Y argumenta: si la hipótesis fuese verdadera, *entonces* un cambio apropiado en los procedimientos del sacerdote iría seguido de un descenso en la mortalidad. Comprueba mediante un experimento muy simple si se da esta implicación; se encuentra con que es falsa, y, en consecuencia, rechaza la hipótesis.

De modo similar, para contrastar la conjetura relativa a la posición de las mujeres durante el parto, razona del siguiente modo: si la conjetura fuese verdadera, *entonces* la adopción, en la División Primera, de la posición lateral reduciría la mortalidad. Una vez más, la experimentación muestra que la implicación es falsa, y se descarta la conjetura.

En los dos últimos casos, la contrastación está basada en un razonamiento que consiste en decir que si la hipótesis considerada, llamémosle *H,* es verdadera, *entonces* se producirán, en circunstancias especificadas (por ejemplo, si el sacerdote deja de atravesar las salas, o si las mujeres adoptan la posición de lado), ciertos sucesos observables (por ejemplo, un descenso en la mortalidad); en pocas palabras, si *H* es verdadera, entonces también lo es I, donde I es un enunciado que describe los hechos observables que se esperase produzcan. Convengamos en decir que I se infiere de, o está implicado por, *H;* y llamemos a I una *implicación contrastadora de la hipótes*is H. (Más adelante daremos una descripción más cuidadosa de la relación entre I y H.)

En nuestros dos últimos ejemplos, los experimentos mostraban que la implicación contrastadora era falsa, y, de acuerdo con ello, se rechazaba la hipótesis. El razonamiento que llevaba a ese rechazo podría esquematizarse del siguiente modo:

> Si H es verdadera, entonces también lo es I.
> Pero (como se muestra empíricamente) I no es verdadera.
> ___
> *H* no es verdadera.

Toda inferencia de esta forma, llamada en lógica *modus tollens* , es deductivamente válida; es decir, que si sus premisas (los enunciados escritos encima de la línea horizontal) son verdaderas, entonces su conclusión (el enunciado que figura debajo de la línea) es indefectiblemente verdadera también. Por tanto, si las premisas de *(2a)* están adecuadamente establecidas, la hipótesis H que estamos sometiendo a contrastación debe ser rechazada.

Consideremos ahora el caso en que la observación o la experimentación confirman la implicación contrastadora, I. De su hipótesis de que la fiebre puerperal es un envenenamiento de la sangre producido por materia cadavérica, Semmelweis infiere que la adopción de medidas antisépticas apropiadas reducirá el número de muertes por esa enfermedad. Esta vez los experimentos muestran que la implicación contrastadora es verdadera. Pero este resultado favorable no prueba de un modo concluyente que la hipótesis sea verdadera, porque el razonamiento en que nos hemos basado tendría la forma siguiente:

> Si H es verdadera, entonces también lo es I.
> (Como se muestra empíricamente) I es verdadera.
> ___
> H es verdadera.

Y este modo de razonar, conocido con el nombre de *falacia de afirmación de consecuente,* no es deductivamente válido, es decir, que su conclusión puede ser falsa, aunque sus premisas sean verdaderas. De hecho, la propia experiencia de Semmelweis puede servir para ilustrar este punto. La versión inicial de su explicación de la fiebre puerperal como una forma de envenenamiento de la sangre presentaba la infección con materia cadavérica esencialmente como la única causa de la enfermedad; y Semmelweis estaba en lo cierto al argumentar que si esta hipótesis fuera verdadera, entonces la destrucción de las partículas cadavéricas mediante el lavado antiséptico reduciría la mortalidad. Además, su experimento mostró que la implicación contrastadora era verdadera. Por tanto, en este caso las premisas de (2b) eran ambas verdaderas. Sin embargo, su hipótesis era falsa, porque, como él mismo descubrió más tarde, la materia en proceso de putrefacción procedente de organismos vivos podía producir también la fiebre puerperal.

Así, pues, el resultado favorable de una contrastación, es decir, el hecho de que una implicación contrastadora inferida de una hipótesis resulte ser verdadera, no prueba que la hipótesis lo sea también. Incluso en el caso de que hayan sido confirmadas mediante contrastación cuidadosa diversas implicadores de una hipótesis, incluso en ese caso, puede la hipótesis ser falsa. El siguiente razonamiento incurre también en la falacia de afirmación de consecuente:

> *Si H* es verdadera, entonces lo son también I1, I2, ..., In....
> (Como se muestra empíricamente), I1, I2, ... In..., son todas verdaderas.
> ___
> *H* es verdadera.

También esto se puede ilustrar por referencia a la hipótesis final de Semmelweis en su primera versión. Como antes señalamos, la hipótesis de Semmelweis entraña también las implicaciones contrastadoras de que entre los casos de parto callejero ingresados en la División Primera el porcentaje de muertes por fiebre puerperal sería menor que el de la División, y que los hijos de madres que habían escapado a la enfermedad no contraerían la fiebre; estas implicaciones fueron también corroboradas por la experiencia -y ello a pesar de que la primera versión de la hipótesis final era falsa.

Pero la advertencia de que un resultado favorable en todas cuantas contrataciones hagamos no proporciona una prueba concluyente de una hipótesis no debe inducirnos a pensar que después de haber sometido una hipótesis a una serie de contrataciones, siempre con resultado favorable, no estamos en una situación más satisfactoria que si no la hubiéramos contrastado en absoluto. Porque cada una de esas contrataciones podía muy bien haber dado un resultado desfavorable y podía habernos llevado al rechazo de la hipótesis. Una serie de resultados favorables obtenidos contrastando distintas implicaciones contrastadoras, I1, I2, ..., In...de una hipótesis, muestra que, en lo concerniente a esas implicaciones concretas, la hipótesis ha sido confirmada; y si bien este resultado no supone una prueba completa de la hipótesis, al menos le confiere algún apoyo, una cierta corroboración o confirmación parcial de ella. El grado de esta confirmación dependerá de diversos aspectos de la hipótesis y de los datos de la contrastación. Todo esto lo estudiaremos en el Capítulo *4*.

Tomemos ahora otro ejemplo, que atraerá también nuestra atención sobre otros aspectos de la investigación científica.

En la época de Galileo, y probablemente mucho antes, se sabía que una bomba aspirante que extrae agua de un pozo por medio de un pistón que se puede hacer subir por el tubo de la bomba, no puede elevar el agua arriba de 34 pies por encima de la superficie del pozo. Galileo se sentía intrigado por esta limitación y sugirió una explicación, que resultó, sin embargo, equivocada. Después de la muerte de Galileo, su discípulo Torricelli propuso una nueva respuesta. Argüía que la tierra está rodeada por un mar de aire, que por razón de su peso, ejerce presión sobre la superficie, y que esta presión ejercida sobre la superficie del pozo obliga al agua a ascender por el tubo de la bomba cuando hacemos subir el pistón. La altura máxima de 34 pies de la columna de agua expresa simplemente la presión total de la atmósfera sobre la superficie del pozo.

Evidentemente, es imposible determinar, por inspección u observación directa, si esta explicación es correcta, y Torricelli la sometió a contrastación por procedimientos indirectos. Su argumentación fue la siguiente: si la conjetura es verdadera, *entonces* la presión de la atmósfera sería capaz también de sostener una columna de mercurio proporcionalmente más corta; además, puesto que la gravedad específica del mercurio es aproximadamente 14 veces la del agua, la longitud de la columna de mercurio mediría aproximadamente *34/14* pies, es decir, algo menos de dos pies y medio. Comprobó esta implicación contrastadora por medio de un artefacto ingeniosamente simple, que era, en efecto, el barómetro de mercurio. El pozo de agua se sustituye por un recipiente abierto que contiene mercurio; el tubo de la bomba aspirante se sustituye por un tubo de cristal cerrado por un extremo. El tubo está completamente lleno de mercurio y queda cerrado apretando el pulgar contra el extremo abierto. Se invierte después el tubo, el extremo abierto se sumerge en el mercurio, y se retira el pulgar; la columna de mercurio desciende entonces por el tubo hasta alcanzar una altura de *30* pulgadas: justo como lo había previsto la hipótesis de Torricelli.

Posteriormente, Pascal halló una nueva implicación contrastadora de esta hipótesis. Argumentaba Pascal que si el mercurio del barómetro de Torricelli está contrapesado por la presión del aire sobre el recipiente abierto de mercurio, entonces la longitud de la columna disminuiría con la altitud, puesto que el peso del aire se hace menor. A requerimiento de Pascal, esta implicación fue comprobada por su cuñado, Périer, que midió la longitud de la columna de mercurio al pie del Puy-de-Dóme, montaña de unos *4.800* pies, y luego transportó cuidadosamente el aparato hasta la cima y repitió la medición allí, dejando abajo un barómetro de control supervisado por un ayudante. Périer halló que en la cima de la montaña la columna de mercurio era más de tres pulgadas menor que al pie de aquélla, mientras que la longitud de la columna en el barómetro de control no había sufrido cambios a lo largo del día.

3. El papel de la inducción en la investigación científica

Hemos examinado algunas investigaciones científicas en las cuales, ante un problema dado, se proponían respuestas en forma de hipótesis que luego se contrastaban derivando de ellas las apropiadas implicaciones contrastadoras, y comprobando éstas mediante la observación y la experimentación.

Pero, ¿cómo se llega en un principio a las hipótesis adecuadas? Se ha mantenido a veces que esas hipótesis se infieren de datos recogidos con anterioridad por medio de un procedimiento llamado *inferencia inductiva,* en contraposición a la inferencia deductiva, de la que difiere en importantes aspectos.

En una argumentación deductivamente válida, la conclusión está relacionada de tal modo con las premisas que si las premisas son verdaderas entonces la conclusión no puede dejar de serlo. Esta exigencia la satisface, por ejemplo, una argumentación de la siguiente forma general:

Si p, entonces *q*.
No es el caso que *q*.
____
No es el caso que p.

No es necesaria una larga reflexión para ver que, independientemente de cuáles sean los enunciados concretos con que sustituyamos las letras *p y q,* la conclusión será, con seguridad, verdadera si las premisas lo son. De hecho, nuestro esquema representa la forma de inferencia llamada modus *tollens, a* la que ya nos hemos referido.

El ejemplo siguiente es una muestra de otro tipo de inferencia deductivamente válido:

Toda sal de sodio, expuesta a la llama de un mechero Bunsen, hace tomar a la llama un color amarillo.
Este trozo de mineral es una sal de sodio.
____

Éste trozo de mineral, cuando se le aplique la llama de un mechero Bunsen, hará tomar a la llama un color amarillo.

De las argumentaciones de este último tipo se dice a menudo que van de lo general (en este caso, las premisas que se refieren a todas las sales de sodio) a lo particular (una conclusión referente a este trozo concreto de sal de sodio). Se dice a veces que, por el contrario, las inferencias inductivas parten de premisas que se refieren a casos particulares y llevan a una conclusión cuyo carácter es el de una ley o principio general. Por ejemplo, partiendo de premisas según las cuales cada una de las muestras concretas de varias sales de sodio que han sido aplicadas hasta ahora a la llama de un mechero Bunsen ha hecho tomar a la llama un color amarillo, la inferencia inductiva -se supone- lleva a la conclusión general de que todas las sales de sodio, cuando se les aplica la llama de un mechero Bunsen, tiñen de amarillo la llama. Pero es obvio que en este caso la verdad de las premisas *no* garantiza la verdad de la conclusión; porque incluso si es el caso que todas las muestras de sales de sodio hasta ahora examinadas vuelven amarilla la llama de Bunsen, incluso en ese caso, queda la posibilidad de que se encuentren nuevos tipos de sal de sodio que no se ajusten a esta generalización. Además, pudiera también ocurrir perfectamente que algunos de los tipos de sal de sodio que han sido examinados con resultado positivo dejen de satisfacer la generalización cuando se encuentren en condiciones físicas especiales (campos magnéticos muy intensos, o algo parecido), bajo las cuales no han sido todavía sometidas a prueba. Por esta razón, con frecuencia se dice que las premisas de una inferencia inductiva implican la conclusión sólo con un grado más o menos alto de probabilidad, mientras que las premisas de una inferencia deductiva implican la conclusión con certeza.

La idea de que, en la investigación científica, la inferencia inductiva que parte de datos recogidos con anterioridad conduce a principios generales apropiados aparece claramente en la siguiente descripción idealizada del proceder de un científico:

Si intentamos imaginar cómo utilizaría el método científico... una mente de poder y alcance sobrehumanos, pero normal en lo que se refiere a los procesos lógicos de su pensamiento, el proceso sería el siguiente: En primer lugar, se observarían y registrarían todos los hechos, sin *seleccionarlos* ni hacer conjeturas a *priori* acerca de su relevancia. En segundo lugar, se analizarían, compararían y clasificarían esos hechos observados y registrados, sin más hipótesis ni postulados que los que necesariamente supone la lógica del pensamiento. En tercer lugar, a partir de este análisis de los hechos se harían generalizaciones inductivas referentes a las relaciones, clasificatorias o causales, entre ellos. En cuarto lugar, las investigaciones subsiguientes serían deductivas tanto como inductivas, haciéndose inferencias a partir de generalizaciones previamente establecidas.

Este texto distingue cuatro estadios en una investigación científica ideal: (1).observación y registro de todos los hechos; (2) análisis y clasificación de éstos; (3) derivación inductiva de generalizaciones a partir de ellos, y (4) contrastación ulterior de las generalizaciones. Se hace constar explícitamente que en los dos primeros estadios no hay hipótesis ni conjeturas acerca de cuáles puedan ser las conexiones entre los hechos observados; esta restricción parece obedecer a la idea de que esas ideas preconcebidas resultarían tendenciosas y comprometerían la objetividad científica de la investigación.

Pero la concepción formulada en el texto que acabamos de citar -y a la que denominaré *la concepción inductivista estrecha de la investigación científica*- es insostenible por varias razones. Un breve repaso de éstas puede servirnos para ampliar y suplementar nuestras observaciones anteriores sobre el modo de proceder científico.

En primer lugar, una investigación científica, tal como ahí nos la presentan, es impracticable. Ni siquiera podemos dar el primer paso, porque para poder reunir *todos los* hechos tendríamos que esperar, por decirlo así, hasta el fin del mundo; y tampoco podemos reunir todos los hechos dados *hasta ahora,* puesto que éstos son infinitos tanto en número como en variedad. ¿Hemos de examinar, por ejemplo, todos los granos de arena de todos los desiertos y de todas las playas, y hemos de tomar nota de su forma, de su peso, de su composición química, de las distancias entre uno y otro, de su temperatura constantemente cambiante y de su igualmente cambiante distancia al centro de la Luna? ¿Hemos de registrar los pensamientos fluctuantes que recorren nuestra mente en los momentos de cansancio? ¿Las formas de las nubes que pasan sobre nosotros, el color cambiante del cielo? ¿La forma y la marca de nuestros utensilios de escritura? ¿Nuestras biografías y las de nuestros colaboradores? Después de todo, todas estas cosas, y otras muchas, están entre «los hechos que se han dado hasta ahora».

Pero cabe la posibilidad de que lo que se nos exija en esa primera fase de la investigación científica sea reunir todos los hechos *relevantes.* Pero ¿relevantes con respecto a qué? Aunque el autor no hace mención de este punto, supongamos que la investigación se refiere a un *problema* específico. ¿Es que no empezaríamos, en ese caso, haciendo acopio de todos los hechos...o, mejor, de todos los datos disponibles que sean relevantes para ese problema? Esta noción no está todavía clara. Semmelweis intentaba resolver un problema específico, y, sin embargo, en diferentes etapas de su indagación, reunió datos completamente heterogéneos. Y con razón; porque el tipo concreto de datos que haya que reunir no está determinado por el problema que se está estudiando, sino por el intento de respuesta que el investigador trata de darle en forma de conjetura o hipótesis. Sí suponemos que las muertes por fiebre puerperal se incrementan a causa de la aparición terrorífica del sacerdote y su acólito con la campanilla de la muerte, habría que reunir, como datos relevantes, los que se produjeran como consecuencia del cambio de recorrido del presbítero; hubiera sido, en cambio, completamente irrelevante comprobar lo que sucedería si los médicos y los estudiantes se hubieran desinfectado las manos antes de reconocer a sus pacientes. Con respecto a la hipótesis de Semmelweis de la contaminación eventual, sin embargo, los datos del último tipo hubieran sido -es claro- relevantes, e irrelevantes por completo los del primero.

Los «hechos» 6 hallazgos empíricos, por tanto, sólo se pueden cualificar como lógicamente relevantes o irrelevantes por referencia a una hipótesis dada, y no por referencia a un problema dado.

Supongamos ahora que se ha propuesto una hipótesis H como intento de respuesta a un problema planteado en una investigación: ¿qué tipo de datos serían relevantes con respecto a H? Los ejemplos que hemos puesto al principio sugieren una respuesta: Un dato que hayamos encontrado es relevante con respecto a H si el que se dé o no se dé se puede inferir de H. Tomemos, por ejemplo, la hipótesis de Torricelli. Como vimos, Pascal infirió de ella que la columna de mercurio de un barómetro sería más corta sí transportásemos el barómetro a una montaña. Por tanto, cualquier dato en el sentido de que este hecho se había producido en un caso concreto es relevante para las hipótesis; pero también lo sería el dato de que la longitud de la columna de mercurio había permanecido constante o que había decrecido y luego había aumentado durante la ascensión, porque esos datos habrían refutado la implicación contrastadora de Pascal, y, por ende, la hipótesis de Torricelli. Los datos del primer tipo podrían ser denominados datos positiva o favorablemente relevantes a la hipótesis; los del segundo tipo serían datos negativa o desfavorablemente relevantes.

En resumen: la máxima según la cual la obtención de datos debería realizarse sin la existencia de hipótesis antecedentes que sirvieran para orientarnos acerca de las conexiones entre los hechos que se están estudiando es una máxima que se autorrefuta, y a la que la investigación científica no se atiene. Al contrario: las hipótesis, en cuanto intentos de respuesta, son necesarias para servir de guía a la investigación científica. Esas hipótesis determinan, entre otras cosas, cuál es el tipo de datos que se han de reunir en un momento dado de una investigación científica.

Es interesante señalar que los científicos sociales que intentan someter a prueba una hipótesis que hace referencia al vasto conjunto de datos recogidos por la *U. S. Bureauol the Census* (Oficina Estadounidense del Censo) o por cualquier otra organización, de recogida de datos, se encuentran a veces con la contrariedad de que los valores de alguna variable que juega un papel central en la hipótesis no han sido registrados sistemáticamente. Esta observación no debe, desde luego, interpretarse como una crítica de la recogida de datos: los que se encuentran implicados en el proceso intentan sin duda seleccionar aquellos hechos que puedan resultar relevantes con respecto a futuras hipótesis; al hacerla, lo único que queremos es ilustrar la imposibilidad de reunir «todos los datos relevantes» sin conocimiento de las hipótesis con respecto a las cuales tienen relevancia esos datos.

Igual crítica podría hacérsele al segundo estadio que Wolfe distingue en. el pasaje citado. Un conjunto de «hechos» empíricos se puede analizar y clasificar de muy diversos modos, la mayoría de los cuales no serían de ninguna utilidad para una determinada investigación. Semmelweis podría haber clasificado a las mujeres ingresadas en la maternidad siguiendo criterios tales como la edad, lugar de residencia, estado civil, costumbres dietéticas, etc.; pero la información relativa a estos puntos no hubiera proporcionado la clave para determinar las probabilidades de que una paciente contrajera la fiebre puerperal. Lo que Semmelweis buscaba eran criterios que fueran significativos en este sentido; y a estos efectos, como él mismo acabó por demostrar, era esclarecedor fijarse en aquellas mujeres que se hallaban atendidas por personal médico cuyas manos estaban contaminadas; porque la mortalidad por fiebre puerperal tenía que ver con esta circunstancia, o con este tipo de pacientes.

Así, pues, para que un modo determinado de analizar y clasificar los hechos pueda conducir a una explicación de los fenómenos en cuestión debe estar basado en hipótesis acerca de cómo están conectados esos fenómenos; sin esas hipótesis, el análisis y la clasificación son ciegos.

Nuestras reflexiones críticas sobre los dos primeros estadios de la investigación -tal como se nos presentan en el texto citado- descartan la idea de que las hipótesis aparecen sólo en el tercer estadio, por medio de una inferencia inductiva que parte de datos recogidos con anterioridad. Hemos de añadir, sin embargo, algunas otras observaciones a este respecto.

