

ARTÍCULOS

CRÍTICA, *Revista Hispanoamericana de Filosofía*
Vol. XXIX, No. 86 (agosto 1997): 3-51

EQUIVALENCIA EMPÍRICA Y SUBDETERMINACIÓN EN LAS TEORÍAS FÍSICAS

ALEJANDRO CASSINI
CONICET
Universidad de Buenos Aires

1. *Introducción*

Si dos teorías lógicamente incompatibles entre sí tienen en común todas sus predicciones acerca de hechos observables se dice que son empíricamente equivalentes. Tales teorías están subdeterminadas por la experiencia, porque cualquier observación que confirme a una de ellas confirmará también a la otra. No hay experiencia posible que sea capaz de discriminar entre ambas, por lo que nunca se podrá idear un experimento crucial que elija una y rechace a la otra. Por otra parte, para cualquier teoría bien confirmada que tengamos es en principio posible construir otra que sea empíricamente equivalente a la primera. Ante esta situación hay dos respuestas admisibles: o bien el escepticismo, según el cual no tenemos criterios adecuados para elegir una teoría; o bien el convencionalismo, según el cual toda elección de una teoría subdeterminada se realiza con base, no en la evidencia o el grado de confirmación empírica, sino en criterios no factuales de tipo pragmático, como la simplicidad o la utilidad. De acuerdo con esta última posición, las teorías empíricamente equivalentes se aceptan o

rechazan por convención. Pero como para cualquier teoría hay una alternativa empíricamente equivalente, la elección convencional se extiende en realidad a todas las teorías empíricas.

En el párrafo anterior se expresa sintéticamente la manera en que algunas posiciones epistemológicas antirrealistas, las de tipo convencionalista, han argumentado para obtener beneficios del problema de la subdeterminación empírica de las teorías. Desde los tiempos de Poincaré (1902), el problema de la geometría del espacio físico fue uno de los ámbitos preferidos para ejemplificar esta clase de subdeterminación radical entre teorías rivales. Apoyándose en Poincaré y en el holismo de Duhem (1914), Reichenbach (1928) le dió su forma clásica a este argumento a favor del convencionalismo. La existencia de teorías físicas subdeterminadas de manera radical constituye una seria dificultad para el realismo epistemológico. De darse tal situación, ello sería suficiente para mostrar que hay teorías que no pueden discriminarse empíricamente y deben aceptarse por razones convencionales. Si ello es así, no habrá razones para sostener que la teoría seleccionada mediante criterios no factuales es verdadera o más verosímil que sus rivales empíricamente equivalentes. Ésta es precisamente la conclusión que los convencionalistas clásicos sacaron respecto de la geometría física. Según ellos, no es posible afirmar que exista una geometría verdadera respecto del mundo físico; en consecuencia, ninguna teoría geométrica es o puede ser más verosímil que sus rivales. Un argumento semejante resulta aplicable a cualquier teoría física.

Aquí no analizaré todos los aspectos de la posición convencionalista,¹ ni intentaré una refutación general del

¹ El convencionalismo de Reichenbach (1928) se desarrolla con mayor detalle y refinamiento en la obra de Grünbaum (1973). Sus argumentos se discuten extensamente en Sklar (1976), pp. 88-146. Una

convencionalismo. Mi objetivo es más limitado y consiste en desactivar el posible empleo del hecho de que existen teorías empíricamente subdeterminadas como argumento en apoyo de posiciones convencionalistas o escépticas. Tampoco argumentaré directamente a favor del realismo epistemológico, sino, en todo caso, de manera indirecta. Sostendré para ello una teoría de la subdeterminación empírica que me parece compatible con una epistemología realista, pero que por sí misma no aporta razones positivas o pruebas en pro de tal posición. La idea esencial de esta teoría es la afirmación de que efectivamente existen teorías físicas subdeterminadas por la experiencia, pero que tal subdeterminación no se produce por principio, sino de manera transitoria y contingente. Por consiguiente, es posible, al menos en principio, discriminar entre estas teorías en términos de confirmación empírica, directa o indirecta. Esta conclusión nada dice acerca de la verdad o verosimilitud de la teoría seleccionada por lo que no representa un argumento que apoye al realismo. Sin embargo, sí ofrece un argumento en contra del convencionalismo, y por ello implica la eliminación de un escollo en el camino hacia la elaboración de una epistemología realista.

El desarrollo de este trabajo será el siguiente. Primero analizaré el tema del holismo en la contrastación de teorías, distinguiré tres variedades de holismo, desde una débil hasta una extrema, según sea el sistema de hipótesis que se tome como unidad de sentido empírico. Después consideraré la equivalencia empírica entre teorías, separaré la equivalencia de hecho, relativa a la evidencia observacional conocida, de la equivalencia en principio, que alcanza a toda posible evidencia observacional. Este distingo se trasladará a dos formas correspondientes de subdeterminación

crítica minuciosa de todos los aspectos del convencionalismo sobre las teorías del espacio y el tiempo se encuentra en Friedman (1983), cap. 7; y Nerlich (1994), caps. 6-9. Sobre esta última obra *cfr.* Cassini (1996).

empírica. Argumentaré, entonces, que todo caso de subdeterminación entre teorías rivales debe tratarse como si fuera de hecho y, por tanto, meramente transitoria. El punto central de la argumentación es que la equivalencia en principio de dos teorías presupone que ambas son sistemas globales completos y definitivos, y, según creo, no poseemos criterios suficientes para reconocer a esta clase de teorías. En cualquier teoría parcial, provisoria o incompleta, la clase de las consecuencias observacionales no se encuentra fijada de una vez y para siempre, sino que es susceptible de aumentar o disminuir a causa de la adición o supresión de hipótesis. Por tanto, toda equivalencia empírica entre teorías de esta clase será transitoria y relativa a un estadio del desarrollo de cada teoría.

Finalmente analizaré algunos casos de subdeterminación empírica provenientes de las teorías del espacio-tiempo (en adelante = E-T) y procuraré mostrar de qué manera se puede decidir entre estas teorías en términos de confirmación. Para ello es necesario apelar a criterios de confirmación teórica y confirmación empírica indirecta, además de los tradicionales criterios no factuales. La conclusión que esta estrategia intenta sostener es que no podemos conocer la existencia de teorías subdeterminadas por principio y, por consiguiente, debemos considerar que cualquier caso efectivo de subdeterminación es de hecho y transitorio. Además, ante estas situaciones disponemos de criterios que nos permiten afirmar que una de las teorías rivales está mejor confirmada que la otra, aunque ambas sean empíricamente equivalentes. Podemos así llegar a una decisión fundada que nos lleve a aceptar una teoría y rechazar a la otra, y evitar al mismo tiempo el escepticismo y el relativismo convencionalista.

Ciertamente, el hecho de que a veces se pueda determinar que de dos o más teorías empíricamente equivalentes

una de ellas está mejor confirmada que las restantes, no implica que tal teoría sea más verosímil que las otras. Para llegar a esta conclusión sería necesario establecer un vínculo entre confirmación (o corroboración) y verosimilitud, de modo tal que se pudiera garantizar que las teorías mejor confirmadas son también las más verosímiles. En términos de un ideal cuantitativo, el grado de confirmación de una teoría sería directamente proporcional a su grado de verosimilitud, y ambas magnitudes estarían relacionadas por una ecuación matemática simple y si es posible lineal. Como se sabe, nos encontramos muy lejos de este ideal. El vínculo confirmación-verosimilitud es uno de los problemas principales del realismo y no tiene una respuesta aceptable ni siquiera en términos cualitativos. Aquí no presupongo ninguna posición sobre este punto. La teoría de la subdeterminación transitoria que quiero defender es compatible no sólo con el realismo sino también con posiciones antirrealistas, como el empirismo constructivo, no comprometidas con elementos convencionalistas. No obstante, mi posición es incompatible con el convencionalismo en su forma radical, porque sostengo que puede haber elección de teoría mediante criterios empíricos aun en situaciones de subdeterminación.

El convencionalismo estricto representa un obstáculo para cualquier epistemología realista porque bloquea toda posibilidad de establecer una relación (comoquiera que se la conciba) entre verosimilitud y confirmación para las teorías subdeterminadas. En efecto, si la subdeterminación de teorías es de tipo radical, no hay manera de determinar en estos casos que alguna de las teorías rivales esté mejor confirmada que las demás. *A fortiori*, tampoco se podrá pretender que alguna de ellas sea la más verosímil, puesto que la mayor confirmación era el indicador de verosimilitud. En cambio, si la subdeterminación es sólo de hecho,

y hay en principio criterios empíricos para determinar que una de tales teorías está mejor confirmada, queda abierta la posibilidad de establecer de alguna manera que dicha teoría es también la más verosímil. Por supuesto, la realización de tal posibilidad depende de que se encuentre un vínculo general entre confirmación y verosimilitud, que por el momento no conocemos. Me propongo, en suma, argumentar a favor de una concepción de la subdeterminación de teorías que sea compatible con el realismo epistemológico e incompatible con el convencionalismo radical.