La inducción se concibe a veces como un método que, por medio de reglas aplicables mecánicamente, nos conduce desde los hechos observados a los correspondientes principios generales. En este caso, las reglas de la inferencia inductiva proporcionarían cánones efectivos del descubrimiento científico; la inducción sería un procedimiento mecánico análogo al familiar procedimiento para la multiplicación de enteros, que lleva, en un número finito de pasos predeterminados y realizables mecánicamente, al producto correspondiente. De hecho, sin embargo, en este momento no disponemos de ese procedimiento general y mecánico de inducción; en caso contrario, difícilmente estaría hoy sin resolver el muy estudiado problema del origen del cáncer. Tampoco podemos esperar que ese procedimiento se descubra algún día. Porque -para dar sólo una de las razones- las hipótesis y teorías científicas están usualmente formuladas en términos que no aparecen en absoluto en la descripción de los datos empíricos en que ellas se apoyan y a cuya explicación sirven. Por ejemplo, las teorías acerca de la estructura atómica y subatómica de la materia contienen términos tales como «átomo», «electrón», «protón», «neutrón», «funci6n psi», etc.; sin embargo, esas teorías están basadas en datos de laboratorio acerca de los espectros de diversos gases, trayectorias de partículas en las cámaras de niebla y de burbujas, Aspectos cuantitativos de ciertas reacciones químicas, etc., todos los cuales se pueden describir sin necesidad de emplear estos «términos teóricos». Las reglas de inducción, tal como se conciben en el texto citado, tendrían, por tanto, que proporcionar un procedimiento mecánico para construir, sobre la base de los datos con que se cuenta, una hipótesis o teoría expresada en términos de algunos conceptos completamente nuevos, que hasta ahora nunca se habían utilizado en la descripción de los datos mismos. Podemos estar seguros de que ninguna regla mecánica conseguirá esto. ¿Cómo podría haber, por ejemplo, una regla general que, aplicada a los datos de que disponía Galileo relativos a los límites de efectividad de las bombas de succión, produjera, mecánicamente, una hipótesis basada en el concepto de un mar de aire?

Cierto que se podrían arbitrar procedimientos mecánicos para «inferir» inductivamente una hipótesis sobre la base de una serie de datos en situaciones especiales, relativamente simples. Por ejemplo, si se ha medido la longitud de una barra de cobre a diferentes temperaturas, los pares resultantes de valores asociados de la temperatura y la longitud se pueden representar mediante puntos en un sistema plano de coordenadas, y se los puede unir con una curva siguiendo alguna regla determinada para el ajuste de curvas. La curva, entonces, representa gráficamente una hipótesis general cuantitativa que expresa la longitud de la barra como función específica de su temperatura. Pero nótese que esta hipótesis no contiene términos nuevos; es formulable en términos de los conceptos de temperatura y longitud, que son los mismos que se usan para describir los datos. Además, la elección de valores «asociados» de temperatura y longitud como datos presupone ya una hipótesis que sirve de guía; a saber, la hipótesis de que con cada valor de la temperatura está asociado exactamente un valor de la longitud de la barra de cobre, de tal modo que su longitud es únicamente función de su temperatura. El trazado mecánico de la curva sirve entonces tan sólo para seleccionar como apropiada una determinada función. Este punto es importante; porque supongamos que en lugar de una barra de cobre examinamos una masa de nitrógeno encerrada en un recipiente cilíndrico cuya tapadera es un pistón móvil, y que medimos su volumen a diferentes temperaturas. Si con esto intentáramos obtener a partir de nuestros datos una hipótesis *general* que representara el volumen del gas como una función de su temperatura, fracasaríamos, porque el volumen de un gas es, a la vez, una función de su temperatura y de la presión ejercida sobre él, de modo que, a la misma temperatura, el gas en cuestión puede tener diferentes volúmenes.

Así, pues, incluso en estos casos tan simples los procedimientos mecánicos para la construcción de una hipótesis juegan tan sólo un papel parcial, pues presuponen una hipótesis antecedente, menos específica (es decir, que una determinada variable física es una función de otra variable única), a la que no se puede llegar por el mismo procedimiento.

No hay, por tanto, «reglas de inducción» generalmente aplicables por medio de las cuales se puedan derivar o inferir mecánicamente hipótesis o teorías a partir de los datos empíricos. La transición de los datos a la teoría requiere imaginación creativa. Las hipótesis y teorías científicas no se *derivan* de los hechos observados, sino que se *inventan* para dar cuenta de ellos. Son conjeturas relativas a las conexiones que se pueden establecer entre los fenómenos que se están estudiando, a las uniformidades y regularidades que subyacen a éstos. Las «conjeturas felices» de este tipo requieren gran inventiva, especialmente si suponen una desviación radical de los modos corrientes del pensamiento científico, como era el caso de la teoría de la relatividad o de la teoría cuántica. El esfuerzo inventivo requerido por la investigación científica saldrá beneficiado si se está completamente familiarizado con los conocimientos propios de ese campo. Un principiante difícilmente hará un descubrimiento científico de importancia, porque las ideas que puedan ocurrírsele probablemente no harán más que repetir las que ya antes habían sido puestas a prueba o, en otro caso, entrarán en colisión con hechos o teorías comprobados de los que aquél no tiene conocimiento,

Sin embargo, los procesos mediante los que se llega a esas conjeturas científicas fructíferas no se parecen a los procesos de inferencia sistemática. El químico Kekulé, por ejemplo, nos cuenta que durante mucho tiempo intentó sin éxito hallar una fórmula de la estructura de la molécula de benceno hasta que, una tarde de 1865, encontró una solución a su problema mientras dormitaba frente a la chimenea. Contemplando las llamas, le pareció ver átomos que danzaban serpenteando. De repente, una de las serpientes se asió la cola y formó un anillo, y luego giró burlonamente ante él. Kekulé se despertó de golpe: se le había ocurrido la idea -ahora famosa y familiar- de representar la estructura molecular del benceno mediante un anillo hexagonal. El resto de la noche lo pasó extrayendo las consecuencias de esta hipótesis 7.

Esta última observación contiene una advertencia importante respecto de la objetividad de la ciencia. En su intento de encontrar una solución a su problema, el científico debe dar rienda suelta a su imaginación, y el curso de su pensamiento creativo puede estar influido incluso por nociones científicamente discutibles. Por ejemplo, las investigaciones de Kepler acerca del movimiento de los planetas estaban inspiradas por el interés de aquél en una doctrina mística acerca de los números y por su pasión por demostrar la música de las esferas. Sin embargo, la objetividad científica queda salvaguardada por el principio de que, en la ciencia, si bien las hipótesis y teorías pueden ser libremente inventadas y propuestas, sólo pueden ser *aceptadas* e incorporadas al *corpus* del conocimiento científico si resisten la revisión crítica, que comprende, en particular, la comprobación, mediante cuidadosa observación y experimentación, de las apropiadas implicaciones contrastadoras.

Es interesante señalar que la imaginación y la libre invención juegan un papel de importancia similar en aquellas disciplinas cuyos resultados se validan mediante el razonamiento deductivo exclusivamente; por ejemplo, en matemáticas. Porque las reglas de la inferencia deductiva no proporcionan, tampoco, reglas mecánicas de descubrimiento. Tal como lo ilustraba nuestra formulación, en las páginas anteriores, del *modus tollens,* estas reglas se expresan por lo general en forma de esquemas generales: y cada ejemplificación de esos esquemas generales constituye una argumentación deductivamente válida. Dadas unas premisas concretas, ese esquema nos señala el modo de llegar a una consecuencia lógica. Pero, dado cualquier conjunto de premisas, las reglas de la inferencia deductiva señalan una infinidad de conclusiones válidamente deducibles. Tomemos, por ejemplo, una regla muy simple representada por el siguiente esquema:

$$\frac{p}{p \text{ o } q}$$

La regla nos dice, en efecto, que de la proposición según la cual es el caso que p, se sigue que es el caso que *p* o *q,* siendo p y q pro. posiciones cualesquiera. La palabra «o» se entiende aquí en su sentido «no exclusivo», de modo que decir «*p* o *q»* es lo mismo que decir «o *p* o *q* o ambos a la vez». Es claro que si las premisas de una argumentación de este tipo son verdaderas, entonces la conclusión debe serlo también; por tanto, cualquier razonamiento que tenga esta forma es un razonamiento válido. Pero esta regla, por sí sola, nos autoriza a inferir consecuencias infinitamente diferentes a partir de una sola premisa. Así, por ejemplo, de «la Luna no tiene atmósfera», nos autoriza a inferir un enunciado cualquiera de la forma «la Luna no tiene atmósfera o *q»,* donde, en lugar de *q,* podemos escribir un enunciado cualquiera, sea verdadero o falso; por ejemplo, la atmósfera de la Luna es muy tenue», «la Luna está deshabitada», «el oro es más denso que la plata», «la plata es más densa que el oro*»,* etc. (Es interesante -y no resulta nada difícil- probar que en Castellano se pueden construir infinitos enunciados diferentes; cada uno de ellos puede servir para sustituir a la variable *q.)* Hay, desde luego, otras reglas de la, inferencia deductiva que hacen «Mucho mayor la variedad de enunciados derivables de una premisa o conjunto de premisas. Por tanto, dado un conjunto de enunciados tomados como premisas, las reglas de deducción no marcan una dirección fija a nuestros procedimientos de inferencia. No nos señalan un enunciado como «la» conclusión que ha de derivarse de nuestras premisas, ni nos indican cómo obtener conclusiones interesantes o importantes desde el punto de vista sistemático; no proporcionan un procedimiento mecánico para, por ejemplo, derivar teoremas matemáticos significativos a partir de unos postulados dados. El descubrimiento de teoremas matemáticos importantes, fructíferos, al igual que el descubrimiento de teorías importantes, fructíferas, en la ciencia empírica, requiere habilidad inventiva, exige capacidad imaginativa, penetrante, de hacer conjeturas. Pero, además, los intereses de la objetividad científica están salvaguardados por la exigencia de una *validación objetiva* de esas conjeturas. En matemáticas esto quiere decir *prueba* por derivación deductiva a partir de los axiomas. Y cuando se ha propuesto como conjetura una proposición matemática, su prueba o refutación requiere todavía inventiva y habilidad, muchas veces de gran altura; porque las reglas de la inferencia deductiva no proporcionan tampoco un procedimiento mecánico general para construir pruebas, o refutaciones. Su papel sistemático es más modesto: servir *como criterios de corrección de las argumentaciones* que se ofrecen ~o pruebas; una argumentación constituirá una prueba matemática. válida si llega desde los axiomas hasta el teorema propuesto mediante una serie de pasos, todos los cuales son válidos de acuerdo con alguna de las reglas de la inferencia deductiva. Y comprobar si un argumento dado es una prueba válida en este sentido sí que es una tarea puramente mecánica.

Así, pues, como hemos visto, al conocimiento científico no se llega aplicando un procedimiento inductivo de inferencia a datos recogidos con anterioridad, sino más bien mediante el llamado «método de las hipótesis», es decir, inventando hipótesis a título de intentos de respuesta a un problema en estudio, y sometiendo luego éstas a la contrastación empírica. Una parte de esa contrastación la constituirá el ver si la hipótesis está confirmada por cuantos datos relevantes hayan podido ser obtenidos antes de -la formulación de aquélla; una hipótesis aceptable tendrá que acomodarse a los datos relevantes con que ya se contaba. Otra parte de la contrastación consistirá en derivar nuevas implicaciones contrastadoras a partir de la hipótesis, y comprobarlas mediante las oportunas observaciones o experiencias. Como antes hemos señalado, una contrastación con resultados favorables, por amplia que sea, no establece una hipótesis de modo concluyente, sino que se limita a proporcionarle un grado mayor o menor de apoyo. Por tanto, aunque la investigación científica no es inductiva en el sentido estrecho que hemos examinado, con algún detalle, se puede decir que es *inductiva en un sentido* más amplio, en la medida en que supone la aceptación de hipótesis sobre la base de datos que no las hacen deductivamente concluyentes, sino que sólo les proporcionan un «apoyo inductivo» más o menos fuerte, un mayor o menor grado de confirmación. Y las «reglas de inducción» han de ser concebidas, en cualquier caso, por analogía con las reglas de deducción, como cánones de validación, más bien que de descubrimiento. Lejos de generar una hipótesis que da cuenta de los resultados empíricos dados, esas reglas presuponen que están dados, por una parte, los datos empíricos que forman las «premisas» de la «inferencia inductiva» y, por otra parte, una hipótesis de tanteo que constituye su «conclusión». Lo que harían las reglas de inducción sería, entonces, formular criterios de corrección de la inferencia. Según algunas teorías de la inducción, las reglas determinarían la fuerza del apoyo que los datos prestan a la hipótesis, y pueden expresar ese apoyo en términos de probabilidades. En los Capítulos 3 y 4 estudiaremos varios factores que influyen en el apoyo inductivo y en la aceptabilidad de las hipótesis científicas.

3. LA CONTRASTACIÓN DE UNA HIPÓTESIS: SU LÓGICA Y SU FUERZA

1. Contrastaciones experimentales versus *contrastaciones no experimentales*

Vamos a examinar ahora más de cerca el razonamiento en que se basan las contrastaciones científicas y las conclusiones que se pueden extraer de sus resultados. Como hemos hecho antes, emplearemos la palabra «hipótesis» para referirnos a cualquier enunciado que esté sometido a contrastación, con independencia de si se propone describir algún hecho o evento concreto o expresar una ley general o alguna otra proposición más compleja.

Empecemos haciendo una observación muy simple, a la cual tendremos que referirnos con frecuencia en lo que sigue: las implicaciones contrastadoras de una hipótesis son normalmente de carácter condicional; nos dicen que *bajo condiciones de contrastación especificadas* se producirá un resultado de un determinado tipo. Los enunciados de este tipo se pueden poner en forma explícitamente condicional del siguiente modo:

> Si se dan las condiciones de tipo C, entonces se producirá un
> acontecimiento de tipo E.

Por ejemplo, una de las hipótesis consideradas por Semmelweis daba lugar a la implicación contrastadora

Si las pacientes de la División Primera se tienden de lado, entonces decrecerá la mortalidad por fiebre puerperal.

Y una de las implicaciones contrastadoras de su hipótesis fi miel era

Si las personas que atienden a las mujeres de la División Primera se lavaran las manos en una solución de cal clorurada, entonces decrecería la mortalidad por fiebre puerperal.

De modo similar, las implicaciones contrastadoras de la hipótesis de Torricelli incluían enunciados condicionales tales como

Si transportamos un barómetro de Torricelli a una altura cada vez mayor, entonces su columna de mercurio tendrá cada vez menor longitud.

Estas implicaciones contrastadoras son, entonces, implicadores en un doble sentido: son implicaciones de las hipótesis de las que se derivan, y tienen la forma de enunciados compuestos con «si... entonces», que en lógica se llaman condicionales o implicaciones materiales.

En cada uno de los tres ejemplos citados, las condiciones especificadas de contrastación, C, son tecnológicamente reproducibles y se pueden, por tanto, provocar a voluntad; y la reproducción de estas condiciones supone un cierto control de un factor (posición durante el parto; ausencia o presencia de materia infecciosa; presión de la atmósfera) que, de acuerdo con la hipótesis en cuestión tiene una influencia sobre el fenómeno en estudio (es decir, incidencia de la fiebre puerperal, en los dos primeros casos; longitud de la columna de mercurio, en el tercero). Las implicaciones contrastadoras de este tipo proporcionan la base para una *contrastación experimental,* que equivale a crear las condiciones C y comprobar luego si *E* se produce tal y como la hipótesis implica.

Muchas hipótesis científicas se formulan en términos cuantitativos. En el caso más simple representarán, por tanto, el valor de una variable cuantitativa como función matemática de otras determinadas variables. Así, la ley clásica de los gases, V = c-TIP, representa el volumen de una masa de gas como función de su temperatura y de su presión (c es un factor constante). Un enunciado de este tipo da lugar a infinitas implicaciones contrastadoras cuantitativas. En nuestro ejemplo, éstas tendrán la forma siguiente: si la temperatura de una masa de gas es TI y su presión es PI, entonces su volumen es c.TIP. Y una contrastación experimental consiste, entonces, en variar los valores de las variables «independientes» y comprobar si la variable «dependiente» asume los valores implicados por la hipótesis.

Cuando el control experimental es imposible, cuando las condiciones C mencionadas en la implicación contrastadora no pueden ser provocadas o variadas por medios tecnológicos disponibles, entonces habrá que contrastar la hipótesis de un modo no experimental, buscando o esperando que se produzcan casos en que esas condiciones especificadas se den espontáneamente, y comprobando luego si *E* se produce también.

Se dice a veces que en la contrastación experimental de una hipótesis cuantitativa, las cantidades mencionadas en la hipótesis sólo se varían de una en una, permaneciendo constantes todas las demás condiciones. Pero esto es imposible. En una contrastación experimental de la ley de los gases, por ejemplo, se puede variar la presión mientras la temperatura se mantiene constante, o viceversa, pero hay muchas otras circunstancias que pueden cambiar durante el proceso, entre ellas, quizá, la humedad relativa, la brillantez de la iluminación y la fuerza del campo magnético en el laboratorio, y, desde luego, la distancia entre el cuerpo y el Sol o la Luna. Y tampoco hay ninguna razón para mantener constantes hasta donde sea posible estos factores, si lo que se propone el experimento es contrastar la ley de los gases tal como se ha especificado. Porque la ley. afirma que el volumen de una masa determinada de gas está totalmente determinado por su temperatura y su presión. Ella implica, por tanto, que los otros factores son «irrelevantes con respecto al volumen», en el sentido de que los cambios que se produzcan en ellos no influyen en el volumen del gas. Por tanto, si hacemos que esos otros factores varíen, lo que hacemos es explorar una gama más amplia de casos en busca de posibles violaciones de la hipótesis que estamos sometiendo a contrastación.

La experimentación, sin embargo, se utiliza en la ciencia no sólo como un método de contrastación, sino también como un método de descubrimiento; y en este segundo contexto, como veremos, tiene sentido la exigencia de que ciertos factores se mantengan constantes.

Los experimentos de Torricelli y de Périer ilustran el uso de la experimentación como método de contrastación. En estos casos, va se ha propuesto antes una hipótesis, y el experimento se lleva a cabo para someterla a contrastación. En otros casos, en los que todavía no se ha propuesto ninguna hipótesis específica, el científico puede partir de una conjetura aproximativa, y puede utilizar la experimentación para que le conduzca a una hipótesis más definida. Al estudiar cómo un hilo metálico se alarga al suspender de él un peso, puede conjeturar que el incremento en la longitud dependerá de, la longitud inicial del hilo, de su sección transversal, del tipo de metal de que está hecho y de los pesos del cuerpo suspendido de él. Y puede después llevar a cabo experimentos para determinar si estos factores tienen influencia sobre el aumento de longitud (en este caso, la experimentación sirve como método de contrastación), y, si ocurre así, cómo influyen éstos sobre la «variable dependiente» -es decir, cuál es la forma matemática específica de la dependencia (en este caso, la experimentación sirve como un método de descubrimiento). Sabiendo que la longitud de un alambre varía también con la temperatura, el experimentador, antes de nada, mantendrá la temperatura constante, para eliminar la influencia perturbadora de este factor (aunque más adelante puede hacer variar sistemáticamente la temperatura para ver si los valores de ciertos parámetros en las funciones que conectan el incremento en longitud con los demás factores dependen de la temperatura). En sus experimentos a temperaturas constantes hará variar de uno en uno los factores que estima relevantes, manteniendo constantes los demás. Sobre la base de los resultados así obtenidos formulará intentos de generalización que expresen el incremento en longitud como función de la longitud inicial, del peso, etc.; y a partir de aquí, puede proceder a construir una fórmula más general que represente el incremento en longitud como función de todas las variables examinadas.

Así, pues, en casos de este tipo, en los que la experimentación juega un papel heurístico, un papel de guía en el descubrimiento de hipótesis, tiene sentido el principio de que se han de mantener constantes todos los «factores relevantes», excepto uno. Pero, por supuesto, lo más que se puede hacer es mantener constantes todos menos uno de los factores que se presumen «relevantes», en el sentido de que afectan al fenómeno que estamos estudiando: queda siempre la posibilidad de que se hayan pasado por alto algunos otros factores importantes.

Una de las características notables y una de las grandes ventajas de la ciencia natural es que muchas de sus hipótesis admiten una contrastación experimental. Pero no se puede decir que la contrastación experimental de hipótesis sea un rasgo distintivo de todas, y sólo, las ciencias naturales. Ella no establece una línea divisoria entre la ciencia natural y la ciencia social, porque los procedimientos de contrastación experimental se utilizan también en psicología y, aunque en menor medida, en sociología. Por otra parte, el alcance de la contrastación experimental aumenta constantemente a medida que se van poniendo a punto los recursos tecnológicos necesarios. Además, no todas las hipótesis de las ciencias naturales son susceptibles de contrastación experimental. Tomemos, por ejemplo, la ley formulada por Leavitt y Shapley para las fluctuaciones periódicas en la luminosidad de un cierto tipo de estrella variable, las llamadas Cefeidas clásicas. La ley afirma que cuanto más largo es el período P de la estrella, es decir, el intervalo de tiempo entre dos estados sucesivos de máxima luminosidad, tanto mayor es su luminosidad intrínseca; en términos cuantitativos, $M = -(a + b \, . \, log \, \mathrm{P})$, donde M es la magnitud, que por definición varía inversamente a la luminosidad de la estrella. Esta ley implica deductivamente un cierto número de enunciados de contrastación que expresan cuál será la magnitud de una Cefeida si su período tiene este o aquel valor concreto, por ejemplo, 5,3 días o 17,5 días. Pero no podemos producir a voluntad Cefeidas con períodos específicos; por tanto, la ley no se puede contrastar mediante un experimento, sino que el astrónomo debe buscar por el firmamento nuevas Cefeidas y debe intentar averiguar si su magnitud y su período se adaptan a esa ley presupuesta.