2. Holismo y adecuación empírica

Antes de plantear el tema de la subdeterminación empírica es conveniente detenerse a analizar las tesis del holismo y de la equivalencia empírica entre teorías, que, a veces de manera implícita, se encuentran presupuestas en la formulación misma del concepto de subdeterminación. En verdad, la tesis de la subdeterminación puede verse como una consecuencia de las dos anteriores.

Comencemos por el holismo. En sus rasgos esenciales la tesis holista se encuentra ya claramente expuesta en la obra de P. Duhem ((1914) cap. VI). Mucho más tarde, Quine ((1953), cap. II) la popularizó, con leves variantes, en los medios de lengua inglesa, por lo que habitualmente se la denomina, quizá no con entera justicia, tesis de Duhem-Quine. En su forma más general el holismo afirma que una hipótesis científica aislada no tiene sentido empírico y por tanto no admite contrastación experimental. Por sí misma carece de consecuencias observacionales. Por supuesto, hay que excluir del alcance de esta tesis a los enunciados básicos o de observación (aquellos cuya forma lógica es existencial-singular y se refieren a eventos macroscópicos u observables) que integran la base empírica de las

teorías.² Son las hipótesis generales, en especial las leyes teóricas, las que carecen de consecuencias observacionales por sí mismas. Tales hipótesis sólo tienen implicaciones fácticas cuando se les adjuntan otras hipótesis auxiliares, además de las imprescindibles condiciones iniciales y de contorno. Es el sistema total $[H + A + C]$ (donde H es la hipótesis que nos interesa estudiar, A es una conjunción finita de hipótesis auxiliares y C una conjunción similar de condiciones iniciales y de contorno) el que permite deducir predicciones empíricas. Por consiguiente, no es posible someter a contrastación experimental a una hipótesis aislada, sino a un sistema de hipótesis como un todo, en el cual habrá siempre hipótesis pertenecientes a varias teorías.³

Podemos distinguir tres versiones del holismo, según sea la naturaleza y extensión del sistema de hipótesis que se considere como unidad mínima suficiente para admitir contrastación empírica, o lo que es equivalente, unidad de sentido empírico. La primera es el *holismo débil*, para quien el sistema de hipótesis en cuestión es un subsistema de alguna teoría y/o de otras teorías auxiliares, pero en ningún caso la totalidad de estas teorías. Según este holismo moderado, las teorías científicas no son bloques indivisibles, sino que constan de partes más o menos autónomas (aunque interconectadas), cada una de las cuales se puede poner a prueba de manera independiente de las demás. La segunda versión es el *holismo fuerte*, donde el sistema de hipótesis en juego es una teoría en su totalidad

² Con la debida reserva de que no existen enunciados observacionales puros, ya que todo enunciado de observación emplea conceptos, ya de sentido común o del vocabulario técnico de las teorías científicas, que trascienden a la experiencia inmediata o lo simplemente dado.

³ Hay que advertir que en el sistema también hay enunciados observacionales, bajo la forma de condiciones iniciales y de contorno. No obstante, muchos de tales enunciados admiten contrastación por sí mismos independientemente de ese sistema global.

o un conjunto de teorías tomadas como un todo. Para esta forma de holismo las teorías son sistemas indivisibles que no pueden contrastarse por partes. Finalmente, tenemos una versión que es el *holismo extremo*, en el cual el único sistema de hipótesis contrastable o con sentido empírico es la totalidad de una ciencia o, mejor aún, la totalidad del conocimiento, incluido el saber de sentido común no científico. Es claro que entre estas tres formas de holismo hay únicamente diferencias de grado y no de naturaleza.

Tanto Duhem como Quine se refieren frecuentemente, y de una manera un tanto vaga, a los “sistemas globales de hipótesis” como unidades de contrastación experimental o de sentido empírico. Cuando es más preciso, Duhem parece adherir al holismo extremo, o cuanto menos al fuerte, ya que afirma que es “todo un conjunto teórico” el que se somete a contrastación experimental (Duhem (1914), pp. 278 y 329); e incluso llega a decir que “el único control experimental de la teoría física que no es ilógico consiste en comparar el sistema entero de la teoría física con todo el conjunto de las leyes experimentales [...]” (*Ibid.*, pp. 303–304). La metáfora organicista aplicada a las teorías, según la cual éstas no poseen partes separables, impregna cada página del trabajo de Duhem. Pero el organismo en este caso no es una teoría particular, sino la totalidad de una ciencia.

Quine, por su parte, expresa su adhesión inicial a la tesis de Duhem con manifestaciones de holismo extremo, de acuerdo con las cuales “la unidad de significado empírico es el todo de la ciencia” (Quine (1953), p. 42); o bien es “la estructura conceptual sistemática, tomada como un todo” la que se enfrenta con la experiencia (Quine (1950), p. 12). Esta última es su posición más radical, ya que dicho esquema conceptual incluye tanto a la lógica y la matemática (que así adquieren, aunque sea indirectamente, un carácter empírico) como a todo el conocimiento científico y de sen-

tido común. Más recientemente, Quine ha preferido una forma de holismo más débil, que él llama “moderado y relativo” (Quine (1981), p. 92). Es moderado porque no sostiene que la totalidad de la ciencia se encuentra involucrada en bloque en la deducción o testeo de cada predicción observacional en particular. Resulta suficiente considerar porciones más o menos amplias de hipótesis como si estuvieran dotadas de sentido empírico. Además, es relativo porque no establece una unidad mínima de sentido empírico, la cual depende de cada contexto y debe determinarse por razones pragmáticas, con la única restricción de que no puede ser un enunciado aislado. La posición de Quine se acerca a la versión débil del holismo. No obstante, hay que tener en cuenta que para él todas las ciencias están interconectadas, y que cualquier predicción empírica de una ciencia avanzada como la física presupone siempre al menos tres conjuntos de hipótesis como premisas: uno de enunciados de la lógica y la matemática, otro de enunciados propiamente físicos, y un tercero de enunciados de sentido común (Quine (1992), pp. 33–34). De modo que, por lo general, la unidad de sentido empírico será un sistema bastante amplio y heterogéneo de hipótesis científicas y no científicas, aunque nunca incluirá a la totalidad de la ciencia (Quine (1975), pp. 314–315).

Son bien conocidas las consecuencias que el holismo tiene sobre la confirmación y refutación de las teorías científicas. En pocas palabras, ninguna hipótesis en particular se puede confirmar o refutar de manera concluyente, puesto que es la totalidad del sistema que se tome como unidad de sentido empírico el que recibe el impacto epistémico de la contrastación mediante la experiencia. Muchos críticos del holismo han pensado que éste tiene la poco estimable consecuencia de que ninguna hipótesis científica es refutable en la práctica, porque frente a una experiencia adversa siempre es posible mantener una hipótesis dada modifican-

do adecuadamente otras partes del sistema global del que forma parte. Si en un sistema de hipótesis SH se deduce un enunciado básico O, que la experiencia no confirma, cualquier hipótesis Hi que pertenezca a SH se puede retener frente a una aparente refutación modificando otras hipótesis del sistema. De esta manera se obtiene un nuevo sistema SH' que contiene a Hi y no implica al enunciado O. La experiencia desfavorable para SH ya no afecta al sistema SH'. Esto se consigue introduciendo o reemplazando a voluntad algunas hipótesis en SH. El nuevo sistema SH' puede considerarse una versión modificada de SH (y no una teoría diferente) en tanto no se cambien las hipótesis fundamentales de SH. Así se restablece la adecuación empírica de todo el sistema sin abandonar Hi. La tesis holista no exige necesariamente que el nuevo sistema SH también implique al enunciado $\neg O$, transformando una refutación potencial en una confirmación; basta simplemente que no implique O para salvarlo de la refutación. En principio, cualquier hipótesis podría inmunizarse de este modo respecto de toda posible refutación empírica, y, por tanto, mantenerse a voluntad.

En lugar de modificar las hipótesis del sistema SH, otra posibilidad consiste en rechazar alguna de las condiciones iniciales o de contorno que se emplearon para deducir del sistema la consecuencia observacional O. Esto puede hacerse en los casos en que la confirmación de esos enunciados acerca de condiciones empíricas es difícil o dudosa. Por ejemplo, si hay problemas para reproducir adecuadamente esas condiciones, o si éstas involucran márgenes de precisión extremos respecto de los instrumentos de observación disponibles. En tales casos habrá incertidumbre acerca de si se han dado las condiciones requeridas. Sin embargo, es implausible rechazar este tipo de enunciados de observación cuando las condiciones a las que se refieren se pueden reproducir, observar y medir de manera satisfactoria. Sobre

todo si dichas condiciones son observables por diferentes medios o instrumentos que no presuponen la verdad de las teorías que integran el sistema SH.

El convencionalismo y muchas formas de antirrealismo se han apoyado en esta situación teórica derivada del holismo. Para un holista fuerte o extremo dicha situación es verdaderamente inevitable. Ante una aparente refutación de la teoría es necesario modificarla, pero ninguna hipótesis particular se puede identificar como falsada por los hechos. El científico es libre de decidir cuáles son las hipótesis de la teoría que quiere reemplazar y cuáles las que desea retener. Ésta no es una decisión objetiva en el sentido de que venga impuesta por los hechos. Por el contrario, tiene un componente convencional irreductible sustentado en simples motivos subjetivos de los científicos o, en el mejor de los casos, en razones pragmáticas.