2. El papel de las hipótesis auxiliares

Hemos dicho antes que las implicaciones contrastadoras «se derivan» o «se infieren» de la hipótesis que se ha de contrastar. Esta afirmación, sin embargo, describe de una manera muy rudimentaria la relación entre una hipótesis y los enunciados que constituyen sus implicaciones contrastadoras. En algunos casos, ciertamente, es posible inferir deductivamente a partir de una hipótesis ciertos enunciados condicionales que puedan servirle de enunciados contrastadores. Así, como acabamos de ver, la ley de Leavitt-Shapley implica deductivamente enunciados de la forma: «Si la estrella s es una Cefeida con un período de tantos días, entonces su magnitud será tal y tal.» Pero ocurre con frecuencia que la «derivación» de una implicación contrastadora es menos simple y concluyente. Tomemos, por ejemplo, la hipótesis de Semmelweis de que la fiebre puerperal está producida por la contaminación con materia infecciosa, y consideremos la implicación contrastadora de que si las personas que atienden a las pacientes se lavan las manos en una solución de cal dorurada, entonces decrecerá la mortalidad por fiebre puerperal. Este enunciado no se sigue deductivamente de la hipótesis sola; su derivación presupone la premisa adicional de que, a diferencia del agua y el jabón por sí solos, una solución de cal clorural destruirá la materia infecciosa. Esta premisa, que en la argumentación se da implícitamente por establecida, juega el papel de lo que llamaremos Supuesto auxiliar o hipótesis auxiliar en la derivación del enunciado contrastador a partir de la hipótesis de Semmelweis. Por tanto, no estamos autorizados a afirmar aquí que si la hipótesis H es verdadera, entonces debe serlo también la implicación contrastadora I, sino sólo que si H y la hipótesis auxiliar son ambas verdaderas, entonces también lo será I. La confianza en las hipótesis auxiliares, como veremos, es la regla, más bien que la excepción, en la contrastación de hipótesis científicas; y de ella se sigue una consecuencia importante para la cuestión de si se puede sostener que un resultado desfavorable de la contrastación, es decir, un resultado que muestra que I es falsa, refuta la hipótesis sometida a investigación.

Si H sola implica I y si los resultados empíricos muestran que I es falsa, entonces *H* debe ser también calificada de falsa: esto lo concluimos siguiendo la argumentación llamada modus *tollens (2a).* Pero cuando I se deriva de *H* y de una o más hipótesis auxiliares A, entonces el esquema *(2a)* debe ser sustituido por el siguiente:

> *Si H* y A son ambas verdaderas, entonces también lo es I.
> Pero (como se muestra empíricamente) I no es verdadera.
> ____

H y A no son ambas verdaderas.

Así, pues, si la contrastación muestra que I es falsa, sólo podemos inferir que o bien la hipótesis o bien uno de los supuestos auxiliares incluidos en A debe ser falso; por tanto, la contrastaci6n no proporciona una base concluyente para rechazar *H.* Por ejemplo, aunque la medida antiséptica tomada por Semmelweis no hubiera ido seguida de un descenso en la mortalidad, su hipótesis podía haber seguido siendo verdadera; el resultado negativo de la contrastación podía haber sido debido a la ineficacia antiséptica del cloruro de la solución de cal.

Una situación de este tipo no es una mera posibilidad abstracta. El astrónomo Tycho Brahe, cuyas cuidadosas observaciones proporcionaron la base empírica para las leyes del movimiento planetario de Kepler, rechazó la concepción copernicana de que la Tierra se mueve alrededor del Sol. Dio, entre otras, la siguiente razón: si la hipótesis de Copérnico fuera verdadera, entonces la dirección en que una estrella fija sería visible para un observador situado en la Tierra en un momento determinado del día cambiaría gradualmente; porque en el curso del viaje anual de la Tierra alrededor del Sol, la estrella sería observada desde un punto constantemente cambiante del mismo modo que un niño montado en un tiovivo observa la cara de un espectador desde un punto cambiante y, por tanto, la ve en una dirección constantemente cambiante. Más específicamente la dirección definida por el observador y la estrella variaría periódicamente entre dos extremos, que corresponderían a puntos opuestos de la órbita de la Tierra en torno al Sol. El ángulo subtendido por estos puntos se denomina paralaje anual de la estrella; cuanto más lejos está la estrella de la Tierra, tanto menor sea su paralaje. Brabe, que hizo sus observaciones con anterioridad a la introducción del telescopio, buscó, con los instrumentos más precisos de que disponía, un testimonio empírico de esos «movimientos paralácticos» de las estrellas fijas. Y no encontró ninguno. En consecuencia, rechazó la hipótesis de que la Tierra se movía. Pero la implicación contrastadora según la cual las estrellas fijas muestran movimientos paralácticos observables sólo se podía derivar de la hipótesis de Copérnico con la ayuda del supuesto auxiliar de que las estrellas fijas están tan próximas a la Tierra que sus movimientos son lo, suficientemente amplios como para que los instrumentos de Brahe puedan detectarlos. Brahe era consciente de que estaba contando con este supuesto auxiliar, y creía que había razones para considerarlo verdadero; por tanto, se sintió obligado a rechazar la concepción copernicana. Desde entonces se ha descubierto que las estrellas fijas muestran desplazamientos paralácticos, pero que la hipótesis auxiliar de Brahe era errónea: incluso las estrellas fijas más cercanas están mucho más lejos de lo que él había supuesto, y, por tanto, las medidas de las paralajes requieren telescopios poderosos y técnicas muy precisas. La primera medición universalmente aceptada de una paralaje estelar no se hizo hasta 1838.

La importancia de las hipótesis auxiliares en la contrastación llega todavía más lejos. Supongamos que se contrasta una hipótesis H poniendo a prueba una implicación contrastadora, «Si C, entonces E», derivada a partir de *H* y de un conjunto A de hipótesis auxiliares. La contrastación, entonces, viene a consistir, en último término, en comprobar si *E* ocurre o no en una situación contrastadora en la que cuando menos por lo que el investigador sabe si se dan las condiciones C. Sí de hecho este no es el caso -si, por ejemplo, el material de la prueba es defectuoso, o no suficientemente *fino-,* entonces puede ocurrir que no se dé *E,* aunque *H* y A sean verdaderas. Por esta razón, se puede decir que el conjunto completo de supuestos auxiliares presupuestos por la contrastación incluye la suposición de que la organización de la prueba satisface las condiciones especificadas H.

Este punto es particularmente importante cuando la hipótesis que se está sometiendo a examen ha resistido bien otras contrastaciones a las que ha sido sometida anteriormente y constituye una parte esencial de un sistema más amplío de hipótesis interconectadas apoyado por otros testimonios empíricos distintos. En ese caso, se hará, verosímilmente, un esfuerzo por explicar el hecho de que no se haya producido mostrando que algunas de las condiciones *C* no estaban satisfechas en la prueba.

Tomemos como ejemplo la hipótesis de que las cargas eléctricas tienen una estructura atómica y son todas ellas múltiplos enteros de la carga del átomo de electricidad, el electrón. Los experimentos llevados a cabo a partir de 1909 por R. A. Millikan prestaron a esta hipótesis un apoyo notable. En estos experimentos, la carga eléctrica de una gota extremadamente pequeña de algún líquido tal como aceite o mercurio se determinaba midiendo las velocidades de las gotitas al caer por el influjo de la gravedad o al elevarse bajo la influencia de un campo magnético que actuaba en dirección opuesta. Millikan observó que todas las cargas eran o bien iguales a una cierta carga mínima básica, o bien múltiplos enteros de esta misma carga mínima, que él entonces identificó como la carga del electrón. Sobre la base de numerosas mediciones muy cuidadosas, dio su valor en unidades electrostáticas: 4,774 X 10 (-10). Esta hipótesis fue pronto discutida desde Viena por el físico Ehrenhaft, quien anunció que había repetido el experimento de Millikan y había encontrado cargas que eran considerablemente menores que la carga electrónica especificada por Millikan. En su discusión de los resultados de Ehrenhaft, Millikan sugirió varias fuentes posibles de error (es decir, violaciones de los requisitos de la contrastación) que podían explicar los resultados empíricos, aparentemente adversos, de Elirenhaft: evaporación durante la observación, que haría disminuir el peso de una gota; formación de una película de óxido en las gotas de mercurio utilizadas en algunos de los experimentos de Ehrenhaft; influencia perturbadora de partículas de polvo suspendidas en el aire; desviación de las gotas del foco del telescopio utilizado para observarlas; pérdida, por parte de muchas de las gotas, de la forma esférica requerida; errores inevitables en el cronometraje de los movimientos de las pequeñas partículas. Con respecto a dos partículas «aberrantes», observadas y registradas por otro investigador, Millikan concluye: La única interpretación posible en lo que se refiere a estas dos partículas ... es que ... no eran esferas de aceite», sino partículas de polvo (pp. 170, 169). Millikan observa después que los resultados de repeticiones más precisas de su propio experimento estaban esencialmente de acuerdo con el resultado que él había anudado de antemano. Ehrenhaft continuó durante muchos años defendiendo y ampliando sus datos concernientes a las cargas subelectrónicas; pero hubo otros físicos que no fueron, en general, capaces de reproducir sus resultados, y la concepción atomística de la carga eléctrica se mantuvo. Se descubrió más tarde, sin embargo, que el valor numérico que Millikan dio para la carga electrónica pecaba ligeramente por defecto; es interesante señalar que la desviación era debida a un error en una de las propias hipótesis auxiliares de Millikan: ¡había utilizado un valor demasiado bajo para la viscosidad del aire al evaluar los datos relativos a su, gota de aceite!

3. Contrastaciones cruciales

Las observaciones anteriores tienen importancia también para la idea de una contrastación crucial, que se puede describir brevemente del siguiente modo: supongamos que H, y H2 son dos hipótesis rivales relativas al mismo asunto que hasta el momento han superado cm el mismo éxito las contrastaciones empíricas, de modo que los testimonios disponibles no favorecen a una de ellas más que a la otra. Entonces es posible encontrar un modo de decidir entre las dos si se puede determinar alguna contrastación con respecto a la cual *H1* y *H2* predigan resultados que están en conflicto; es decir, si, dado cierto tipo de condición de contrastación, *C*, la primera hipótesis da lugar a la implicación contrastadora «Si *C*, entonces *E1», y la* segunda «Si *C*, entonces *E2»,* donde *E1 y E2* son resultados que se excluyen mutuamente. La ejecución de esa contrastación refutará presumiblemente una de las hipótesis y prestará su apoyo a la otra.

Un ejemplo clásico lo constituye el experimento realizado por Foucault para decidir entre dos concepciones rivales de la naturaleza de la luz. Una de ellas, propuesta por Huyghens y desarrollada después por Fresnel y Young, sostenía que la luz consiste en ondas transversales que se propagan en un medio elástico, el éter; la otra era la concepción corpuscular de Newton, según la cual la luz se compone de partículas extremadamente pequeñas que se desplazan a alta velocidad. Cualquiera de estas dos concepciones admitía la conclusión de que los rayos de luz cumplen las leyes de la propagación rectilínea, de la reflexión y de la refracción. Pero la concepción ondulatoria llevaba además a la implicación de que la luz viajaría con mayor rapidez en el aire que en el agua, mientras que la concepción corpuscular conducía a la conclusión opuesta. En 1850 Foucault consiguió realizar un experimento en el que se comparaban directamente las velocidades de la luz en el aire y en el agua. Se producían imágenes de dos puntos emisores de luz por medio de rayos luminosos que pasaban, respectivamente, a través del agua y a través del aire y se reflejaban luego en un espejo que giraba muy rápidamente. La imagen de la primera fuente de luz aparecería a la derecha o a la izquierda de la de la segunda, según que la velocidad de la luz en el aire fuera mayor o menor que en el agua. Las implicaciones contrastadoras rivales que se trataba de someter a prueba mediante este experimento podrían expresarse brevemente de este modo: «Si se lleva a cabo el experimento de Foucault, entonces la primera imagen aparecerá a la derecha de la segunda» y «si se lleva a cabo el experimento de Foucault, entonces la primera imagen aparecerá a la izquierda de la segunda». El experimento mostró que la primera de estas implicaciones era verdadera.

Se consideró que este resultado constituía una refutación definitiva de la concepción corpuscular de la luz y una vindicación decisiva de la ondulatoria. Pero esta estimación, aunque muy natural, sobrevaloraba la fuerza de la contrastación. Porque el enunciado de que la luz viaja con mayor rapidez en el agua que en el aire no se sigue simplemente de la concepción general de los rayos de luz como chorros de partículas; esta concepción por sí sola es demasiado vaga como para llevar a consecuencias cuantitativas específicas. Implicaciones tales como las leyes de reflexión y refracción y el enunciado acerca de las velocidades de la luz en el aire y en el agua sólo se pueden derivar si a la concepción corpuscular general se le añaden supuestos específicos concernientes al movimiento de los corpúsculos y a la influencia ejercida sobre ellos por el medio que los rodea. Newton hizo explícitos esos supuestos, y al hacerlo, estableció una *teoría* concreta sobre la propagación de la luz. Es el conjunto completo de estos principios teoréticos básicos el que conduce a consecuencias empíricamente contrastables tal como la que comprobó Foucault con su experimento. De manera análoga, la concepción ondulatoria estaba formulada como una *teoría* basada en un conjunto de supuestos específicos acerca de la propagación de las ondas de éter en diferentes medios ópticos; y, una vez más, es este conjunto de principios teoréticos el que implica las leyes de reflexión y refracción y el enunciado de que la velocidad de la luz es mayor en el aire que en el agua. En consecuencia -suponiendo que todas las demás hipótesis auxiliares sean verdaderas-, el resultado de los experimentos de Foucault sólo nos autoriza a inferir que no todos los supuestos básicos o los principios de la teoría corpuscular son verdaderos, que al menos uno de ellos tiene que ser falso. Pero no nos dice cuál de ellos hemos de rechazar. Por tanto, deja abierta la posibilidad de que la concepción general de que hay una especie ¡de proyectiles corpusculares que juegan un papel en la propagación de a luz pueda mantenerse en alguna forma modificada que estaría caracterizada por un conjunto diferente de leyes básicas.

Y de hecho, en 1905, Einstein propuso una versión modificada de la concepción corpuscular en su teoría de los quanta de luz o fotones, como se les llamó. El testimonio que él citó en apoyo de su teoría incluía un experimento realizado por Lenard en 1903. Einstein lo caracterizó como «un segundo experimento crucial» concerniente a las concepciones corpuscular y ondulatoria, y señaló que «eliminada» la teoría ondulatoria clásica, en la que por entonces la noción de vibraciones elásticas en el éter había sido sustituida por la idea, desarrollada por Maxwell y Hertz, de ondas electromagnéticas transversales. El experimento de Lenard, que involucraba el efecto fotoeléctrico, se podía interpretar como si con él se estuvieran sometiendo a contrastación dos implicaciones rivales concernientes a la energía luminosa que un punto radiante P puede transmitir, durante una determinada unidad de tiempo, a una pequeña pantalla perpendicular los rayos de luz. Según la teoría ondulatoria clásica, esa energía decrecería de forma gradual y continua hacia cero a medida que la pantalla se alejara del punto P; según la teoría del fotón, esa energía debe ser, como mínimo, la de un solo fotón -a menos que durante el intervalo de tiempo dado ningún fotón choque contra la pantalla, pues en ese caso la energía recibida sería cero; por tanto, no habría un decrecimiento continuo hasta cero. El experimento de Lenard corroboró esta última alternativa. Tampoco, sin embargo, resultó la teoría ondulatoria definitivamente refutada; el resultado del experimento mostraba sólo que era necesaria *alguna* modificación en el sistema de supuestos básicos de la teoría ondulatoria. De hecho, Einstein intentó modificar la teoría clásica lo menos posible. Así, pues, un experimento del tipo de los que acabamos de ilustrar no puede estrictamente refutar una de entre dos hipótesis rivales.

Pero tampoco puede «probar» o establecer definitivamente la otra; porque, como se señaló en general en la Sección 2 del Capítulo 2, las hipótesis y las teorías científicas no pueden ser probadas de un modo concluyente por ningún conjunto de datos disponibles, por muy precisos y amplios que sean. Esto es particularmente obvio en el caso de hipótesis o teorías que afirman o implican leyes generales, bien para algún proceso que no es directamente observable -como en el caso de las teorías rivales de la luz-, bien para algún fenómeno más fácilmente accesible a la observación y a la medición, tal como la caída libre de los cuerpos. La ley de Galileo, por ejemplo, se refiere a todos los casos de caída libre en el pasado, en el presente y en el futuro, mientras que todos los datos relevantes disponibles en un momento dado pueden abarcar sólo aquel relativamente pequeño conjunto de casos -todos ellos pertenecientes al pasado- en los que se han efectuado mediciones cuidadosas. E incluso si se encontrara que todos los casos observados satisfacían estrictamente la ley de Galileo, esto obviamente no excluye la posibilidad de que algunos casos no observados en el pasado o en el futuro dejen de ajustarse a ella. En suma: ni siquiera la más cuidadosa y amplia contrastación puede nunca refutar una de entre dos hipótesis y probar la otra; por tanto, estrictamente interpretados, los experimentos cruciales son imposibles en la ciencia. Sin embargo, un experimento como los de Foucault o Lenard puede ser crucial en un sentido menos estricto, práctico: puede mostrar que una de entre dos teorías rivales es inadecuada en importantes aspectos, y puede proporcionar un fuerte apoyo a la teoría rival; y, en cuanto resultado, puede ejercer una influencia decisiva sobre el sesgo que tome la subsiguiente labor teórica y experimental.

4. Las hipótesis «ad hoc»

Si un modo concreto de contrastar una hipótesis *H* *presupone* unos supuestos auxiliares A1, A2, ... An -es decir, si éstos se usan como premisas adicionales para derivar de *H* la implicación contrastadora relevante *I*-, entonces, como vimos antes, un resultado negativo de la contrastación que muestre que *I* es falsa, se limita a

decirnos que o bien *H* o bien alguna de las hipótesis auxiliares debe ser falsa, y que se debe introducir una modificación en este conjunto de enunciados si se quiere reajustar el resultado de la contrastación.
Ese ajuste se puede realizar modificando o abandonando completamente *H,* o introduciendo cambios en el sistema de hipótesis auxiliares. En principio, siempre sería posible retener *H,* incluso si la contrastación diera resultados adversos importantes, siempre que estemos dispuestos a hacer revisiones suficientemente radicales y quizá laboriosas en nuestras hipótesis auxiliares. Pero la ciencia no tiene interés en proteger sus hipótesis o teorías a toda costa, y ello Por buenas razones. Tomemos un ejemplo. Antes de que Torricelli introdujera su concepción de la presión del mar de las bombas aspirantes se explicaba por la idea de que la naturaleza tiene horror al vacío y que, por tanto, el agua sube por el tubo de la bomba para llenar el vacío creado por la subida del pistón. La misma idea servía también para explicar otros diversos fenómenos. Cuando Pascal escribió a Périer pidiéndole que realizara el experimento del Puy-de-Dóme, argüía que el resultado esperado constituiría una refutación «decisiva» de esa concepción:

Si ocurriera que la altura del mercurio fuera menor en la cima que en la base de la montaña... se seguiría necesariamente que el peso y la presión del aire es la única causa de esta suspensión del mercurio, y no el horror al vacío: porque es obvio que hay mucho más aire ejerciendo presión al pie de la montaña que en la cumbre, y no se puede decir que la naturaleza tenga más horror al vacío al pie de la montaña que en la cumbre.

Sin embargo, esta última observación señala de hecho un modo de salvar la concepción de un *horror vacui* frente a los datos de Périer. Los resultados de Périer constituyen un testimonio decisivo en contra de esa concepción sólo si aceptamos el supuesto auxiliar de que la fuerza del horror no depende del emplazamiento. Para hacer compatible el testimonio aparentemente adverso obtenido por Périer con la idea de un *horror vacui,* basta con introducir en su lugar la hipótesis auxiliar de que el horror de la naturaleza al vacío decrece a medida que aumenta la altitud. Pero si bien este supuesto no es lógicamente absurdo ni patentemente falso, se le pueden poner objeciones desde el punto de vista de la ciencia. Porque lo habríamos introducido *ad hoc* -es decir, con el único propósito de salvar una hipótesis seriamente amenazada por un testimonio adverso, no vendría exigida por otros datos, y, en general, no conduce a otras implicaciones contrastadoras. La hipótesis de la presión del aire sí conduce, en cambio, a ulteriores implicaciones. Pascal señala, por ejemplo, que si se lleva a la cumbre de una montaña un globo parcialmente hinchado, llegaría más inflado a la cumbre.

Hacia mediados del siglo XVII, un grupo de físicos, los plenistas, sostenían que en la naturaleza no puede haber vacío; y con el fin de salvar esta idea frente al experimento de Torricelli, uno de ellos propuso la hipótesis *ad hoc* de que el mercurio de un barómetro se sostenía en su lugar gracias al «funiculus», un hilo invisible por medio del cual quedaba suspendido de lo alto de la superficie interna del tubo de cristal. De acuerdo con una teoría inicialmente muy útil, desarrollada a comienzos del siglo XVIII, la combustión de los metales supone la fuga de una sustancia llamada flogisto. Esta concepción fue abandonada finalmente como resultado de los trabajos experimentales de Lavoisier, el cual mostró que el producto final del proceso de combustión tiene un peso mayor que el del metal originario. Pero algunos tenaces partidarios de la teoría del flogisto intentaron hacer compatible su concepción con los resultados de Lavoisier, proponiendo la hipótesis *ad hoc* de que el flogisto tenía peso negativo, de modo que su fuga incrementaría el peso del residuo.