Tanto Duhem como Quine se oponen explícitamente a suscribir esta conclusión radical. Sostienen que no es racional retener indefinidamente una hipótesis ante reiteradas experiencias adversas para los sistemas en los cuales está inmersa. En tal caso se impone un cambio de sistema global.⁴ Sin embargo, ambos autores mantienen un punto esencial del holismo: una hipótesis en particular sólo puede rechazarse cuando se abandona la totalidad del sistema del que forma parte. Aunque se admita que hay razones objetivas para desprenderse de una teoría, no se sigue que las haya para cada hipótesis de la teoría. En realidad, para el holista consecuente no puede haberlas, porque ello implicaría otorgar sentido empírico a hipótesis aisladas. La refutación, al igual que la confirmación, sólo afecta a sistemas globales de hipótesis, pero no a sus partes componentes por separado.

⁴ *Cfr.* Balashov (1994), pp. 608–609, para citas al respecto.

Es importante señalar que el holista no está forzado a sostener que *siempre* es factible modificar un sistema de hipótesis de manera tal que una hipótesis elegida arbitrariamente se mantenga sin cambios. Podría ocurrir, por ejemplo, que resulte imposible conseguir un sistema lógicamente consistente cuando se agregan las nuevas hipótesis que restauran su adecuación empírica. Pero el caso de una teoría maximal o saturada se presenta raramente en las ciencias fácticas, donde las teorías son casi siempre incompletas. En general, será una cuestión contingente si tal reparación del sistema es de hecho asequible. No obstante, el holista tiene que admitir que ello es en principio posible, pues, desde el punto de vista lógico nada lo impide. En la práctica este resultado favorable sólo se obtendrá en ocasiones, incluso a causa de las limitaciones creativas humanas para inventar nuevas hipótesis.

Caracterizaremos ahora el concepto de adecuación empírica que venimos utilizando. En general, se dice que una teoría es empíricamente adecuada si todas sus consecuencias observacionales son verdaderas. Esta idea se relaciona con la antigua tradición griega de salvar las apariencias (*sóztein ta phainómena*). Se trata de un concepto *fuerte* o *absoluto* de adecuación porque, como señala van Fraassen, se refiere a la totalidad de los fenómenos y no sólo a aquellos realmente observados, ni tampoco a los observados en algún momento pasado o futuro (van Fraassen (1980), p. 12). En este sentido fuerte (tan absoluto como el de verdad) una teoría empíricamente adecuada no puede dejar de serlo nunca y es, por tanto, irrefutable. Si nos atenemos a este sentido fuerte es evidente que nunca podremos saber que una teoría es empíricamente adecuada, ya que es imposible verificar todas sus consecuencias observacionales, que son infinitas, al menos potencialmente. Otra razón de ello es, como veremos más adelante, que generalmente no podemos identificar todas las consecuencias observacio-

nales de una teoría, pues, se requeriría para ello que la teoría estuviera completa y acabada. Felizmente la ciencia se compone de teorías en desarrollo, casi siempre abiertas e incompletas. Para tratar con este tipo de teorías es conveniente emplear un concepto *débil o relativo* de adecuación empírica, según el cual, una teoría es empíricamente adecuada si todas sus consecuencias observacionales que de hecho se han examinado resultaron confirmadas. Las consecuencias confirmadas serán, por supuesto, un subconjunto finito del conjunto total de consecuencias observacionales de la teoría. Éste es un concepto de adecuación relativo a un momento o estadio de la investigación científica. Las teorías empíricamente adecuadas en este sentido son provisorias y refutables. Nada garantiza que su adecuación se mantendrá en el futuro porque cualquier consecuencia observacional todavía no examinada podría resultar falsa.

La posición holista admite la posibilidad de que haya más de un sistema de hipótesis empíricamente adecuado que se refiera a los mismos fenómenos. Veamos un ejemplo simplificado en extremo. Supongamos que T sea una teoría compuesta por las hipótesis H_1 y H_2 , que implica la consecuencia observacional O, no confirmada por la experiencia. Dos grupos de científicos emprenden la tarea de modificar T para restaurar la adecuación empírica frente a la experiencia adversa. Como buenos holistas cada uno de ellos hace uso de su libertad para elegir cuál hipótesis modificar, optando por diferentes estrategias. El primer grupo decide reemplazar H_2 y consigue inventar una nueva hipótesis H_3 , que junto con H_1 conforma una nueva teoría T_1 tal que $T_1 = (H_1 + H_3)$ no implica a O ni a $\neg O$. El segundo grupo, en cambio, decide reemplazar H_1 e inventa otra hipótesis H_4 , que junto con H_2 también anula la experiencia desfavorable; de modo que obtienen la teoría T_2 tal que $T_2 = (H_2 + H_4)$ no implica a O ni a $\neg O$. La teoría T en su conjunto ha sido refutada por la experiencia, pero ahora tenemos

dos nuevas teorías, T_1 y T_2 , que son ambas empíricamente adecuadas (por lo menos en sentido relativo) y resultan compatibles con el enunciado básico $\neg O$, que de hecho se ha confirmado. No hay nada en la concepción holista que impida que esta situación se produzca, salvo limitaciones de hecho, por ejemplo, en la capacidad de inventar hipótesis. En ausencia de otras experiencias incompatibles con T_1 o con T_2 ambas teorías se encuentran en un estado de subdeterminación empírica.

3. Tipos de subdeterminación empírica

Dos o más teorías rivales están subdeterminadas cuando la experiencia no nos permite elegir una de ellas y rechazar a las otras.⁵ Esto puede ocurrir por muchas razones de hecho, por ejemplo, que no se disponga de observaciones suficientes en cantidad y variedad, o bien que no existan instrumentos de observación y medición suficientemente precisos. Estas dificultades, en principio al menos, son superables mediante el desarrollo del conocimiento y la tecnología. Si las teorías difieren en por lo menos una predicción observacional, se puede esperar (también en principio aunque no siempre en la práctica) que en algún momento sea posible contrastar esa predicción y confirmar una de las dos teorías. Sin embargo, si las teorías son empíricamente equivalentes, si hacen exactamente las mismas predicciones observacionales, parece que ninguna experiencia posible nos

⁵ En sus primeros escritos, Quine empleó el término subdeterminación con un significado diferente y mucho más general que el que aquí se utiliza. Se refería al hecho de que ningún conjunto finito de enunciados observacionales implica lógicamente a una teoría y, por consiguiente toda teoría está subdeterminada por la experiencia, ya que el conjunto de nuestros datos disponibles siempre será finito. (Quine (1950), p. XII; (1953), pp. 42 y 45.) Éste es un hecho unánimemente aceptado en la epistemología actual, y no es necesario insistir ahora sobre ello.

permitirá determinar que una está mejor confirmada que la otra. Toda experiencia confirmatoria o refutatoria confirmará o refutará a ambas teorías. Ningún descubrimiento teórico o invención técnica será pertinente para discriminar una de ellas en términos de confirmación empírica. Las teorías empíricamente equivalentes están irremisiblemente subdeterminadas por la experiencia.

La clave de esta situación se encuentra en dos hechos: que las teorías sean en verdad empíricamente equivalentes y que seamos capaces de reconocer esta equivalencia. Debemos preguntarnos entonces cómo se define la equivalencia empírica entre teorías y qué criterios existen para identificar a las teorías empíricamente equivalentes. La primera de estas preguntas es fácil de responder, pero la segunda, según trataré de probar, no admite una respuesta en términos absolutos.

Dos o más teorías son empíricamente equivalentes cuando tienen las mismas consecuencias observacionales, es decir, cuando ambas implican el mismo conjunto de enunciados de observación dadas las mismas condiciones iniciales y de contorno. Al igual que en el caso de la adecuación empírica, tenemos que distinguir un sentido débil y uno fuerte de equivalencia empírica. La equivalencia débil se da cuando dos o más teorías coinciden en las consecuencias observacionales conocidas de hecho en un momento dado. La equivalencia fuerte se da cuando tales teorías tienen en común la totalidad de las consecuencias observacionales que cada una de ellas implica. Para las teorías empíricamente equivalentes no hay experimento crucial que pueda decidir entre ellas, confirmando a una y refutando a la otra. Sin embargo, el hecho de que dos teorías sean empíricamente equivalentes nada implica respecto de la adecuación empírica de las teorías. Es posible que las predicciones de ambas no concuerden con la experiencia y se encuentren por tanto refutadas. En ese caso, el problema de la subdeterminación

es trivial, ya que no necesitamos aceptar una de ellas, sino que más bien podemos rechazarlas conjuntamente.