No olvidemos, sin embargo, que, visto ahora, parece fácil descartar ciertas sugerencias científicas propuestas en el pasado calificándolas de hipótesis *ad hoc.* Muy difícil, en cambio, podría resultar el juicio sobre una hipótesis propuesta contemporáneamente. No hay, de hecho, un criterio preciso para identificar una hipótesis *ad hoc,* aunque las cuestiones antes suscitadas pueden darnos alguna orientación a este respecto: la hipótesis propuesta, ¿lo es simplemente con el propósito, de salvar alguna concepción en uso contra un testimonio empírico adverso, explica otros fenómenos, da lugar a más implicancias contrastadoras significativas? Y otra consideración relevante sería ésta: si para hacer compatible una cierta concepción básica con los datos hay que introducir más y más hipótesis concretas, el sistema total resultante será eventualmente algo tan complejo que tendrá que sucumbir cuando se proponga una concepción alternativa simple.

5. *Contrastabilidad-en-principio*

alcance empírico

Como muestra lo que acabamos de decir, ningún enunciado o conjunto de enunciados *T* puede ser propuesto significativamente como una hipótesis o teoría científica a menos que pueda ser sometido a contrastación empírica objetiva, al menos «en principio». Es decir: que debe ser posible derivar de *T*, en el sentido amplio hemos indicado, ciertas implicaciones contrastadoras de la forma «si se dan las condiciones de contrastación *C*, entonces se producirá el resultado *E*»; pero no es necesario que las condiciones de contrastación estén dadas o sean tecnológicamente producibles en el momento en que *T* es propuesto o examinado. Tomemos, por ejemplo, la hipótesis de que la distancia cubierta en *t* segundos por un cuerpo en caída libre partiendo de un estado de reposo cerca de la superficie de la Luna es s = 2,7 *t2* pies. Esto da lugar deductivamente a un conjunto de implicaciones contrastadoras en el sentido de que las distancias cubiertas por ese cuerpo en 1, 2, 3... segundos será 2,7, 10,8, 24,3 ... pies. Por tanto, la hipótesis es contrastable en principio, aunque de hecho sea imposible realizar esa contrastación.

Pero si un enunciado o conjunto de enunciados no es contrastable al menos en principio, o, en otras palabras, si no tiene en absoluto implicaciones contrastadoras, entonces no puede ser propuesto significativamente o mantenido como una hipótesis o teoría científica, porque no se concibe ningún dato empírico que pueda estar de acuerdo o ser incompatible con él. En este caso, no tiene conexión ninguna con fenómenos empíricos, o, como también diremos, carece de *alcance empírico.* Consideremos, por ejemplo, la opinión según la cual la mutua atracción gravitatoria de los cuerpos físicos es una manifestación de ciertos «apetitos o tendencias naturales» muy relacionados con el amor, inherentes a esos cuerpos, que hacen «inteligibles y posibles sus movimientos naturales». ¿Qué implicaciones contrastadoras se pueden derivar de esta interpretación de los fenómenos gravitatorios? Si pensamos en algunos aspectos característicos del amor en el sentido habitual de la palabra, esta opinión parecería implicar que la afinidad gravitatoria es un fenómeno selectivo: no todos los cuerpos físicos se atraerían entre sí. Tampoco sería siempre igual la fuerza de afinidad de un cuerpo hacia un segundo cuerpo que la de éste hacia el primero, ni dependería de las masas de los cuerpos o de la distancia entre ellos. Pero puesto que se sabe que todas estas consecuencias hasta ahora expuestas son falsas, es evidente que la concepción que estamos examinando no pretende implicarlas. Y, además, esta concepción afirma simplemente que las afinidades naturales que subyacen a la atracción gravitatoria están *relacionadas* con el amor. Pero, como veremos, esta afirmación es tan evasiva que no permite la derivación de *ninguna* implicación contrastadora. No hay ningún hecho específico de ningún tipo que venga exigido por esta interpretación; no se concibe ningún dato de observación o de experimentación que la confirme o la refute. No tiene, por tanto, en concreto implicaciones concernientes a los fenómenos gravitatorios; en consecuencia, no puede explicar estos fenómenos, no puede hacerlos «inteligibles». Como una ilustración más de este punto, supongamos que alguien presentara la tesis alternativa de que los cuerpos físicos se atraen gravitatoriamente entre sí y tienden a moverse los unos hacia los otros en virtud de una tendencia natural análoga al odio, en virtud de una inclinación natural a chocar con otros objetos físicos. y destruirlos. ¿Se podría concebir algún procedimiento para decidir entre estas opiniones en conflicto? Es claro que no. Ninguna de ellas da lugar a implicaciones contrastables; no es posible ninguna discriminación empírica entre ellas. No se trata de que el tema sea «demasiado profundo» para que se le pueda dar una decisión científica: las dos interpretaciones, que verbalmente están en conflicto, no hacen aserción alguna. Por tanto, la cuestión de si son verdaderas o falsas no tiene sentido, y ésta es la razón de que la investigación científica no pueda decidir entre ellas. Son *pseudo-hipótesis:* hipótesis sólo en apariencia.

Hay que tener presente, sin embargo, que una hipótesis científica normalmente sólo da lugar a implicaciones contrastadoras cuando se combina con supuestos auxiliares apropiados. Así, la concepción de Torricelli de la presión ejercida por el mar de aire sólo da lugar a implicaciones contrastadoras definidas en el supuesto de que la presión del aire está sujeta a leyes análogas a las de la presión del agua; este supuesto subyace, por ejemplo, en el experimento del Puyme. Al dictaminar si una hipótesis propuesta tiene alcance empírico, debemos, por tanto, preguntarnos qué hipótesis auxiliares implícitas o tácitamente presupuestas en ese contexto, y si, en conjunción con éstas, la hipótesis dada conduce a implicaciones contrastadoras (distintas de las que se pueden derivar de las hipótesis auxiliares solas).

Además, es frecuente que una idea científica se introduzca inicialmente de una forma que ofrezca posibilidades limitadas y poco precisas de contrastación; y sobre la base de estas contrastaciones iniciales se le irá dando gradualmente una forma más definida, precisa y variadamente contrastable.

Por estas razones, y por otras más que nos llevarían demasiado lejos, es imposible trazar una frontera neta entre hipótesis y teorías que son contrastables en principio e hipótesis y teorías que no lo son. Pero, aunque algo vaga, la distinción a la que nos referimos es importante y esclarecedora para valorar la significación y la eficacia explicativa potencial de hipótesis y teorías propuestas.

4. CRITERIOS DE CONFIRMACIÓN Y ACEPTABILIDAD

Como antes hemos señalado, el resultado favorable de una contratación, por muy amplia y exacta que sea, no puede proporcionar una prueba concluyente de una hipótesis, sino sólo un más o menos fuerte apoyo empírico, una mayor o menor confirmación. Cuál es la fuerza del apoyo prestado a una hipótesis por un cuerpo de datos depende de varias de las características de esos datos, que inmediatamente examinaremos. Al hacer una estimación de lo que pudiéramos llamar la aceptabilidad o credibilidad científica de una hipótesis, uno de los factores más importantes a considerar es, desde luego, la amplitud y la índole de los datos relevantes y la resultante fuerza apoyo que ello da a la hipótesis. Pero hay que tomar en cuenta también otros varios factores; también esto lo estudiaremos en este capítulo. Empezaremos hablando, de un modo un poco intuitivo, apoyo más o menos fuerte, de pequeños o grandes incrementos la confirmación, de factores que hacen aumentar o disminuir la credibilidad de una hipótesis, etc. Al final del capítulo veremos si los conceptos a los que nos referimos admiten una interpretación cuantitativa precisa.

1. Cantidad, variedad y precisión del apoyo empírico

En ausencia de un testimonio desfavorable, se considerará normalmente que la confirmación de una hipótesis aumenta con el número de resultados favorables de la contrastación. Por ejemplo, se considerará que cada nueva Cefeida variable cuyo período y luminosidad cumplan la ley de Leavitt-Shapley añade apoyo empírico a la ley. Pero, hablando en general, el incremento en la confirmación representado por un nuevo caso favorable será menor a medida que aumenta el número de casos favorables que se han dado con anterioridad. Si ya se cuenta con miles de casos confirmatorios, la adición de un dato favorable más aumentará la confirmación, pero poco.

Hay que precisar esta observación, sin embargo. Si los casos anteriores han sido todos ellos obtenidos mediante contrastaciones del mismo tipo, y el nuevo dato, en cambio, es el resultado de un tipo diferente de contrastación, la confirmación de la hipótesis se verá significativamente acrecentada. Porque la confirmación de una hipótesis no depende sólo de la cantidad de datos favorables de que se dispone, sino también de su variedad: cuanto mayor sea la variedad mayor será el apoyo resultante.

Supongamos, por ejemplo, que la hipótesis que se está considerando es la ley de Snell, según la cual un rayo de luz que se desplaza oblicuamente de un medio óptico a otro se refracta en la superficie que los separa de tal modo que la relación sen α / sen β de los senos de los ángulos de incidencia y de refracción es una constante para cualquier par de medios ópticos. Comparemos ahora tres conjuntos, compuesto cada uno de cien contrastaciones. En el primer conjunto, los medios y los ángulos de incidencia se mantienen constantes: en cada experimento, el rayo pasa del aire al agua con un ángulo de incidencia de 30°; se mide el ángulo de refracción. Supongamos que en todos los casos la relación sen α/ sen β tiene el mismo valor. En el segundo caso, los medios se mantienen constantes, pero se varía el ángulo a: la luz pasa del aire al agua con ángulos distintos; medimos β. Supongamos que también aquí la relación sen α / sen β tiene el mismo valor en todos los casos. En el tercer conjunto se hace variar a la vez los medios y el ángulo a: se examinan 25 pares de medios: para cada par se utilizan cuatro ángulos diferentes. Supongamos que, para cada par de medios, los cuatro valores asociados de la relación sen α / sen β son iguales, mientras que las relaciones asociadas con pares diferentes tienen diferentes valores.

Cada conjunto de contrastaciones, entonces, presenta una clase de resultados favorables, puesto que las relaciones asociadas con cualquier par determinado de medios son iguales, tal como implicaba la ley de Snell. Pero se consideraría sin duda que el tercer conjunto, que ofrece la mayor variedad de casos positivos, presta a la ley un apoyo más fuerte que el segundo, que proporciona casos positivos de variedad mucho más limitada; y se convendrá en que el primer conjunto supone un apoyo aún menos fuerte para la ley general. De hecho, puede parecer que en el primer conjunto se realiza el mismo experimento una y otra vez y que el resultado positivo de los cien casos no puede apoyar la hipótesis con más fuerza de 1,9 que lo hacen las dos primeras contrastaciones de ese conjunto, que corroboran la constancia de la relación. Pero esta idea es errónea. Lo que se repite aquí cien veces no es literalmente el mismo experimento, porque las sucesivas ejecuciones difieren en muchos aspectos, tal como la distancia desde el aparato a la Luna, quizá la temperatura de la fuente de luz, la presión atmosférica, etc. Lo que "sigue siendo lo mismo" es simplemente un cierto conjunto de condiciones, incluyendo un ángulo fijo de incidencia y un par determinado de medios. E incluso si las primeras dos o más mediciones realizadas en estas circunstancias dieran el mismo valor para sen α/ sen β, es perfectamente posible desde el punto de vista lógico que las contrastaciones subsiguientes bajo las circunstancias especificadas den valores distintos para la relación. Por tanto, incluso aquí la repetición de contrastaciones con resultado favorable incrementa la confirmación de la hipótesis -aunque mucho menos que las con las contraciones que cubren una más amplia variedad de casos.

Recordemos que Semmelweis podía señalar una considerable variedad de hechos que apoyaban empíricamente su hipótesis final. Es frecuente que las teorías científicas vengan apoyadas por datos empíricos de asombrosa variedad. La teoría de la gravitación y del movimiento de Newton implica, por ejemplo, las leyes de la caída del péndulo simple, del movimiento de la Luna alrededor de la Tierra y de los planetas en torno al Sol, de las órbitas de los cometas y de los satélites artificiales, del movimiento de las estrellas dobles, de los fenómenos de las mareas, y muchas más. Y todos los diversos datos de la observación y la experimentación que corroboran estas leyes suponen un apoyo para la teoría de Newton.

La razón de que la diversidad del apoyo empírico sea un factor tan importante en la confirmación de una hipótesis podría venir sugerida por la siguiente consideración, que se refiere a nuestro ejemplo de las diversas contrastaciones de la ley de Snell. La hipótesis sometida a contrastación -llamémosla *S* para abreviar- se refiere a *todos* los pares de medios ópticos y afirma que, dado cualquier par, la relación en sen α / sen β tiene el mismo valor para *todos* los ángulos asociados de incidencia y de refracción. Ahora bien: cuanto más abarca un conjunto de experimentos dentro de las diversas posibilidades consideradas, tanto mayores serán las oportunidades de encontrar un caso desfavorable si *S* fuera falsa. Así, se puede decir que el primer conjunto de experimentos sirve para contrastar más específicamente una hipótesis S1 "que expresa sólo una pequeña parte de la ley de Snell" -a saber, que sen α / sen β tiene el mismo valor siempre que los medios ópticos sean el aire y el agua y α sea 30°. Por tanto, si S1 fuera verdadera y *S*, en cambio, falsa, el primer tipo de contrastación no lo descubriría nunca. De modo similar, el segundo conjunto de experimentos sirve para contrastar una hipótesis S2, que afirma más cosas que S1, pero no tanto como *S* -a saber, que sen α / sen β tiene el mismo valor para todos los ángulos α y los ángulos asociados β si los medios son el aire y el agua-. Por tanto, si S2 fuera verdadera y *S*, en cambio, falsa, un conjunto de contrastaciones del segundo tipo nunca lo mostraría. Así, pues, se puede decir que el tercer conjunto de experimentos sirve para contrastar la ley de Snell de una manera mucho más completa que los otros dos; por consiguiente, un resultado enteramente favorable de la contrastación presta a aquella ley un apoyo empírico mucho mayor,

Como ilustración adicional de la fuerza que tiene el apoyo empírico diversificado, podemos señalar que si incrementamos todavía más la diversidad de ese apoyo haciendo variar la temperatura de los medios ópticos o utilizando luz monocromática de diferentes longitudes de onda, entonces nos encontramos con que la ley de Snell, en la forma clásica en que la hemos expuesto, es de hecho falsa.

Pero ¿no habremos exagerado la importancia del apoyo empírico diversificado? Después de todo, algunos modos de aumentar la variedad pueden ser considerados insustanciales, incapaces de aumentar la confirmación de la hipótesis. Esta opinión sería acertada, por ejemplo, si en nuestro primer conjunto de contrastaciones de la ley de Snell se hubiera incrementado la variedad realizando el experimento en distintos lugares, durante diferentes fases de la Luna o por experimentadores con diferente color de ojos. Pero no sería razonable intentar introducir esas variaciones, aunque no tuviéramos ningún conocimiento, o un conocimiento muy limitado, de cuáles son los factores que verosimilmente pueden afectar los fenómenos ópticos. En la época del experimento del Puy-de-Dóme, por ejemplo, los experimentadores no tenían ideas muy definidas acerca de qué otros factores distintos de la altitud podían afectar a la longitud de la columna de mercurio del barómetro; y cuando el cuñado de Pascal y sus colaboradores realizaron el experimento de Torricelli en lo alto de la montaña y vieron que la columna de mercurio era tres pulgadas más corta de lo que era al pie de la montaña, decidieron repetir el experimento inmediatamente, cambiando las circunstancias de varias maneras. Como dice Périer en su informe:

Lo intenté, por tanto, cinco veces más, con gran cuidado, en diferentes lugares de la cima, una vez bajo techado, en la capilla que hay allí, otra vez al aire libre, otra vez en un refugio, otra vez al viento, otra vez con buen tiempo y otra vez en medio de la lluvia y la niebla que sobrevienen a veces, teniendo cuidado siempre de liberar el aire del tubo; y en todos estos ensayos encontramos que la altura del mercurio era la misma...; este resultado nos dejó completamente satisfechos

Por tanto, el considerar ciertas formas de diversificar el apoyo empírico como importantes y otras formas como insustanciales se en los supuestos de fondo que mantengamos -quizá como resultado de una investigación previa- respecto del influjo probable los factores que se trata de variar sobre el fenómeno al que la hipótesis se refiere.

Hay ocasiones en que, cuando esos supuestos de fondo se ponen de juicio y se introducen entonces variaciones experimentales que, según la opinión generalmente aceptada, carecen de importancia, se produce como resultado un descubrimiento revolucionario. Sirva como ilustración de esto el reciente derrocamiento de uno de los más importantes supuestos de fondo de la física, el principio de la paridad. Según este principio, las leyes de la naturaleza son imparciales entre la derecha y la izquierda; si es posible un cierto tipo de proceso físico (es decir, si las leyes de la naturaleza no impiden que se dé), entonces también lo sería su imagen especular, donde la derecha y la izquierda aparecen intercambiadas. En 1956 Yang y Lee, que estaban intentando explicar algunos descubrimientos desconcertantes relativos a las partículas elementales, sugirieron que en ciertos casos hay una violación del principio de paridad; y su audaz hipótesis recibió pronto una clara confirmación experimental.

A veces se puede hacer que una contrastación sea más estricta, y su resultado más importante, incrementando la precisión de los procedimientos de observación y medición. Así, la hipótesis de la identidad de las masas inercial y gravitatoria -apoyada, por ejemplo, por la igualdad de las aceleraciones en caída libre de cuerpos de diferentes constituciones químicas- ha sido reexaminada recientemente con métodos extremadamente precisos; y los resultados, que hasta ahora habían corroborado la hipótesis, han reforzado grandemente su confirmación.

2. La confirmación mediante «nuevas» implicaciones contrastadoras

Cuando con una hipótesis pretendemos explicar ciertos fenómenos observados, es claro que hemos de construirla de tal modo que esa hipótesis implique que se dan dichos fenómenos; por tanto, el hecho que se trata de explicar constituirá un testimonio confirmatorio de aquélla. Pero es altamente deseable que una hipótesis científica sea confirmada también mediante testimonios «nuevos» -mediante hechos que o bien no eran conocidos, o bien no eran tomados en consideración cuando se formuló la hipótesis. Son muchas las hipótesis y teorías de la ciencia natural que han recibido un apoyo adicional de esos «nuevos» fenómenos, con el resultado de que su confirmación se vio considerablemente fortalecida.

Citemos, como ilustración de este punto, un ejemplo que se remonta al último cuarto del siglo XIX, cuando los físicos estaban buscando regularidades en la profusión de líneas que aparecen en los espectros de emisión y absorción de los gases. En 1885 un maestro suizo de escuela, J. J. Balmer, propuso una fórmula que, en su opinión, expresaba esa regularidad para las longitudes de onda de una serie de líneas en el espectro de emisión del hidrógeno. Sobre la base de las mediciones que Angström había hecho de cuatro líneas en ese espectro, Balmer construyó la siguiente fórmula general:

$$\lambda = b\,\frac{n^2}{n^2 - 2^2}$$

Aquí, *b* es una constante, cuyo valor determinó Balmer empíricamente como 3645,6 Å, *y n* es un entero mayor que 2. Para $n = 3$, 4, 5, y 6 esta fórmula da valores que coinciden grandemente con los de las mediciones de Angstrom; pero Balmer confiaba en que también los demás valores representarían longitudes de onda de líneas que estaban aún por medir --o incluso por describir- en el espectro del hidrógeno. No sabía Balmer que en ese momento ya habían sido localizadas y medidas algunas líneas más. Por ahora, han sido descubiertas 35 líneas consecutivas en la llamada serie de Balmer del hidrógeno, y todas ellas tienen longitudes de onda que concuerdan con los valores predichos por la fórmula de Balmer.

Apenas puede chocarnos que esta sorprendente confirmación mediante «nuevos» hechos correctamente predichos mejore grandemente el crédito que estamos dispuestos a otorgar a una hipótesis. Surge aquí un problema. Supongamos por un momento que la fórmula de Balmer hubiera sido construida sólo después de haber medido cuidadosamente las 35 líneas registradas hasta ahora en la serie. Así, pues, en este caso imaginario tendríamos a nuestra disposición exactamente los mismos datos experimentales que han sido obtenidos de hecho mediante mediciones hechas en parte antes y en una parte mucho mayor después de la construcción de la fórmula. ¿Consideraríamos que la fórmula está menos confirmada en el caso imaginario que en el caso real? Puede parecer razonable contestar afirmativamente: para *cualquier* conjunto dado de datos cuantitativos, es posible construir una hipótesis que los abarque, del mismo modo que para cualquier conjunto finito de puntos es posible trazar una curva plana que los contenga a todos. Por tanto, no habría nada de sorprendente en la construcción de la fórmula de Balmer en nuestro caso imaginario. Lo que sí *es* notable, y da peso a una hipótesis, es el hecho de que se acomode a casos «nuevos»: y la hipótesis de Balmer tiene esta ventaja en el caso real, pero no en el imaginario. A esta argumentación cabría responder que incluso en el caso imaginario la hipótesis de Balmer, lejos de ser una hipótesis arbitraria destinada a acomodarse a las *35* longitudes de onda que han sido medidas, es más bien una hipótesis de extraordinaria simplicidad formal; y el hecho de que subsuma estas *35* longitudes de onda bajo una fórmula matemáticamente simple supone para ella un grado de credibilidad mucho mayor que el que se podría otorgar a una fórmula muy compleja que se adaptara a los mismos datos. Expresándonos en términos geométricos, diríamos que si un conjunto de puntos que representa el resultado de unas mediciones se puede conectar mediante una curva simple, nuestra confianza en haber descubierto una ley general subyacente será mucho mayor que si la curva fuera complicada y no mostrara ninguna regularidad perceptible. (Más adelante, dentro de este mismo capítulo, someteremos a consideración esta idea de simplicidad.) Además, desde un punto de vista lógico, la fuerza del apoyo que una hipótesis recibe de un determinado cuerpo de datos dependería tan sólo de lo que la hipótesis afirma y de cuáles fueran los datos: la cuestión de si los datos han precedido a la hipótesis o de si ha sido al revés, siendo, como es, una cuestión puramente histórica, no afectaría a la confirmación de la hipótesis. Esta última concepción está, sin duda, implícita en las teorías estadísticas de la contrastación elaboradas en épocas recientes y también en algunos análisis lógicos contemporáneos de la confirmación y de la inducción, a los que haremos breve referencia al final de este capítulo.