El concepto general de subdeterminación que acabamos de caracterizar incluye a las teorías refutadas, por lo que es conveniente introducir un sentido más restringido de subdeterminación empírica válido únicamente para teorías no refutadas. En este sentido decimos que dos teorías están subdeterminadas por la experiencia cuando ambas poseen adecuación empírica. Los dos tipos de adecuación empírica que hemos distinguido se corresponden con dos formas de subdeterminación. Si las dos teorías son empíricamente adecuadas en sentido relativo, entonces *están subdeterminadas de hecho*. Esta forma de subdeterminación se presenta cuando las teorías rivales no son empíricamente equivalentes, o bien cuando lo son en sentido débil. Es un estado meramente transitorio. En el primer caso la subdeterminación se mantendrá hasta que se encuentren los medios experimentales adecuados para contrastar las predicciones que no son comunes a las dos teorías. En el segundo caso se requerirá previamente ampliar la clase de las consecuencias observacionales conocidas hasta encontrar alguna en la que las teorías no concuerden. Si, en cambio, las dos teorías son empíricamente adecuadas en sentido absoluto, están *subdeterminadas por principio* y de manera permanente. Es obvio que esta situación sólo puede producirse si las dos teorías son empíricamente equivalentes en sentido absoluto. Tal equivalencia se sigue inmediatamente del hecho de que ambas son empíricamente adecuadas en sentido absoluto. La inversa no es cierta, ya que dos teorías podrían ser empíricamente equivalentes (en sentido absoluto o relativo) y carecer de adecuación empírica por estar ambas refutadas.⁶ Dejaremos de lado este caso, que no tiene es-

⁶ Éste es un punto que se omite con frecuencia. Algunos autores parecen suponer implícitamente que dos teorías empíricamente equi-

pecial interés epistemológico, y analizaremos por separado cada tipo de subdeterminación entre teorías empíricamente adecuadas.

Antes de comenzar este análisis resultaría conveniente recapitular los conceptos que hemos definido y especificar sus mutuas relaciones lógicas. Distinguimos un sentido débil y uno fuerte para la adecuación empírica de una teoría, así como para la equivalencia y la subdeterminación empírica entre teorías rivales. Los sentidos débiles de cada uno de estos tres conceptos son relativos al conjunto de las consecuencias observacionales de una teoría conocidas o confirmadas en un momento determinado. Los sentidos fuertes son absolutos y se refieren al conjunto total de las consecuencias observacionales de una teoría. Es obvio que todos los conceptos fuertes implican a los correspondientes conceptos débiles, pero no a la inversa. Las relaciones lógicas entre diferentes conceptos son las siguientes. 1) Si dos teorías son empíricamente equivalentes en sentido débil (ED), entonces, están subdeterminadas en sentido débil (SD); luego, es válido $ED \rightarrow SD$.⁷ 2) Si dos teorías son empíricamente equivalentes en sentido fuerte (EF), están subdeterminadas en sentido fuerte (SF); luego, $EF \rightarrow SF$. 3) Si dos teorías son empíricamente adecuadas en sentido débil (AD), entonces, están subdeterminadas en sentido débil (SD); luego, $AD \rightarrow SD$. 4) Si dos teorías son empíricamente adecuadas en sentido fuerte (AF), están subdeterminadas en sentido fuerte (SF); luego, $AF \rightarrow SF$. 5) Si

valentes son por ello empíricamente adecuadas (por ejemplo, Quine (1975), que no distingue estos dos conceptos). En realidad, la equivalencia empírica no garantiza adecuación, sino únicamente el hecho de que las dos teorías serán confirmadas o refutadas conjuntamente.

⁷ Por comodidad las expresiones aparecen resumidas e incompletas; $ED \rightarrow SD$ debe leerse como: Si las teorías T1 y T2 son ED, entonces, T1 y T2 están SD. Lo mismo sucede en todas las demás fórmulas.

dos teorías están subdeterminadas en sentido débil (SD), entonces, son empíricamente equivalentes en sentido débil (ED) o empíricamente adecuadas en sentido débil (AD), o ambas cosas a la vez; luego, $SD \rightarrow (ED \vee AD)$. 6) Si dos teorías están subdeterminadas en sentido fuerte (SF), son empíricamente equivalentes en sentido fuerte (EF) o empíricamente adecuadas en sentido fuerte (AF), o ambas cosas a la vez; luego, $SF \rightarrow (EF \vee AF)$. 7) La equivalencia empírica débil entre teorías (ED) y la adecuación empírica débil (AD) son lógicamente independientes; luego, no son válidos ni $ED \rightarrow AD$, ni $AD \rightarrow ED$. 8) Si dos teorías son empíricamente adecuadas en sentido fuerte (AF), entonces, son empíricamente equivalentes en sentido fuerte (EF); luego, $AF \rightarrow EF$ (pero no vale la converso $EF \rightarrow AF$).