3. *El apoyo teórico*

El apoyo que se exige que tenga una hipótesis no tiene porqué ser todo él de carácter inductivo, empírico, que es el que hasta ahora hemos venido considerando: no tiene por qué consistir enteramente -ni siquiera en parte- en datos que corroboran las implicaciones constratadoras derivadas de aquella. El apoyo puede venir también "de arriba"; es decir, de hipótesis o teorías más amplias que implican la hipótesis dada y tienen un apoyo empírico independiente. Pensemos, como ilustración de esto, en la hipotética ley de la caída libre en la Luna, esa ley tiene un *apoyo teórico* fuerte, porque se sigue deductivamente de la teoría newtoniana de la gravitación y del movimiento (fuertemente apoyada por un cuerpo altamente diversificado de testimonios empíricos) en conjunción con la información de que el radio y la masa de la Luna equivalen a 0,272 y 0,0123 veces el radio y la masa de la Tierra y que la aceleración gravitatoria cerca de la superficie de la Tierra es de 32,2 pies por segundo cada segundo.

De modo similar, la confirmación de una hipótesis que goza ya de un apoyo inductivo se verá reforzada si, además, adquiere un apoyo deductivo desde arriba. Esto ocurría, por ejemplo, con la fórmula de Balmer. Balmer había anticipado la posibilidad de que el espectro del hidrógeno pudiera contener otras series de líneas, y que las longitudes de onda de todas las líneas pudieran ajustarse a la siguiente generalización de su fórmula:

$$\lambda = b \frac{n2}{n2 - m2}$$

Aquí, *m* es un entero positivo, y *n* es cualquier número entero mayor que *m*. Para *m* = 2, esta generalización conduce a la fórmula de Balmer; mientras que *m* = 1, 2, 3, 4,...determina nuevas series de líneas. Y además, la existencia de las series correspondientes a *m*=1, 2, 3, 4 y 5 fue establecida más tarde mediante exploración experimental de las partes infrarrojas y ultravioletas, invisibles, del espectro del hidrógeno. Así, pues, había un fuerte apoyo empírico para una hipótesis más general que implicaba la fórmula original de Balmer como un caso especial y que proporcionaba a ésta un apoyo deductivo. Y este apoyo deductivo procedente de una teoría vino en 1913, cuando Bohr mostró que la fórmula generalizada -y, por ende, también la fórmula original de Balmer- eran corolarios de su teoría del átomo de hidrógeno. Este hecho reforzó grandemente el apoyo de la fórmula de Balmer, integrándola en el contexto de las concepciones de la teoría cuántica desarrollada por Planck, Einstein y Bohr, que estaba apoyada por testimonios empíricos distintos de las mediciones espectroscópicas que apoyaban inductivamente la fórmula de Balmer.

Correlativamente, la credibilidad de una hipótesis se verá desfavorablemente afectada si entra en conflicto con hipótesis o teorías que en la época se aceptan como bien establecidas. En el *New York Medical Record* de 1877, un tal Dr. Caldwell, de Iowa, relatando una exhumación de la que asegura haber sido testigo, afirma que el cabello y la barba de un hombre que había sido enterrado con el pelo cortado y la barba afeitada habían rebosado del ataúd y salido por las rendijas. Aunque quien lo afirma es un presunto testigo presencial, hemos de rechazar este enunciado sin demasiados miramientos, porque choca con datos bien establecidos acerca de la medida en que el cabello humano continúa creciendo después de la muerte.

Nuestra anterior discusión acerca de las pretensiones de Ehrenhaft de haber establecido la existencia de cargas subelectrónicas ilustra de modo análogo el punto de que el hecho de que una hipótesis entre en conflicto con una teoría que goza de amplio apoyo habla en contra de dicha hipótesis.

El principio a que aquí nos referimos debe ser aplicado, sin embargo, con discreción y con limitaciones. De otro modo, podría ser utilizado para proteger de cualquier cataclismo a cualquier teoría aceptada: los datos adversos podrían siempre ser desechados sobre la base de que entran en conflicto con una teoría bien establecida. La ciencia, desde luego, no sigue este procedimiento; no tiene ningún interés en defender ciertas concepciones mimadas en contra de todos los testimonios adversos posibles. Más bien aspira a constituir un cuerpo comprensivo de conocimiento empírico correcto, y está, por tanto, dispuesta a abandonar o a modificar cualquier hipótesis previamente aceptada. Pero los datos que nos hagan abandonar una teoría bien establecida han de tener peso; y los resultados experimentales adversos, en particular, han de ser repetibles. Incluso, aunque se haya visto que una teoría fuerte y útil entra en conflicto con un «efecto» reproducible experimentalmente, podemos, sin embargo, continuar usándola en contextos en que no se espera que provoque dificultades. Por ejemplo, cuando Einstein propuso la teoría de los cuantos de luz para dar cuenta de fenómenos tales como el efecto fotoeléctrico, señaló que en lo que se refiere a la reflexión, refracción y polarización de la luz, es probable que la teoría ondulatoria electromagnética nunca llegue a ser reemplazada. Y de hecho todavía se utiliza en este contexto. Una teoría de gran escala, con éxitos en muchos campos, normalmente sólo será abandonada cuando se disponga de una teoría alternativa más satisfactoria. Y no es fácil llegar a buenas teorías.

La simplicidad

Otro factor que interviene en la aceptabilidad de una hipótesis es su simplicidad en comparación con la de las hipótesis alternativas tratan de dar cuenta de los mismos fenómenos. Ilustremos este punto esquemáticamente. Supongamos que la investigación de sistemas físicos de un cierto tipo (Cefeidas, resortes metálicos elásticos, líquidos viscosos o cualquier otra cosa) nos sugiere que una cierta característica cuantitativa, v, de esos sistemas pudiera ser una función de -y estar, en consecuencia, determinada únicamente por- otra característica, u (del mismo modo que el período de un péndulo es una función de su longitud). Intentamos, por tanto, construir una hipótesis que exprese la forma matemática -exacta de la función. Hemos podido comprobar muchos casos en los que u tiene uno de los valores 0, 1, 2 ó 3; se vio que los valores asociados de v eran regularmente 2, 3, 4 y 5, respectivamente. Supongamos, además, que no tenemos ningún conocimiento previo de base que pueda orientarnos sobre la posible forma de la conexión funcional, y que, sobre la base de nuestros datos, se han propuesto las tres hipótesis siguientes:

H1: v = u4 - 6u3 + 11u2 - 5u + 2
H2: v = u5 - 4u4 - u3 + 16u2 - 11u + 2.
H3: v = u+2

Todas ellas concuerdan con los datos: a cada uno de los cuatro valores u examinados le asigna exactamente el valor v, que, según se ha visto, está asociado con aquél. En términos geométricos: si se representan las tres hipótesis en un sistema plano de coordenadas, entonces cada una de las curvas resultantes contiene los cuatro puntos que representan los datos (0,2), (1,3), (2,4) y (3,5).

Sin embargo, si, como hemos supuesto, no dispusiéramos de una información previa de base que nos indicara otra elección, no dudaríamos en inclinarnos a favor de H3 más bien que hacia H1, y H2, dado que es una hipótesis más simple que sus rivales. Esta consideración sugiere que si dos hipótesis concuerdan con los mismos datos y no difieren en otros aspectos que sean relevantes para su confirmación, entonces la más simple se considerará como la más aceptable.

La relevancia de esta misma idea en relación, no ya con hipótesis, sino con teorías enteras, puede ilustrarse, como se hace a menudo, por referencia a la concepción heliocéntrica del sistema solar propuesta por Copérnico, que era considerablemente más simple que la concepción geocéntrica a la que vino a sustituir, a saber, el sistema de Ptolomeo, ingenioso y esmerado, pero «suntuosamente complicado, lleno de grandes círculos y de subcírculos, con diferentes radios, velocidades e inclinaciones, y diferentes valores y direcciones de excentricidad» .

Aunque resulta innegable que la simplicidad es altamente apreciada dentro de la ciencia, no es fácil formular criterios claros de simplicidad en el sentido relevante y justificar la preferencia dada á hipótesis y teorías más simples.

Todo criterio de simplicidad tendría que ser objetivo, desde luego; no debería apelar a la intuición o a la facilidad con que una teoría puede ser entendida o recordada, etc., porque estos factores varían de persona a persona. En el caso de hipótesis cuantitativas tomo H1, H2, H3, cabría juzgar su simplicidad a base de las correspondientes representaciones gráficas. En coordenadas rectangulares, *el* diagrama de H3 es una línea recta, mientras que los de H, y H2 *n* curvas mucho más complicadas que pasan por los cuatro puntos que representan los datos. Pero este criterio parece arbitrario. Porque si las hipótesis se representan en coordenadas polares, con *u* como ángulo polar y *v* como radio vector, entonces H3 determina una espiral, mientras que una función que determinara una «simple» línea recta sería muy complicada.

Cuando, como en nuestro ejemplo, todas las funciones se expresan mediante polinomios, el orden del polinomio puede servir como índice de complejidad; así, H2 sería más compleja que H1, que a su sería más compleja que H3. Pero sería necesario aplicar otros criterios adicionales cuando hubiese que considerar también funciones trigonométricas y de otros tipos.

En el caso de las teorías, se ha sugerido a veces el número de supuestos básicos independientes como un índice de la complejidad. Pero esos supuestos se pueden combinar y desdoblar de múltiples maneras: no hay un modo de contarlos que no sea ambiguo. Por ejemplo, el enunciado de que dados dos puntos cualesquiera hay una línea recta que los contiene se puede considerar que expresa dos supuestos en lugar de uno: que hay al menos una línea semejante, y que hay a lo sumo una. E incluso si estuviéramos de acuerdo en el cómputo, los distintos supuestos básicos podían diferir en complejidad y entonces tendrían que ser pesados más bien que contados. Observaciones similares podríamos hacer si se nos sugiriera que el número de *conceptos* básicos utilizados en una teoría podría servir como índice de su complejidad. La cuestión de los criterios de simplicidad ha sido objeto de atención en los últimos años por parte de lógicos y filósofos, y si bien se han obtenido algunos resultados interesantes, no disponemos de ninguna caracterización general satisfactoria de la simplicidad. Sin embargo, como sugieren nuestros ejemplos, hay indudablemente casos en que, incluso en ausencia de criterios explícitos, los investigadores estarían sustancialmente de acuerdo sobre cuál de dos hipótesis o teorías rivales es la más simple.

Otro problema interesante relativo a la simplicidad es el de su justificación: ¿qué razones tenemos para seguir lo que pudiéramos llamar el principio *de la simplicidad,* es decir, la máxima de que se ha de preferir, de entre dos hipótesis o teorías por lo demás igualmente confirmadas, la que sea más simple, de que esta última ha de ser considerada como la más aceptable?

Muchos grandes científicos han expresado la convicción de que las leyes básicas de la naturaleza son simples. Si se supiera esto, habría una presunción de que la más simple de dos hipótesis rivales está más cerca de ser verdadera. Pero la suposición de que las leyes básicas de la naturaleza son simples es, desde luego, al menos tan problemática como la corrección del principio de simplicidad, y, por tanto, no puede proporcionar una justificación de éste.

Algunos científicos y filósofos -entre ellos Mach, Avenarius, Ostwald y Pearson- han mantenido que la ciencia intenta dar una descripción económica, austera, del mundo, y que las hipótesis generales que intentan expresar leyes de la naturaleza son expedientes económicos del pensamiento, que sirven para resumir un número indefinido de casos particulares (por ejemplo, casos múltiples de caída libre) en una fórmula simple (por ejemplo, la ley de Galileo); Y, desde este punto de vista, parece enteramente razonable adoptar, entre varias hipótesis rivales, la más simple. Esta argumentación, resultaría convincente si tuviéramos que escoger entre diferentes *descripciones de uno y el mismo conjunto de hechos;* pero al adoptar una de entre varias hipótesis rivales, tales como *H1, H2, H3,* ya citadas, adoptamos también las *predicciones* que ella implica concernientes a casos aún no contrastados; y a este respecto, las hipótesis difieren considerablemente. Así, para $u = 4$, *H1, H2 y H3* predicen como valores *v* 150, 30 y 6, respectivamente. Ahora bien: *H3* puede tener más simple matemáticamente que sus rivales; pero, ¿qué base tenemos nosotros para considerarla más cerca de la verdad, para fundamentar nuestras expectativas concernientes al caso, todavía no examinado, u = 4 en *H3,* más bien que en una de las hipótesis rivales, que se ajusta a los datos con la misma precisión?

Reichenbach ha sugerido una respuesta interesante. Dicho brevemente, Reichenbach argumenta del siguiente modo: supongamos que en nuestro ejemplo v es también una función de u, $v = f(u)$. Sea g su representación gráfica en algún sistema de coordenadas; la elección de éste es inesencial. La función verdadera f y su representación gráfica le son, por supuesto, desconocidas al científico que los valores asociados de las dos variables. Suponiendo también sus mediciones son exactas, encontrará una serie de puntos-datos que se hallan sobre la curva «verdadera» g. Supongamos ahora de acuerdo con el principio de simplicidad, el científico traza estos puntos la curva más simple, es decir, la más fácil intuitivamente. Entonces su gráfica, llamémosla g1, puede desviarse considerablemente de la curva verdadera, aunque comparta con ella al menos los puntos que han sido medidos. Pero a medida que el científico determina más y más puntos-datos y va trazando en cada caso las gráficas más simples, *g2, g3, g4*,..., éstas coincidirán cada vez más con la curva verdadera *g, y las* funciones asociadas de *f2, f3, f4*, ... se aproximarán cada vez más a la verdadera conexión funcional *f.* Así, no se puede *garantizar* que la observancia del principio de simplicidad conduzca a la función *f* en un solo paso o incluso en muchos; pero, si hay una conexión funcional entre u y v, el procedimiento nos llevará gradualmente a una función que se aproxima a la era tanto como queramos.

La argumentación de Reichenbach, que aquí hemos presentado de forma simplificada, es ingeniosa; pero su fuerza es limitada. Porque independientemente de hasta dónde haya llegado la construcción de sucesivas gráficas y funciones, el procedimiento no nos da indicación alguna acerca de en qué medida hemos conseguido aproximarnos a la función verdadera -si es que existe una función verdadera. (Como antes hemos señalado, por ejemplo, el volumen de una masa de gas puede parecer -si bien de hecho no lo es- una función tan sólo de su temperatura.) Además, la argumentación sobre la base de la convergencia hacia la curva verdadera se podría también utilizar para justificar otros métodos, intuitivamente complejos y poco razonables, de trazar gráficas. Por ejemplo, es fácil ver que si nosotros hubiéramos de conectar siempre dos puntos-datos adyacentes cualesquiera mediante, un semicírculo cuyo diámetro es la distancia entre los puntos, las curvas resultantes convergerían finalmente hacia la curva verdadera, si la hay. Sin embargo, a pesar de esta justificación, no podemos decir que éste sea un procedimiento para formar hipótesis cuantitativas. Hay algunos otros procedimientos no simples -como, por ejemplo, conectar puntos-datos adyacentes mediante curvas en forma de horquilla cuya longitud es siempre superior a un valor mínimo especificado- que son justificables de este modo, y por medio de la argumentación de Reichenbach se puede mostrar que se autorrefutan. El interés que puede tener su idea es, pues, otro.

Popper ha defendido una opinión muy diferente. Para él, dadas dos hipótesis, la más simple es la que tiene mayor contenido empírico. Popper arguye que la hipótesis más simple puede, por tanto, ser falsada (es decir, que se puede descubrir que es falsa) más fácilmente, si es que se descubre que es falsa; y que esto tiene una importancia para la ciencia, que pretende dejar expuestas sus conjeturas a la más completa contrastación y a todas las posibilidades de falsación. El mismo resume su argumentación del modo siguiente:

Si nuestro objetivo es el conocimiento, debemos estimar más los enunciados simples que los que lo son menos, *porque aquéllos nos dicen más; porque* SU *contenido empírico es mayor, y porque se pueden contrastar mejor.*

Popper hace más explícita esta noción de grado de simplicidad como grado de falsabilidad por medio de dos criterios diferentes. Según uno de ellos, la hipótesis de que la órbita de un planeta dado es un círculo es más simple que la de que es una elipse, porque mientras la primera puede ser falsada mediante la determinación de cuatro posiciones que se vea que no yacen en una circunferencia (tres posiciones pueden siempre ser conectadas mediante una circunferencia), la falsación de la segunda hipótesis requeriría la determinación de al menos seis posiciones del planeta. En este sentido, la hipótesis más simple es aquí la más fácilmente falsable, y es también la más fuerte, porque implica lógicamente la hipótesis menos simple. Este criterio contribuye sin duda a aclarar cuál es el tipo de simplicidad que concierne a la ciencia.

Pero Popper también dice que una hipótesis es más falsable, y por ende más simple, que otra si la primera implica la segunda y tiene, en consecuencia, mayor contenido, en un sentido estrictamente deductivo. Sin embargo, no siempre el mayor contenido está ligado a la mayor simplicidad. No cabe duda de que a veces una teoría poderosa, tal como la teoría newtoniana de la gravitación y el movimiento, se considerará más simple que una vasta colección de leyes inconexas de alcance más limitado, implicadas por aquélla. Pero la clase de simplificación conseguida así por una teoría no es cuestión sólo de mayor contenido; porque si yuxtaponemos dos hipótesis sin relación alguna entre sí (por ejemplo, la ley de Hooke y la ley de Sibell), la conjunción resultante nos dice más que cualquiera de sus componentes por separado, pero no es más simple que ninguna de ellas. Además de las tres hipótesis *H1, H2, H3* que hemos visto antes, ninguna nos dice más que cualquiera de las otras; y, sin embargo, W las reputamos igualmente simples. Tampoco difieren estas tres hipótesis en punto a falsabilidad. Si son falsas, es tan fácil mostrar que lo es una como que lo es cualquiera de las otras dos, a saber, mediante un contra-ejemplo; por ejemplo, el par de datos (4,10) las haría falsas a todas.

Así, pues, si bien es cierto que todas las diversas ideas aquí estudiadas arrojan alguna luz sobre la estrategia que gobierna la aplicación del principio de simplicidad, también lo es que los problemas de encontrar una formulación precisa y una justificación unificada de éste no han sido resueltos todavía de un modo satisfactorio.

5. La probabilidad de las hipótesis

Nuestro estudio de los factores que determinan la credibilidad de las hipótesis científicas muestra que la credibilidad de una hipótesis *H* en un momento dado depende, estrictamente hablando, de las partes relevantes del conjunto de conocimientos científicos en ese momento, incluyendo todo el testimonio relevante a la hipótesis y todas las hipótesis y teorías aceptadas a la sazón que tengan algo que ver con ella; porque, como hemos visto, es por referencia a ellas como se ha de fijar la credibilidad de *H.* Estrictamente, por tanto, hablaríamos de la *credibilidad de una hipótesis relativamente a un cuerpo dado de conocimiento;* podríamos representar este último mediante una larga serie *K* de enunciados -todos los enunciados aceptados por la ciencia en ese momento-.

Y aquí surge con naturalidad la cuestión de si es posible expresar esta credibilidad en términos cuantitativos precisos, formulando una definición que, para cualquier hipótesis *H y cualquier* conjunto *K* de enunciados, determina un número *c (H, K)* que expresa el grado de credibilidad de *H* por relación a *K.* Y puesto que a menudo hablamos de las hipótesis diciendo que son más o menos probables, tendríamos un motivo adicional de extrañeza si este concepto cuantitativo no pudiera ser definido de tal modo que satisficiera todos los principios básicos de la teoría de la probabilidad. En este caso, la credibilidad de una hipótesis por relación a cualquier conjunto K sería un número real no menor que 0 y no mayor que 1; una hipótesis que es verdadera lógicamente (tal como «Mañana lloverá en Central Park o no lloverá») tendría siempre una credibilidad 1; y, finalmente, dados dos enunciados cualesquiera lógicamente incompatibles, *H1 y H2,* la credibilidad de la hipótesis de que uno u otro es verdadero sería igual a la suma de sus credibilidades: $c(H1 \text{ o } H2, K) = c(H1, K) + c(H2, K)$.

Se han propuesto varias teorías de estas probabilidades ". Parten de ciertos axiomas como los que hemos mencionado y llegan a teoremas más o menos complejos que hacen posible determinar ciertas probabilidades *en el supuesto de que haya otras que sean conocidas;* pero no ofrecen ninguna definición general de la probabilidad dé una hipótesis por relación a una información dada.

Y si queremos que la definición del concepto *c(H, K)* dé cuenta de todos los diferentes factores que hemos estudiado, entonces la tarea es muy difícil, por no decir cosa peor; porque, como vimos, no está todavía claro cómo hemos de caracterizar con precisión -aunque sea sólo expresándolos en términos numéricos- factores tales como la simplicidad de una hipótesis o la variedad de los testimonios que la apoyan.

Sin embargo, Carnap ha obtenido recientemente algunos resultados esclarecedores y de gran trascendencia. Carnap ha estudiado el problema por referencia a lenguajes modelo rigurosamente formalizados, cuya estructura lógica es considerablemente más simple que la que se requiere para los objetivos de la ciencia. Ha desarrollado un método general para definir lo que él llama el grado de confirmación para cualquier hipótesis expresada en ese lenguaje con resto a cualquier masa de información expresada en el mismo lenguaje. El concepto así definido satisface todos los principios de la teoría de la probabilidad, y, por ello, Carnap lo denomina *probabilidad lógica o inductiva* de la hipótesis por relación a la información dada.

HEMPEL, Carl G. (1987), ***Filosofía de la Ciencia Natural***, Alianza Ed., Madrid, Cap.5.

5. LAS LEYES Y SU PAPEL EN LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA

Dos requisitos básicos de las explicaciones científicas

Explicar los fenómenos del mundo físico es uno de los objetivos primarios de las ciencias naturales. Por lo demás, casi todas las investigaciones científicas que hemos citado a título de ilustraciones en los capítulos precedentes no pretendían descubrir ningún hecho concreto, sino alcanzar una comprensión explicativa; se ocupaban de cómo se contrae la fiebre puerperal, por ejemplo; de por qué la capacidad de las bombas aspirantes para elevar el agua tiene una limitación característica, de por qué la transmisión de la luz concuerda con las leyes de la óptica geométrica, etc. En este capítulo y en el siguiente examinaremos con algún detalle la naturaleza de las explicaciones científicas y la clase de comprensión que proporcionan.

Que el hombre se ha ocupado larga y persistentemente de lograr alguna comprensión de los enormemente diversos, a menudo intrincados y a veces amenazadores sucesos del mundo que le rodea lo muestran los múltiples mitos y metáforas que ha elaborado en un esfuerzo por dar cuenta de la simple existencia del mundo y de sí mismo, de la vida y la muerte, de los movimientos de los cuerpos celestes, de la secuencia regular del día y la noche, del cambio de las estaciones, del trueno y el relámpago, de la luz del sol y de la lluvia. Algunas de estas ideas explicativas están basadas en concepciones antropomórficas de las fuerzas de la naturaleza, otras invocan poderes o agentes ocultos, otras, en fin, se refieren a planes inescrutables de Dios o al destino.

Las explicaciones de este tipo pueden dar al que se Plantea los problemas la impresión de que ha alcanzado cierta comprensión; pueden resolver sus dudas y en este sentido «responden» a su pregunta. Pero, por muy satisfactorias que puedan ser psicológicamente estas respuestas, no son adecuadas para los propósitos de la ciencia, la cual, después de todo, se ocupa de desarrollar una concepción del mundo que tenga una relación clara y lógica con nuestra experiencia y sea, por tanto, susceptible de contrastación objetiva. Por esta razón, las explicaciones científicas deben cumplir dos requisitos sistemáticos, que llamaremos el requisito de relevancia explicativa y el requisito de contrastabilidad.

El astrónomo Francesco Sizi ofreció la siguiente argumentación para mostrar por qué, en contra de lo que su contemporáneo Galileo pretendía haber visto por el telescopio, no podía haber satélites girando en torno a Júpiter:

> Hay siete ventanas en la cabeza, dos orificios nasales, dos orejas, dos ojos y una boca; así en los cielos hay dos estrellas favorables, dos que no son propias, dos luminarias, y Mercurio, el único que no se decide y permanece indiferente. De lo cual, así como de muchos otros fenómenos de la naturaleza similares -los siete metales, etc..., que sería tedioso enumerar, inferimos que el número de los planetas es necesariamente siete... Además, los satélites son invisibles a simple vista, y por tanto no pueden tener influencia sobre la Tierra, Y por tanto serían inútiles, y por tanto no existen.

El defecto crucial de esta argumentación es evidente: los «hechos» que aduce, incluso sí se aceptaran sin ponerlos en cuestión, son enteramente irrelevantes para el asunto que se está discutiendo; no dan la más mínima razón por la que debamos suponer que Júpiter no tiene satélites; las pretensiones de relevancia sugeridas por palabras tales como «por tanto», «se sigue» y «necesariamente» son enteramente espúreas.

Consideremos, en cambio, la explicación física de un arco iris. Esa explicación nos muestra que el fenómeno sobreviene como resultado de la reflexión y refracción de la luz blanca del Sol en pequeñas gotas esféricas de agua tales como las que hay en las nubes. Por referencia a las leyes ópticas relevantes, este modo de dar cuenta del hecho muestra que es de esperar la aparición de un arco iris cuando quiera que una rociada o una nube de pequeñas gotas de agua es iluminada por una luz blanca fuerte situada detrás del observador. De este modo, aunque se diera el caso de que no hubiéramos visto nunca un arco iris, la información explicativa proporcionada por la física constituiría una buena base para esperar o creer que aparecerá un arco iris cuando se den las circunstancias especificadas. Nos referiremos a esta característica diciendo que la explicación física cumple el *requisito de relevancia explicativa:* la información explicativa aducida proporciona una buena base para creer que el fenómeno que se trata de explicar tuvo o tiene lugar. Ha de cumplirse esta condición para que podamos decir: «Esto lo explica. ¡En estas circunstancias era de esperar que se produjera el fenómeno en cuestión! »

Este requisito representa una condición necesaria de una explicación adecuada, pero no una condición suficiente. Por ejemplo, una gran masa de datos que indique la presencia de un corrimiento al rojo en los espectros de las galaxias distantes proporciona una base sólida para creer *que* esas galaxias se alejan de la nuestra a enormes velocidades, aunque no explique por *qué*.

Con el fin de introducir el segundo requisito básico de las explicaciones científicas, examinemos una vez más la concepción de que la atracción gravitatoria pone de manifiesto una tendencia natural afín al amor. Como antes hemos señalado, esta concepción no tiene ninguna implicación contrastadora. Por tanto, no hay ningún dato empírico que pueda confirmarla o desmentirla. Estando, como está, desprovista de contenido empírico, esta concepción no proporciona ninguna base para esperar que se produzca el fenómeno característico de la atracción gravitatoria: le falta poder explicativo objetivo. Comentarios similares podrían hacerse con respecto a las explicaciones en términos de un hado inescrutable: invocar esa idea no es alcanzar una comprensión especialmente profunda, sino abandonar todo intento de explicación. En contraste, los enunciados en los que se basa la explicación física de un arco iris tienen varias implicaciones contrastadoras; implicaciones concernientes, por ejemplo, a las condiciones en que podrá verse un arco iris en el cielo y al orden de sus colores; la aparición de un fenómeno de arco iris en la espuma de una ola que rompe en las rocas, y en la hierba cubierta de rocío, etc. Estos ejemplos ilustran una segunda condición que deben cumplir las explicaciones científicas, a la que llamaremos el *requisito de contrastabilidad: los* enunciados que constituyen una explicación científica deben ser susceptibles de contrastación empírica.

Ya se ha sugerido que, puesto que la concepción de la gravitación en términos de una afinidad universal subyacente no tiene implicaciones contrastadoras, carece de poder explicativo: no proporciona una base para esperar que se dé la gravitación universal o que la atracción gravitatoria tenga tales y tales rasgos característicos; porque si implicara esas consecuencias, bien deductivamente, bien incluso en un sentido más débil, inductivo - probabilístico, entonces sería contrastable por referencia a esas consecuencias. Como muestra este ejemplo, los dos requisitos considerados están en interrelación: una explicación propuesta que cumpla el requisito de relevancia cumple también el requisito de contrastabilidad. (La inversa es claro que no se da.)

Veamos ahora qué formas toman las explicaciones científicas y cómo cumplen estos dos requisitos básicos.

2. *La explicación nomológico-deductiva*

Volvamos una vez más al descubrimiento de Périer en el experimento del Puy-de-Dóme, el descubrimiento de que la longitud de la columna de mercurio en un barómetro de Torricelli disminuye a medida que aumenta la altitud. Las ideas de Torricelli y de Pascal sobre la presión atmosférica proporciona una explicación de este fenómeno; de modo un poco pedante, la explicación se podría desglosar como sigue:

a) Sea cual fuere él emplazamiento, la presión que la columna de mercurio que está en la parte cerrada de aparato de Torricelli ejerce sobre el mercurio de la parte inferior es igual a la presión ejercida sobre la superficie del mercurio que está en el recipiente abierto por la columna de aire que se halla encima de él.
b) Las presiones ejercidas por las columnas de mercurio y de aire son proporcionales a sus pesos; y cuanto más cortas son las columnas, tanto menores son sus pesos.
c) A medida que Périer transportaba el aparato a la cima de la montaña, la columna de aire sobre el recipiente abierto se iba haciendo más corta.
d) (Por tanto) la columna de mercurio en el recipiente cerrado se fue haciendo más corta durante el ascenso.

Así formulada, la explicación es una argumentación en el sentido de que el fenómeno que se trata de explicar, tal como aparece descrito en el enunciado *(d),* es lo que cabía esperar a la vista de los hechos explicativos citados en *(a), (b) y (c); y que,* además, *(d)* se sigue deductivamente de los enunciados explicativos. Estos últimos son de dos tipos: (a) y (b) tienen el carácter de leyes generales que expresan conexiones empíricas uniformes; (c), en cambio, describe ciertos hechos concretos. Así, pues, el acortamiento de la columna de mercurio se explica aquí mostrando que tiene lugar de acuerdo con ciertas leyes de la naturaleza, como resultado de ciertas circunstancias concretas. La explicación encaja el fenómeno que se trata de explicar en un patrón de uniformidades y muestra que era de esperar que se produjera, dadas esas leyes y dadas las circunstancias concretas pertinentes.

El fenómeno del que la explicación tiene que dar cuenta lo denominaremos de ahora en adelante *fenómeno explanandum;* al enunciado que lo describe, *enunciado explanandum.* Cuando por el contexto se puede discernir a cuál de ellos nos referimos, denominaremos a cualquiera de ellos simplemente con el nombre de *explanandum.* A los enunciados que especifican la información explicativa *-(a), (b), (c),* en nuestro ejemplo- los denominaremos *enunciados explanantes;* todos ellos formarán el *explanans.*

Consideremos, como segundo ejemplo, la explicación de una característica de la formación de imágenes por reflexión en un espejo esférico; a saber, la característica de que en general $1/u + 1/v = 2/r$, donde u y v son las distancias desde el punto objeto y desde el punto imagen hasta el espejo, y r es el radio de curvatura del espejo. En óptica geométrica, esta uniformidad se explica con la ayuda de la ley básica de reflexión en un espejo plano, tratando la reflexión de un destello de luz en cualquier punto de un espejo esférico como un caso de reflexión en un plano tangencial a la superficie esférica. La explicación resultante se puede formular como una argumentación deductiva, cuya conclusión es el enunciado *explanandum, y cuyas* premisas incluyen las leyes básicas de reflexión y de propagación rectilínea, si como el enunciado de que la superficie del espejo forma un segmento de esfera.

Una argumentación similar, cuyas premisas incluyan también la ley de reflexión en un espejo plano, ofrece una explicación de por qué la luz de una pequeña fuente de luz situada en el foco de un espejo paraboloide se refleja en un destello paralelo al eje del paraboloide (un principio que se aplica tecnológicamente en la construcción de faros de automóvil, de reflectores y de otros ingenios).

Las explicaciones hasta aquí consideradas se pueden concebir entonces como argumentaciones deductivas cuya conclusión es el enunciado *explanandum, E*, y cuyo conjunto de premisas, el *explanans*, consta de leyes generales, L1, L2,... Lr, *y de* otros enunciados, C1, C2, ... Ck, que hacen asertos acerca de hechos concretos. La forma de esas argumentaciones, que constituyen, por tanto, uno de los tipos de explicación científica, se podría representar mediante siguiente esquema:

L1, L2, ..., Lr *C1, C2, ..., Ck*	Enunciados *explanantes*
———————— *E*	Enunciados *explanandum*

A las explicaciones de este tipo se les llamará explicaciones por unción deductiva bajo leyes generales, o *explicaciones nomológico-deductivas.* (El origen del término «nomológico» está en la palabra griega «nomos», ley.) A las leyes invocadas en una explicación científica se les llamará también *leyes abarcadoras* del fenómeno *explanandum, y se* dirá que la argumentación explicativa subsume al *explanandum* bajo estas leyes.

El fenómeno *explanandum* en una explicación nomológico-deductiva puede ser un evento que tiene lugar en un determinado sitio y tiempo, tal como el resultado del experimento de Périer. 0 puede ser alguna regularidad que se encuentra en la naturaleza, tal como ciertas características del arco iris; o una uniformidad expresada por una ley empírica, tal como las leyes de Galileo o las de Kepler. Las explicaciones deductivas de esas uniformidades invocarán, entonces, leyes de alcance más amplio, tales como las leyes de reflexión y refracción, o las leyes de Newton del movimiento y de la gravitación. Como puede verse por esta utilización de la ley de Newton, las leyes empíricas se explican con frecuencia por medio de principios teóricos que se refieren a estructuras y procesos que subyacen a las uniformidades en cuestión. Volveremos a ocuparnos de estas explicaciones en el próximo capítulo.

Las explicaciones nomológico-deductivas satisfacen el requisito de relevancia explicativa en el sentido más fuerte posible: la información explicativa que proporcionan implica deductivamente el enunciado *explanandum* y ofrece, por tanto, una base lógica concluyente para esperar que se produzca el fenómeno *explanandum.* (Pronto nos encontraremos con otras explicaciones científicas que cumplen este requisito sólo en un sentido débil, inductivo.) Y cumple también el requisito de contrastabilidad, porque el *explanans* implica, entre otras cosas, que bajo las condiciones especificadas se producirá el fenómeno *explanandum.*

Algunas explicaciones científicas se ajustan muy exactamente al modelo (N-D). Esto ocurre así, particularmente, cuando se explican ciertos rasgos cuantitativos de un fenómeno mediante derivación matemática a partir de leyes generales abarcadoras, como en el caso de la reflexión en espejos esféricos y paraboloides. 0 también en el de la celebrada explicación, propuesta por Leverrier (e, independientemente, por Adams), de las irregularidades peculiares en el movimiento del planeta Urano, que, según la teoría newtoniana en uso, no se podían explicar por la atracción gravitatoria de los demás planetas conocidos entonces. Leverrier conjeturó que esas irregularidades resultaban de la atracción de un planeta exterior todavía no detectado, y calculó la posición, masa y otras características que este planeta tendría que poseer para dar cuenta con detalle cuantitativo de las irregularidades observadas. Su explicación fue asombrosamente confirmada por el descubrimiento, en el lugar predicho, de un nuevo planeta, Neptuno, que poseía las características cuantitativas que Leverrier le había atribuido. También aquí la explicación tiene la forma de una argumentación deductiva cuyas premisas incluyen leyes generales -específicamente, las leyes newtonianas de la gravitación y del movimiento-, así como enunciados que especifican diversos pormenores cuantitativos acerca del planeta perturbador.

No es infrecuente, sin embargo, que las explicaciones nomológico-deductivas se expresen en forma elíptica: omiten mencionar ciertos supuestos que están asumidos por la explicación, pero que se dan como admitidos en un determinado contexto. Esas explicaciones se expresan a veces en. la forma *«E* porque C», donde *E* es el suceso que hay que explicar y C es algún evento o algún estado de cosas antecedente o concomitante. Tomemos, por ejemplo, el enunciado: «El barro de la acera permaneció en estado líquido durante la helada porque había sido rociado con sal.» Esta explicación no menciona explícitamente ninguna ley, pero presupone tácitamente al menos una: que el punto de congelación del agua desciende cuando se disuelve sal en ella. Además, es precisamente en virtud de esta ley como el rociamiento con sal adquiere su papel explicativo, y específicamente causal, que el enunciado «porque C» le atribuye. Este enunciado, dicho sea de paso, es elíptico también en otros aspectos; por ejemplo, admite tácitamente y no hace mención de ciertos supuestos acerca de las condiciones físicas ambientes, tal como que la temperatura no desciende hasta un punto muy bajo. Y si los supuestos nómicos y de otro tipo así omitidos se añaden al enunciado de que se ha rociado el barro de sal, obtenemos las premisas de una explicación nomológico-deductiva del hecho de que el barro haya permanecido en estado líquido.

Comentarios similares son aplicables a la explicación de Semmelweis de que la fiebre puerperal estaba producida por materia animal descompuesta que se introducía en la corriente sanguínea a través de superficies abiertas por las heridas. Así formulada, la explicación no hace mención de leyes generales; pero presupone que esa contaminación de la corriente sanguínea conduce por lo general al envenenamiento de la sangre acompañado de los síntomas característicos de la fiebre puerperal, porque esto está implicado por la aserción de que la contaminación es *causa* de la fiebre puerperal. No cabe duda de que Semmelweis daba por supuesta la generalización. A Semmelweis, en efecto, la causa de la fatal enfermedad de Kolletschka no le planteó ningún problema etiológico: puesto que en su corriente sanguínea se había introducido materia infecciosa, el resultado tenía ,que ser el envenenamiento de la sangre. (Kolletschka no era, de ningún modo, el primero en morir por envenenamiento de la sangre producido al sufrir un corte con un escalpelo infectado. Y por una trágica ironía, Semmelweis mismo había de sufrir la misma suerte.) Pero una vez que se ha hecho explícita la premisa tácita, se ve que la explicación supone una referencia a leyes generales.

Como hemos visto por los ejemplos precedentes, las leyes generales correspondientes están siempre presupuestas por un enunciado explicativo, según el cual un evento concreto de un determinado tipo G (por ejemplo, la expansión de un gas a presión constante; el flujo de una corriente en una espira de alambre) tenía como *causa* un evento de otro tipo, *F* (por ejemplo, el calentamiento del gas; el movimiento de la espira a través de un campo magnético). Para llegar a ver esto no necesitarnos entrar en las complejas ramificaciones de la noción de causa; basta con señalar que la máxima «La misma causa, el mismo efecto», cuando se aplica a esos enunciados explicativos, implica una pretensión: la de que cuando se produce un evento de tipo *F,* éste viene acompañado de un evento de tipo G.

Decir que una explicación descansa en leyes generales no es lo mismo que decir que su descubrimiento requiere el descubrimiento de las leyes. La nueva comprensión crucial alcanzada mediante una explicación se apoyará a veces en el descubrimiento de algún hecho particular (por ejemplo, la presencia de algún planeta exterior no detectado; la materia infecciosa que se adhiere a las manos de los médicos que reconocen a las enfermas) que, en virtud de leyes generales aceptadas. con anterioridad, dan cuenta del fenómeno *explanandum.* En otros casos, tales como el de las líneas del espectro del hidrógeno, lo que se consigue con la explicación es la llegada al descubrimiento de una ley abarcadora (la de Balmer) y, en último término, de una teoría explicativa (tal como la de Bohr); sin embargo, en otros casos, el logro mayor de una explicación reside en mostrar que -y en mostrar exactamente cómo se puede dar cuenta del fenómeno *explanandum* por referencia a leyes y datos acerca de hechos concretos de los que ya disponemos: como ilustración de esto puede servir la derivación explicativa de las leyes de reflexión para espejos esféricos y paraboloides a partir de la ley básica de la óptica geométrica en conjunción con enunciados acerca de las características geométricas de los espejos.

Un problema explicativo no determina por sí mismo cuál es el tipo de descubrimiento que se requiere para su solución. Así, Leverrier descubrió que el movimiento del planeta Mercurio se desviaba del curso teóricamente previsto; y, como en el caso de Urano, intentó explicar esas desviaciones como resultado de la tracción gravitatoria de un planeta todavía no detectado, Vulcano, que tendría que ser un objeto muy denso y muy pequeño, situado entre el Sol y Mercurio. Pero no se encontró ese planeta, y sólo mucho más tarde se halló una explicación satisfactoria, explicación proporcionada por la teoría general de la relatividad, que dio cuenta de las irregularidades no por referencia a algún factor particular perturbador, sino por medio de un nuevo sistema de leyes.

3. Leyes universales y generalizaciones accidentales

Como hemos visto, las leyes juegan un papel esencial en las explicaciones nomológico-deductivas. Proporcionan el eslabón por razón del cual circunstancias particulares (descritas por C1, C2,..., Ck) pueden servir para explicar el hecho de que se produzca un evento dado. Y cuando el *explanandum* no es un evento particular, sino una uniformidad como la que representan las características mencionadas antes de los espejos esféricos y paraboloidales, las leyes explicativas exhiben un sistema de uniformidades más comprensivas, del cual la uniformidad dada no es sino un caso especial.

Las leyes que se requieren para las explicaciones nomológico-deductivas comparten una característica básica: son, como diremos, enunciados de forma universal. Hablando en sentido amplio, un enunciado de este tipo afirma la existencia de una conexión uniforme entre diferentes fenómenos empíricos o entre aspectos diferentes de un fenómeno empírico. Es un enunciado que dice que cuando quiera y dondequiera que se dan unas condiciones de un tipo especificado F, entonces se darán también, siempre y sin excepción, ciertas condiciones de otro tipo G. (No todas las leyes científicas son de este tipo. En las secciones que siguen encontraremos leyes de forma probabilística y explicaciones basadas en ellas.)

He aquí algunos ejemplos de enunciados de forma universal: cuando quiera que aumenta la temperatura de un gas, permaneciendo su presión constante, su volumen aumenta; siempre que un sólido se disuelve en un líquido, el punto de ebullición del líquido sube; siempre que un rayo de luz se refleja en una superficie plana, el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia; siempre que rompemos en dos una varilla de hierro magnética, las dos partes son imanes también; siempre que un cuerpo cae libremente desde una situación de reposo al vacío cerca de la superficie de la Tierra, la distancia que cubre en t segundos es de 16 t^2 pies. La mayoría de las leyes de las ciencias naturales son cuantitativas: afirman la existencia de conexiones matemáticas específicas entre diferentes características cuantitativas de los sistemas físicos (por ejemplo, entre el volumen, la temperatura y la presión de un gas) o de determinados procesos (por ejemplo, entre el tiempo y la distancia de la caída libre, en la ley de Galileo; entre el período de revolución de un planeta y su distancia media del Sol, en la tercera ley de Kepler; entre los ángulos de incidencia y de refracción, en la ley de Snell).

Estrictamente hablando, un enunciado que afirma la existencia de una conexión uniforme será considerado una ley sólo si hay razones para suponer que es, verdadero: normalmente no hablaríamos de leyes falsas de la naturaleza. Pero si se observara rígidamente este requisito, entonces los enunciados a los que comúnmente nos referimos, como la ley de Galileo y la ley de Kepler, no se considerarían leyes; porque, de acuerdo con los conocimientos físicos corrientes, sólo se cumplen de una manera aproximada; y, corno veremos, la teoría física explica por qué esto es así. Observaciones análogas podrían hacerse respecto de las leyes de la óptica geométrica. Por ejemplo, la luz no se desplaza estrictamente en líneas rectas, ni siquiera en un medio homogéneo: puede doblar esquinas. Usaremos, por tanto, la palabra «ley» con cierta liberalidad, aplicando el término a ciertos enunciados del tipo a que aquí nos referimos, enunciados de los que se sabe, sobre una base teórica, que sólo se cumplen de una manera aproximada y con ciertas cualificaciones. Volveremos sobre este punto cuando en el próximo capítulo estudiemos la explicaci6n de leyes mediante teorías.

Vimos que las leyes invocadas en las explicaciones nomológico-deductivas tienen la forma básica siguiente: «En todos los casos en que están dadas unas condiciones de tipo *F,* se dan también las condiciones de tipo G.» Pero es interesante señalar que no todos los enunciados de esta forma universal, aunque sean verdaderos, pueden considerarse leyes de la naturaleza. Por ejemplo, la oración «Todos los minerales que hay en esta caja contienen hierro» es de forma universal *(F* es la condición de ser un mineral de esta caja; G, la de contener hierro); sin embargo, aunque sea verdadero, no habría que considerarlo como una ley, sino como la aserción de algo que «de hecho es el caso», como una «generalización accidental». O bien considérese el enunciado: «Todos los cuerpos compuestos de oro puro tienen una masa menor de 100.000 kilogramos.» Sin duda, todos los objetos de oro hasta ahora examinados por el hombre se ajustan a lo que ese enunciado dice; hay, por tanto, un testimonio confirmatorio considerable, y no se conocen casos que lo refuten. Además es perfectamente posible que nunca en la historia del universo haya habido o haya en el futuro un cuerpo de oro puro con una masa de 100.000 kilogramos o más. En este caso, la generalizací6n propuesta no sólo estaría bien confirmada, sino que sería verdadera. Y, sin embargo, su verdad la consideraríamos presumiblemente como accidental, sobre la base de que no hay nada en las leyes básicas de la naturaleza tal como ésta se concibe en la ciencia contemporánea que nos haga descartar la posibilidad de que exista -o incluso de que podamos producir- un objeto de oro sólido con una masa que exceda de 100.000 kilogramos.

Así, pues, una ley científica no queda adecuadamente definida si la caracterizamos como un enunciado verdadero de forma universal: esta caracterización expresa una condición necesaria, pero no suficiente, de las leyes del tipo que aquí estamos discutiendo.

¿En qué se distinguen las leyes genuinas de las generalizaciones accidentales? Este intrincado problema ha sido intensamente discutidos en los últimos años. Pasemos revista brevemente a algunas de las principales ideas surgidas del debate, que continúa todavía. Una diferencia notable y sugestiva, señalada por Nelson Goodman, es la siguiente: una ley puede servir -mientras que una generalización accidental no- para justificar *condicionales contrafácticos,* es decir, enunciados de la forma «Si A fuera (hubiera sido) el caso, entonces *B* sería (habría sido) el caso», donde A no es (no ha sido) de hecho el caso. Así, la aserción «Si hubiéramos puesto esta vela de parafina en una caldera de agua hirviendo, se habría fundido» podría justificarse aduciendo la ley de que la parafina es líquida por encima de los 60 grados centígrados (y el hecho de que el punto de ebullición del agua son 100 grados centígrados). Pero el enunciado «Todos los minerales que hay en esta caja contienen hierro» no podría ser utilizado de modo análogo para justificar el enunciado contrafáctico «Si hubiéramos puesto este guijarro en la caja, contendría hierro». De modo semejante, una ley, en contraste con una generalización accidentalmente verdadera, puede justificar *condicionales subjuntivos,* es decir, enunciados del tipo «Si aconteciera A, entonces también acontecería *B»,* donde se deja en suspenso si A ha sucedido o no de hecho. El enunciado «Si pusiéramos esta vela de parafina en agua hirviendo, entonces se fundiría» es un ejemplo.

Estrechamente relacionada con esta diferencia hay otra, que es de especial interés para nosotros: una ley puede -mientras que una generalización accidental no- servir de base para una explicación. Así, la fusión de una vela concreta de parafina puesta en agua hirviendo se puede explicar, de acuerdo con el esquema (N-D), por referencia a los hechos concretos mencionados y a la ley de que la parafina se funde cuando su temperatura sobrepasa los 60 grados centígrados. Pero el hecho de que un mineral concreto de la caja contenga hierro no se puede explicar de una manera análoga por referencia al enunciado general de que todos los minerales que hay en las cajas contienen hierro.

Puede parecer plausible decir -como otra distinción más- que el último enunciado sirve simplemente como una formulación convenientemente abreviada de una conjunción finita de este tipo: «El mineral r1, contiene hierro, y el mineral r2 contiene hierro, ..., el mineral *r 63* contiene hierro»; mientras que la generalización acerca de la parafina se refiere a un conjunto potencialmente infinito de casos particulares, Y, por tanto, no podría ser parafraseada mediante una conjunción finita de enunciados que describen casos individuales. La distinción es sugestiva, pero exagerada. Porque, para empezar, la generalización «Todos los minerales que hay en esta caja contienen hierro» no nos dice de hecho cuántos minerales hay en la caja, ni menciona ningún mineral particular r1, r2, etc. Por tanto, el enunciado general no es lógicamente equivalente a una conjunción finita del tipo a que nos hemos referido. Para formular una conjunción apropiada, necesitamos información adicional, que se podría obtener contando y poniendo rótulos a los minerales que hay en la caja. Además, nuestra generalización «Todos los cuerpos de oro puro tienen una masa de menos de 100.000 kilogramos» no se consideraría como una ley incluso si hubiera en el mundo cuerpos de oro en número infinito. Así, pues, el criterio que estamos considerando falla por varios motivos.

Finalmente, señalemos que un enunciado de forma universal puede considerarse como una ley incluso aunque de hecho no se cumpla en ningún caso. Consideremos, a título de ejemplo, el enunciado: «En cualquier cuerpo celeste que tenga el mismo radio que la Tierra, pero dos veces su masa, la caída libre a partir del estado de reposo se ajusta a la fórmula $s = 32\, t^2$» Puede que en todo el universo no exista objeto celeste alguno que tenga ese tamaño y esa masa, y sin embargo, el enunciado tiene el carácter de una ley. Porque ese enunciado (o, mejor dicho, un enunciado muy aproximado, como en el caso de la ley de Galileo) se sigue de la teoría newtoniana de la gravitación y del movimiento en conjunción con el enunciado de que la aceleración de la caída libre sobre la Tierra es de 32 pies por segundo cada segundo; goza, por tanto, de un sólido apoyo teórico, de igual modo que la ley de caída libre sobre la Luna a que antes nos referíamos.

Dijimos que una ley puede justificar condicionales subjuntivos y condicionales contrafácticos acerca de casos potenciales, es decir, acerca de casos particulares que pueden ocurrir, o que podían haber ocurrido, pero que no han ocurrido. De manera similar, la teoría de Newton justifica nuestro enunciado general en una versión subjuntiva que sugiere que su naturaleza es parecida a la de una ley, a saber: «En cualquier cuerpo celeste que pueda existir que tenga el mismo tamaño que la Tierra, pero dos veces su volumen, la caída libre se ajustaría a la fórmula s = 32 t^2.» En cambio, la generalización acerca de los minerales no se puede parafrasear como si afirmara que cualquier mineral que pudiera haber en esta caja contendría hierro, ni tampoco, desde luego, tendría este aserto ninguna justificación teórica.

De modo similar, tampoco utilizaríamos nuestra generalización acerca de la masa de los cuerpos áureos -llamémosle *H*- para justificar enunciados tal como éste: «Dos cuerpos de oro puro cuyas masas individuales suman más de 100.000 kilogramos no se pueden fundir para formar un solo cuerpo; o, si su fusión fuera posible, entonces la masa del cuerpo resultante sería menor que 100.000 kilogramos», porque las teorías físicas y químicas básicas de la materia corrientemente aceptadas no excluyen este tipo de fusión, y no implican que haya una pérdida de masa de ese tipo. Por tanto, aunque la generalización *H* fuera verdadera, es decir, aunque no se produjera ninguna excepción, esto constituiría un simple accidente o coincidencia desde el punto de vista de la teoría corrientemente aceptada, que permite que se den excepciones a H.

Así, el que un enunciado de forma universal cuente como una ley dependerá en parte de las teorías científicas aceptadas en la época. Esto no quiere decir que las «generalizaciones empíricas» -enunciados de forma universal que están empíricamente bien confirmados, pero que no tienen una base en la teoría- no se consideren nunca como leyes: las leyes de Galileo, de Kepler y de Boyle, por ejemplo, fueron aceptadas como tales antes de que recibieran una fundamentación teórica. La relevancia de la teoría es más bien de este tipo: un enunciado de forma universal, ya esté empíricamente confirmado o no haya sido contrastado todavía, se considerará como una ley si está implicado por una teoría aceptada (a los enunciados de este tipo se les denomina con frecuencia leyes teóricas); pero incluso si estuviera empíricamente bien confirmado y fuera presumiblemente verdadero de hecho, no se consideraría como una ley si no admitiera ciertos acontecimientos hipotéticos (tales como la fusión de dos cuerpos áureos con una masa resultante de más de 100.000 kilogramos, en el caso de nuestra generalización H) que una teoría aceptada califica como aceptables.

4. *Explicaciones probabilísticas: nociones fundamentales*

No todas las explicaciones científicas se basan en leyes de forma universal. Así, el hecho de que Jim haya contraído el sarampi6n se puede explicar diciendo que la enfermedad se la contagió su hermano, que tuvo el sarampión unos días antes. Este modo dar cuenta de los hechos relaciona una vez más el evento *explanandum* con un suceso anterior, la exposición de Jim al contagio de la enfermedad; se dice que este último proporciona una explicación porque hay una conexión entre la exposición al contagio del sarampión y el hecho de contraer la enfermedad. Esta conexión no se puede expresar, sin embargo, por medio de una ley de forma universal; porque no en todos los casos de exposición al contagio se produce éste. Lo único que se puede afirmar es que las personas expuestas al contagio tienen una probabilidad muy alta de contraer la enfermedades decir, que la contraen en un tanto por ciento muy elevado de los casos. A los enunciados generales de este tipo, que pronto examinaremos más en detalle, se les llamará *leyes de forma probabilística o leyes probabilísticas,* para abreviar.

En nuestro ejemplo, entonces, el *explanans* consiste en la ley probabilística que acabamos de mencionar junto con el enunciado de que Jim estaba expuesto al contagio del sarampión. En contraste con lo que ocurre en el caso de la explicación nomológico-deductiva, estos enunciados *explanantes* no implican deductivamente el enunciado *explanandum* de que Jim contrajo el sarampión; porque en las inferencias deductivas que parten de premisas verdaderas, la conclusi6n es invariablemente verdadera, mientras que en nuestro ejemplo está claro que es posible que los enunciados *explanantes* sean verdaderos y el enunciado *explanandum,* sin embargo, falso. Diremos, en resumen, que el *explanans* implica el *explanandum* no con «certeza deductiva», sino sólo con cuasi-certeza o con un alto grado de probabilidad.

La argumentación explicativa resultante se podría esquematizar del siguiente modo:

La probabilidad de que las personas expuestas al contagio del sarampión contraigan la enfermedad es alta.

Jim estaba expuesto al contagio del sarampión.
____ (hace altamente probable)

Jim contrajo la enfermedad.

En la presentación corriente de una argumentación deductiva, tal como. la utilizada, por ejemplo, en el esquema (N-D) de arriba, la conclusión aparece separada de las premisas por una sola línea, que sirve para indicar que las premisas implican lógicamente la conclusión. La doble línea utilizada en este último esquema quiere indicar, de modo análogo, que las «premisas» (el *explanans)* hacen la «conclusión» (el enunciado *explanandum)* más o menos probable; el grado de probabilidad viene sugerido por la anotación que está entre corchetes.

A las argumentaciones de este tipo se les llamará *explicaciones probabilísticas.* Como vemos, la explicación probabilística de un determinado evento comparte ciertas características básicas con el tipo correspondiente de explicación nomológico-deductiva. En ambos casos, el evento dado se explica por referencia a otros, con los que el evento *explanandum* está conectado por medio de leyes. Pero en un caso las leyes son de forma universal; en el otro, de forma probabilística. Y mientras que una explicación deductiva muestra que, sobre la base de la información contenida en el *explanans,* el *explanandum* era de esperar con «certeza deductiva», una explicación inductiva se limita a mostrar que, sobre la base de la información contenida en el *explanans,* el *explanandum* era de esperar con un alto grado de probabilidad, y quizá con «certeza práctica»; es así como esa última argumentación cumple el requisito de relevancia explicatoria.

5. *Probabilidades estadísticas y leyes probabilísticas*

Debemos ahora considerar más de cerca los dos rasgos diferenciales de las explicaciones probabilísticas que hasta el momento hemos señalado: las leyes probabilísticas que las explicaciones de ese tipo invocan, y la naturaleza peculiar de la implicación probabilística que conecta el *explanans* con el *explanandum.*

Supongamos que de una urna que contiene muchas bolas del mismo tamaño y masa, pero no necesariamente del mismo color, se extraen bolas sucesivamente. En cada operación extraemos una bola y tomamos nota de su color. Luego devolvemos la bola a la urna, yo contenido removemos a conciencia antes de proceder a extraer siguiente bola. Este es un ejemplo de proceso o experimento aleatorio, un concepto que pronto caracterizaremos con más detalle. Llamemos al procedimiento que acabamos de describir experimento U, a cada extracción una ejecución de U y al color de la bola una determinada extracción el resultado de esa ejecución.

Si todas las bolas de la urna son blancas, entonces hay un enunciado de forma estrictamente universal que es verdadero de los resultados producidos por la ejecución de U: todas las extracciones e bolas de la urna dan como resultado una bola blanca (digamos dan el resultado B, para abreviar). Si sólo algunas de las bolas -por ejemplo, 600- son blancas, mientras que las demás -pongamos 400- son rojas, entonces hay un enunciado general de forma probabilística que es verdadero del experimento: la probabilidad de que una ejecución de U dé como resultado una bola blanca (dé un resultado B) es 0,6; en símbolos:

$$P\ (B,\ U) = 0{,}6$$

De modo similar, la probabilidad de que salga cara como resultado del experimento aleatorio M, consistente en lanzar una moneda al aire, está dada por

$$P\ (C,\ M) = 0{,}5$$

y la probabilidad de obtener un as como resultado del experimento aleatorio D de hacer rodar un dado regular es

$$P\ (A,\ D) = 1/6$$

¿Qué significan estos enunciados de probabilidad? Según una concepción familiar, a veces llamada concepción «clásica» de la probabilidad, el enunciado *(5a)* tendría que ser interpretado del siguiente modo: cada ejecución del experimento U efectúa una elección de una entre mil posibilidades básicas, o alternativas básicas, cada una de ellas representada por una de las bolas de la urna; de estas elecciones posibles, *600* son «favorables» al resultado B; y la probabilidad de extraer una bola blanca es simplemente la relación entre el número de elecciones favorables realizadas y el número de elecciones posibles, es decir, *600 / 1.000.* La interpretación clásica de los enunciados de probabilidad *(5b) y (5c)* sigue una línea parecida.

Sin embargo, esta caracterización es inadecuada; porque si antes de cada extracción las 400 bolas rojas de la. urna se colocaran encima -de las blancas, entonces en este nuevo tipo de experimento de la urna -llamémosle U´- la relación entre alternativas básicas favorables y alternativas básicas posibles seguiría siendo la misma, pero la probabilidad de extraer una bola blanca sería menor que en el experimento U en el que las bolas son completamente mezcladas antes de cada extracción. La concepción clásica obvia esta dificultad exigiendo el requisito de que las alternativas básicas a que se refiere en su definición de probabilidad sean «equiposibles» o «equiprobables» -un requisito que, presumiblemente, resulta violado en el caso del experimento U´.

Esta estipulación adicional plantea el problema de cómo definir la equiposibilidad o la equiprobabilidad. Pasaremos por alto este tema notoriamente intrincado y polémico, porque -incluso suponiendo que se pudiera caracterizar satisfactoriamente la equiprobabilidad- la concepción clásica seguiría siendo inadecuada, puesto que también se asignan probabilidades a los resultados de experimentos aleatorios con respecto a los cuales no se conoce el modo plausible de señalar alternativas básicas equiprobables. Así, con respecto al experimento aleatorio D, consistente en hacer rodar un dado regular, se puede considerar que las seis caras representan esas alternativas equiprobables; pero nosotros atribuimos probabilidades a resultados tales como sacar un as o sacar un número impar de puntos, etc., también en el caso de un dado cargado, a pesar de que en este caso no se pueden especificar resultados equiprobables básicos.

De modo similar -y esto es particularmente importante- la ciencia asigna probabilidades a los resultados de ciertos experimentos aleatorios o procesos aleatorios que se dan en la naturaleza, tales como la desintegración paulatina de los átomos de sustancias radiactivas o el paso de los átomos de un estado de energía a otro. Tampoco aquí encontramos alternativas básicas equiprobables en términos de las cuales se pueden definir y computar esas probabilidades a la manera clásica.

Con el fin de llegar a una interpretación más satisfactoria de nuestros enunciados de probabilidad, veamos cómo averiguaríamos la probabilidad de sacar un as con un dado determinado del que no se sabe que sea regular. Obviamente lo haríamos efectuando un gran número de tiradas con el dado y averiguando la *frecuencia relativa,* es decir, la proporción de aquellos casos en los que aparece un as.

Si, por ejemplo, ejecutamos *300* veces el experimento D' de tirar el dado y el as aparece en *62* casos, entonces la frecuencia relativa, *62 / 300,* se consideraría como un valor aproximado de la probabilidad p(A, D) de obtener un as con ese dado. Procedimientos análogos se utilizarían para hacer estimaciones apropiadas con el lanzamiento al aire de una moneda, con el giro de una rueda de ruleta, etc. De modo similar, las probabilidades asociadas con la desintegración radiactiva, con las transiciones entre diferentes estados de energía atómica, con los procesos genéticos, etc., se determinan averiguando las correspondientes frecuencias relativas; sin embargo, Esto se hace con frecuencia por medios muy indirectos, más bien que *contando simplemente* los eventos atómicos (o de otro tipo) que sean relevantes.

La interpretación en términos de frecuencias relativas se aplica también a enunciados de probabilidad, tales como *(5b) y (5*c), que refieren a los resultados de lanzar al aire una moneda normal (es decir, homogénea y estrictamente cilíndrica) o de tirar un dado regular (es decir, homogéneo y estrictamente cúbico): lo que le interesa al científico (o al jugador, para el caso) al hacer un enunciado probabilitario es la frecuencia relativa con la que se puede esperar un determinado resultado 0 en largas series de repeticiones de algún experimento aleatorio *R. El* recuento de alternativas básicas «equiprobables» y de aquellas alternativas de entre éstas que son «favorables» a 0 se puede considerar como un recurso heurístico para conjeturar la frecuencia relativa de 0. Y además, cuando un dado regular o una moneda normal son lanzados un gran número de veces, las diferentes caras tienden a aparecer con igual frecuencia. Esto podría esperarse sobre la base de consideraciones de simetría como las que actúan frecuentemente en la formación de hipótesis físicas, porque nuestro conocimiento empírico no da pie a que esperemos que una cara resulte más favorecida que otra. Pero, aunque estas consideraciones son muchas veces útiles desde el punto de vista heurístico, no se deben considerar como ciertas o como verdades autoevidentes: algunas suposiciones simétricas muy plausibles, tales como el principio de paridad, ha resultado que no son generalmente satisfechas en el nivel subatómico. Así, pues, las suposiciones acerca de las equiprobabilidades están siempre sujetas a corrección a la luz de los datos empíricos concernientes a las frecuencias relativas reales de los fenómenos en cuestión. Ilustran este punto las teorías estadísticas de los gases desarrolladas por Bose y Einstein y por Fermi y Dirac, respectivamente, que descansan en suposiciones diferentes concernientes a qué distribuciones de partículas son equiprobables en un espacio de fases.

Las probabilidades especificadas en las leyes probabilísticas representan, entonces, frecuencias relativas. No pueden, sin embargo, son definidas estrictamente como frecuencias relativas en largas series de repeticiones del experimento aleatorio relevante. Porque la proporción, por ejemplo, de ases obtenidos al lanzar un determinado dado cambiará, aunque sólo sea ligeramente, a medida que se amplía la serie de tiradas; e incluso el número de ases diferiría normalmente en el caso de dos series que tuvieran exactamente la misma longitud. Vemos, sin embargo, que a medida que aumenta el número de tiradas, la frecuencia relativa de cada uno de los distintos resultados tiende a cambiar cada vez menos, y ello aunque los resultados de tiradas sucesivas continúen variando de una manera irregular y prácticamente impredecible. Esto es lo que generalmente caracteriza un experimento aleatorio *R* con resultados 01, 02, ... 0n: sucesivas ejecuciones de *R* dan uno u otro de estos resultados de una manera irregular; pero las frecuencias relativas de los resultados tienden a hacerse estables a medida que aumenta el número de ejecuciones. Y las probabilidades de los resultados p (01, R), p (02, R), ..., p (0n, R), se pueden considerar como valores ideales que las frecuencias reales tienden a asumir a medida que se van haciendo cada vez más estables. Por conveniencia matemática, las probabilidades se definen a veces como los *límites* matemáticos hacia los que convergen las frecuencias relativas a medida que el número de ejecuciones se incrementa indefinidamente. Pero esta definición tiene ciertas deficiencias intelectuales, y en algunos estudios matemáticos más recientes sobre el tema, el pretendido significado empírico del concepto de probabilidad aparece caracterizado deliberadamente, y por buenas razones, de una manera más vaga por medio de la siguiente *interpretación estadística de la probabilidad:*

El enunciado

$$p(0, R) = r$$

significa que en una larga serie de ejecuciones del experimento aleatorio *R,* es casi cierto que la proporción de casos con resultado 0 se acerca a *r.*

El concepto de *probabilidad estadística,* caracterizado de este modo, se debe distinguir cuidadosamente del concepto de *probabilidad inductiva o lógica,* que examinamos en la sección 4.5. La probabilidad lógica es una relación lógica cuantitativa entre enunciados definidos; la oración

$$c(H, K) = r$$

afirma que la hipótesis *H* está apoyada, o resulta probable, hasta un grado r por el testimonio formulado en el enunciado *K*. La probabilidad estadística es una relación cuantitativa entre clases repetibles de *eventos:* una cierta clase de resultado, 0, y una cierta clase de proceso aleatorio, *R;* representa, hablando toscamente la frecuencia relativa con la que el resultado 0 tiende a darse en una larga serie de ejecuciones de *R*.

Lo que los dos conceptos tienen en común son sus características matemáticas: ambas satisfacen los principios básicos de la teoría matemática de la probabilidad:

Los valores numéricos posibles de ambas probabilidades van de 0 a 1:

$$0 \leq p\ (0, R) \leq 1$$
$$0 \leq c\ (H, K) \leq 1$$

La probabilidad de que se produzca uno de entre dos resultados mutuamente excluyentes de *R* es la suma de las probabilidades de los resultados tomados separadamente; la probabilidad, dado un testimonio K, de que se mantenga una u otra de entre dos hipótesis mutuamente excluyentes es la suma de sus probabilidades respectivas:

Si 01, 02, son mutuamente excluyentes, entonces

$$p\ (01\ \text{O}\ \ 02, R) = p(01, R) + p(02, R)$$

Si H1, H2, son hipótesis lógicamente excluyentes, entonces

$$c(H1\ o\ H2, \text{K}) = c(H1, \text{K}) + c(H2, \text{K})$$

La probabilidad de un resultado que se da necesariamente en todos los casos -tales como 0 o no 0- es1; la probabilidad, sobre la base de cualquier testimonio, de una hipótesis que es lógicamente (y en este sentido necesariamente) verdadera, tal como *H* o no *H,* es 1:

$$p\ \ (0 \text{ o no } 0, R) = 1$$
$$c\ (H \text{ o no } H, K) = 1$$

Las hipótesis científicas en forma de enunciados de probabilidad estadística pueden ser contrastadas -y lo son- examinando las frecuencias relativas a largo plazo de los resultados en cuestión; y la confirmación de esas hipótesis se estima, hablando toscamente, en función del grado de concordancia entre las probabilidades hipotéticas y las frecuencias observadas. La lógica de esas contrastaciones presenta, sin embargo, algunos problemas específicos e intrincados que exigen cuando menos algunas someras consideraciones.

Pensemos en la hipótesis *H* de que la probabilidad de obtener un as haciendo tiradas con un determinado dado es de *0,15;* o, resumiendo, que $p(A, D) = 0{,}15$ donde *D* es el experimento aleatorio consistente en tirar ese dado. La hipótesis *H* no implica deductivamente ninguna implicación contrastadora que especifique cuántos ases saldrán en una serie finita de tiradas del dado. No implica, por ejemplo que exactamente en 75 tiradas de las *500* primeras salga un as, ni tampoco que el número de ases esté entre *50 y 100,* por ejemplo. Por tanto, si la proporción de ases obtenidos en un gran número de tiradas difiriera considerablemente de *0,15,* esto no sería una refutación de *H* en el sentido en que una hipótesis de forma estrictamente universal, tal como «Todos los cisnes son blancos», puede ser refutada, en virtud de la inferencia llamada *modus tollens,* por referencia a un contraejemplo, tal como un cisne negro. De modo similar, si gran sucesión de tiradas de ese dado diera una proporción de ases y próxima a 0,15, esto no confirmaría *H* en el sentido en que una hipótesis resulta confirmada al encontrarnos con que un enunciado contrastador *I* implicado lógicamente por ella es de hecho verdadero.

Porque en este último caso, la hipótesis afirma *I* por implicación lógica, y el resultado de la contrastación es, entonces, confirmatorio en el sentido de que muestra que una determinada de lo que la hipótesis afirma es realmente verdadera; pero estrictamente hablando, los datos de la frecuencia confirmatoria no muestran nada semejante por respecto a *H;* porque *H no* afirma por implicación que la frecuencia de los ases en una larga sucesión de as se vaya a aproximar a 0,15.

Pero si bien *H* no excluye lógicamente la posibilidad de que la proporción de ases obtenidos en una gran sucesión de tiradas del dado . te considerablemente de 0,15, implica lógicamente que esas desviaciones son altamente improbables en el sentido estadístico; es decir, que si el experimento consistente en ejecutar una gran serie de tiradas (1.000 tiradas por serie, por ejemplo) se repite un gran número de veces, entonces sólo una reducida fracción de estas grandes series conducirán a una proporción de ases que difiere considerablemente de *0,15. Si* se trata de hacer tiradas con un dado, se supone normalmente que los resultados de tiradas sucesivas son «estadísticamente independientes »; esto quiere decir, hablando toscamente, que la probabilidad de obtener un as en una tirada del dado no depende del resultado de la tirada precedente. El análisis matemático muestra que, en conjunción con esta presunción de independencia, nuestra hipótesis *H* determina deductivamente la probabilidad estadística de que la proporción de ases obtenidos en n tiradas difiera de *0,15* ,en no más de una determinada cantidad. Por ejemplo, *H* implica que, dada una serie de 1.000 tiradas del dado en cuestión, hay aproximadamente una probabilidad de *0,976* de que la proporción de ases esté entre *0,125 y 0,175; y,* de modo similar, que, dada una sucesión de 10.000 tiradas, hay aproximadamente una probabilidad de *0,995* de que la proporción de ases esté entre *0,14 y 0,16.* Así, pues, podemos decir que, si *H* es verdadera, entonces es prácticamente cierto (que en una gran sucesión de ensayos la proporción de ases diferirá muy poco del valor hipotético de la probabilidad,, *0,15.* Por consiguiente, si la frecuencia, observada a largo plazo, de. un resultado no se acerca a la probabilidad que le ha sido asignada por una determinada hipótesis probabilística, entonces es muy verosímil que esta hipótesis sea falsa. En este caso los datos relativos a la frecuencia cuentan como datos que refutan la hipótesis, o al menos como datos que reducen su credibilidad; y si se encuentran testimonios refutatorios suficientemente sólidos, se considerará que la hipótesis está prácticamente -aunque no lógicamente- refutada, y será rechazada, en consecuencia. De modo similar, la estrecha coincidencia entre las probabilidades hipotéticas y las frecuencias observadas tenderá a confirmar una hipótesis probabilística y puede conducir a su aceptación.

Si las hipótesis probabilísticas han de ser aceptadas o rechazadas sobre la base del testimonio estadístico concerniente a las frecuencias observadas, entonces es necesario contar con criterios apropiados. Estos tendrán que determinar: (a) qué desviaciones de las frecuencias observadas a partir de la probabilidad enunciada por una hipótesis han de contar como base para rechazar esa hipótesis; y (b) hasta dónde tienen que coincidir las frecuencias, observadas y la probabilidad hipotética para que esa coincidencia se acepte como condición ,de la aceptación de la hipótesis. Este requisito se puede hacer más o menos estricto, y su especificación es un problema de elección. .La estrictez de los criterios escogidos variará normalmente según el contexto y los objetivos de la investigación en cuestión. Hablando en general, dependerá de la importancia que se dé, en ese determinado contexto, a la evitación de dos tipos de error que pueden cometerse: rechazar la hipótesis que se está contrastando, aunque sea verdadera, y aceptarla, aunque sea falsa. La importancia de este punto queda especialmente clara cuando la aceptación o el rechazo de la hipótesis han de servir como base para la acción práctica. Así, si la hipótesis se refiere a la probable efectividad y seguridad de una nueva vacuna, entonces la decisión acerca de su aceptación tendrá que tomar en cuenta no sólo hasta qué punto concuerdan los resultados estadísticos de la contrastación con las probabilidades especificadas por la hipótesis, sino también hasta qué punto serían serias las consecuencias de aceptar la hipótesis y actuar en consecuencia (por ejemplo, vacunando niños) cuando de hecho es falsa, y de rechazar la hipótesis y actuar en consecuencia (por ejemplo, destruyendo la vacuna y modificando o suspendiendo el proceso de su fabricación) cuando de hecho la hipótesis es verdadera. Los complejos problemas que se suscitan en este contexto constituyen el tema de la teoría de las contrastaciones y decisiones estadísticas, que se ha desarrollado en las últimas décadas sobre la base de la teoría matemática de la probabilidad y de la estadística.

Muchas leyes importantes y muchos principios teóricos de las ciencias naturales tienen carácter probabilístico, aunque a menudo son de forma más complicada que los enunciados simples de probabilidad que hemos discutido. Por ejemplo, según la teoría física corriente, la desintegración radiactiva es un fenómeno aleatorio en el que los átomos de cada elemento radiactivo poseen una probabilidad característica de desintegrarse durante un período especificado de tiempo. Las leyes probabilísticas correspondientes se formulan normalmente como enunciados que dan la «vida media» del elemento en cuestión. Así, los enunciados de que la vida media del radio es de 1.620 años y la del polonio es de 3,05 minutos son leyes en el sentido de que la probabilidad de que un átomo de radio se desintegre dentro de un plazo de 1.620 años y la probabilidad de que un átomo de polonio se desintegre dentro de un plazo de 3,05 minutos son ambas de 1/2. De acuerdo con la interpretación estadística antes citada, estas leyes implican que de un gran número de átomos de radio o de átomos de polonio dados en un cierto tiempo, la mitad, un número muy cercano a la mitad, existirá todavía 1.620 años, 3,05 minutos más tarde, habiéndose desintegrado los demás por desintegración radiactiva.

También en la teoría cinética hay varias uniformidades en la conducta de los gases, incluyendo las leyes de la termodinámica clásica, que se explican por medio de ciertos supuestos acerca de las moléculas que los constituyen; y algunos de ellos son hipótesis probabilísticas concernientes a las regularidades estadísticas en los movimientos y colisiones de estas moléculas.

Haremos ahora unas pocas observaciones adicionales relativas a la noción de ley probabilística. Podría parecer que todas las leyes científicas debieran considerarse como probabilísticas, puesto que el testimonio que las apoya es siempre un cuerpo de datos finito y lógicamente no concluyente, que sólo puede conferirles un grado más o menos alto de probabilidad. Pero esta argumentación pasa por alto el hecho de que la distinción entre leyes de forma universal y leyes de forma probabilística no se refiere a la fuerza del apoyo empírico de los dos tipos de enunciados, sino a su forma, que refleja el carácter lógico de la aserción que hacen. Una ley de forma universal es básicamente un enunciado en el sentido de que en todos los casos en que se dan unas condiciones de tipo *F,* se dan también unas condiciones de tipo G; una ley de forma probabilística afirma, básicamente, que bajo ciertas condiciones, que constituyen la ejecución de un experimento aleatorio *R,* se producirá un cierto tipo de resultado en un porcentaje especificado de casos. Con independencia de si son verdaderas o falsas, de si gozan de un apoyo sólido o de un apoyo pobre, estos dos tipos de aserciones son de naturaleza lógica diferente, y es en esta diferencia en lo que se basa nuestra distinción.

Como vimos antes, una ley de la forma universal «Siempre que *F,* entonces G» no es en absoluto un equivalente abreviado de un informe que enuncia que cada caso de *F* hasta ahora examinado llevaba asociada la presencia de G. Más bien implica aserciones también para todos los casos no examinados de *F,* tanto pasados como presentes y futuros; implica también condicionales contrafácticos e hipotéticos que se refieren, por decirlo así, a «casos posibles» de F: y es precisamente esta característica la que da a las leyes su poder explicativo. Las leyes de forma probabilística tienen un status análogo. La ley que enuncia que la desintegración radiactiva del radio es un proceso aleatorio con una vida media de 1.620 años no es evidentemente equivalente a un informe acerca de las velocidades de desintegración que se han observado en ciertas muestras de radio. Se refiere al proceso de desintegración de cualquier cuerpo de radio" -pasado, presente o futuro, e implica condicionales subjuntivos y contrafácticos, tales como: si dos masas particulares de radio' se combinaran en una, las velocidades de desintegración serían las mismas que si hubieran permanecido separadas. Es también esta característica la que da a las leyes probabilísticas su fuerza predictiva y su fuerza explicativa.

6. *El carácter inductivo de la explicación probabilística*

Uno de los tipos más simples de explicación probabilística puede ilustrarse mediante nuestro anterior ejemplo acerca de Jim, el muchacho que contraía el sarampión. La forma general de esta argumentación explicativa podría ser enunciada así:

$$\frac{\begin{array}{c} p(0, R) \text{ está próxima a } 1 \\ i \text{ es un caso de } R \end{array}}{i \text{ es un caso de } 0}$$

Ahora bien: el alto grado de probabilidad que confiere el *explanans al explanandum* no es, desde luego, una probabilidad estadística, porque caracteriza una relación entre oraciones, no entre (clases de) eventos. Utilizando un término que introdujimos en el capítulo 4, podemos decir que la probabilidad en cuestión representa la credibilidad racional del *explanandum,* dada la información proporcionada por el *explanans;* y, como antes hemos señalado, en la medida en que esta noción se puede interpretar como una probabilidad, representa una probabilidad lógica o inductiva.

En algunos casos simples, hay un modo obvio y natural de expresar esta probabilidad en términos numéricos. En una argumentación del tipo a que acabamos de referirnos si está especificado el valor numérico de p (0, *R),* entonces es razonable decir que la probabilidad inductiva que el *explanans* confiere al *explanandum* tiene el mismo valor numérico. La explicación probabilística resultante tiene esta forma:

$$\frac{\begin{array}{c} p(0, R) = \text{r} \\ i \text{ es un caso de } R \end{array}}{i \text{ es un caso de } 0} \; (r)$$

Si el *explanans* es más complejo, la determinación de las probabilidades inductivas correspondientes al *explanandum* suscita problemas difíciles, que en parte están todavía sin resolver. Pero sea o no sea posible asignar probabilidades numéricas definidas a todas esas explicaciones, las consideraciones *i* precedentes muestran que cuando se explica un evento por referencia a leyes probabilísticas, el *explanans* confiere al *explanandum* sólo un apoyo inductivo más o menos fuerte. Así, podemos distinguir las explicaciones nomológico-deductivas de las explicaciones probabilísticas diciendo que las primeras llevan a cabo una subsunción deductiva bajo leyes de forma universal, mientras que las últimas llevan a cabo una subsunción inductiva bajo leyes de forma probabilística. Se dice a veces que precisamente a causa de su carácter inductivo, una explicación probabilística no explica el que se produzca un evento, puesto que el *explanans* no excluye desde el punto de vista lógico el que se produzca. Pero el papel importante y cada vez más amplio que las leyes y las teorías probabilísticas juegan en la ciencia y en sus aplicaciones hace que sea preferible considerar las explicaciones basadas en esos principios como si fueran también explicaciones, aunque de un tipo menos riguroso que las de la forma nomológico-deductiva. Tomemos, por ejemplo, la desintegración radiactiva de una muestra de un miligramo de polonio. Supongamos que lo que queda después de 3,05 minutos tiene una masa que cae dentro del intervalo entre 0,499 y 0,501 miligramos. Este dato se puede explicar mediante la ley probabilística de desintegración del polonio porque esta ley, en combinación con los principios de la probabilidad matemática, implica deductivamente que, dado el inmenso número de átomos que hay en un miligramo de polonio, la probabilidad del resultado especificado es abrumadoramente grande, de modo que en un caso concreto se puede esperar que se produzca con «certeza práctica».

Consideremos, como otro ejemplo, la explicación ofrecida por la teoría cinética de los gases de una generalización empíricamente establecida llamada ley de difusión de Graham. La ley enuncia que a una temperatura y una presión fijas, las proporciones en que distintos gases de un recipiente escapan o se difunden a través de una fina pared porosa son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de sus pesos moleculares; así que, cuanto mayor sea la cantidad de un gas que se difunde por segundo a través de la pared, tanto más ligeras son sus moléculas. La explicación se basa en la consideración de que la masa de un determinado gas que se difunde a través de la pared por segundo será proporcional a la velocidad media de sus moléculas, y que la ley de Graham habrá sido, por tanto, explicada si se puede mostrar que las velocidades medias de las moléculas de diferentes gases puros son inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de sus pesos moleculares. Para mostrar esto, la teoría acepta ciertos supuestos en el sentido de que un gas consiste en un gran número de moléculas que se mueven al azar a diferentes velocidades que éstas cambian frecuentemente como resultado de las colisiones y que esta conducta aleatoria muestra ciertas uniformidades probabilísticas: en particular, que entre las moléculas de un determinado gas a una temperatura y una presión especificadas, diferentes velocidades se darán con probabilidades definidas -y diferentes. Estas presunciones hacen posible computar los valores probabilísticamente esperados -o, como podríamos decir para abreviar, los valores «más probables»- que las velocidades medias de diferentes gases poseerán a igual temperatura y presión. Los valores medios más probables -esto lo muestra la teoría- son, además, inversamente proporcionales a las raíces cuadradas de los pesos moleculares de los gases. Pero los índices efectivos de difusión, que se miden experimentalmente y son el tema de la ley de Graham, dependerán de los valores efectivos que las velocidades medias tienen en los enormes, pero finitos, enjambres de moléculas que constituyen la masa dada de gas. Y los valores medios efectivos están relacionados con los valores correspondientes probabilísticamente estimados o «más probables» de un modo que es básicamente análogo a la relación entre la proporción de ases que aparecen en una serie larga, pero finita, de tiradas de un determinado dado y la correspondiente probabilidad de obtener un as con ese dado. De la conclusión derivada teóricamente relativa a las estimaciones de probabilidad, se sigue sólo que a la vista del gran número de moléculas que intervienen, es sumamente probable que en cualquier tiempo dado las velocidades medias efectivas tengan valores muy próximos a sus estimaciones de probabilidad y que, por tanto, es prácticamente cierto que serán, como las últimas, inversamente proporcionales a las raíces cuadradas e sus masas moleculares, satisfaciendo entonces la ley de Graham.

Parece razonable decir que este modo de dar cuenta de las cosas proporciona una explicación, aunque «sólo» sea con un muy alto grado de probabilidad asociado, de por qué los gases muestran la uniformidad expresada por la ley de Graham; y en los textos y tratos de física, estos modos probabilísticos de rendir teóricamente cuentas son considerados. en efecto, como explicaciones.