La subdeterminación de hecho es una situación muy frecuente en las ciencias físicas y no plantea problemas significativos al realismo epistemológico ni favorece especialmente a las posiciones antirrealistas. Generalmente se sabe que dos teorías rivales no son empíricamente equivalentes e incluso se conocen los valores discordantes de las magnitudes observables que predice cada teoría. La subdeterminación se produce casi siempre porque las respectivas predicciones difieren cuantitativamente muy poco y resultan difíciles de discriminar experimentalmente. Toda medición de una magnitud física tiene cierto margen de error, que se estima con bastante precisión. Ahora bien, cuando este margen de error observacional es mayor o igual que la diferencia entre los valores de una magnitud predichos por cada teoría, las dos teorías en conflicto quedan por el momento subdeterminadas por la experiencia hasta tanto se descubran técnicas de observación y medición más precisas.

Un excelente ejemplo histórico de esta situación nos lo proporciona el problema de la paralaje estelar en las teorías de Tolomeo y Copérnico. A veces se ha sostenido erróneamente que los dos sistemas del mundo son empíricamente

equivalentes (por ejemplo, Reichenbach (1928), pp. 217–218), pero en verdad no lo son en absoluto. El sistema copernicano predice la existencia de un determinado ángulo de paralaje estelar para un observador terrestre; este ángulo es variable y depende de la posición de la Tierra en su órbita y de la distancia a cada estrella. Por su parte, el sistema tolemaico predice que tal ángulo es constante e igual a cero, o sea, que no hay paralaje estelar. Este fenómeno es el desplazamiento aparente en la posición de las estrellas cercanas respecto de la esfera de las estrellas lejanas que forman el fondo estelar. La causa de este desplazamiento es el movimiento anual de la tierra alrededor del Sol, dado que la línea que une la visual de un observador terrestre con una estrella cercana no permanece paralela a sí misma mientras la Tierra recorre su órbita. Desde dos puntos extremos de la órbita terrestre las líneas de la visual formarán un pequeño ángulo que en principio es medible por el cambio aparente en la posición de la estrella. El sistema tolemaico, por el contrario, no admite ángulo de paralaje estelar, porque si la Tierra está fija, la línea visual de un observador respecto de una estrella será la misma en cualquier momento del año y, por consiguiente, no habrá desplazamiento aparente de las estrellas cercanas. El sistema tolemaico y el copernicano sólo son observacionalmente equivalentes (y de manera aproximada) para computar las posiciones y movimientos relativos de los planetas entre sí, pero dejan de serlo cuando se toma como referencial a la esfera estelar.

Tycho Brahe tuvo plena conciencia de la diferencia en las predicciones empíricas de cada sistema del mundo y buscó afanosamente medir el ángulo de paralaje estelar, sabiendo que si lo encontraba confirmaría la hipótesis copernicana del movimiento terrestre. No lo encontró, ni podía hacerlo, por dos razones. La primera es que las estrellas más cercanas se encuentran a una distancia muchísimo mayor

que la supuesta por Copérnico y sus seguidores,⁸ con lo cual el ángulo de paralaje (que es inversamente proporcional a la distancia de la estrella que se considere como cercana) resulta más pequeño que el buscado. La segunda razón radica en el instrumental disponible, pues, el margen mínimo de error era entonces de un minuto de arco, mientras que según nuestras mediciones la paralaje de la estrella más cercana es de una fracción de segundo de arco (0.76 seg. para *Proxima Centauri*; *cfr.* Smith (1995), p. 360). Los intentos de medición de este minúsculo ángulo forman un capítulo fascinante de la historia de la astronomía. De hecho la paralaje estelar se midió por primera vez en la década de 1830, gracias al empleo de nuevos instrumentos de medición como el micrómetro reticular y el heliómetro (*cfr.* Pannekoek (1951), pp. 334 y ss.; pp. 342–343). Al confirmarse luego la existencia de otros ángulos de paralaje en diversas estrellas, la subdeterminación empírica entre los dos sistemas desapareció, y el modelo copernicano obtuvo apoyo empírico directo.

Otro ejemplo más actual es el de la contrastación experimental de la relatividad general y de otras teorías de la gravitación alternativas a la de Einstein. Éste es un problema que no se halla completamente resuelto y no me detendré demasiado en él. Existen numerosas teorías métricas de la gravitación que rivalizan con la einsteniana, como la teoría escalar-tensorial de C. Brans y R. Dicke, o la teoría bimétrica de N. Rosen. Tales teorías no son empíricamente equivalentes, pero sus predicciones difieren cuantitativamente muy poco respecto de fenómenos como la desviación de la luz en campos gravitatorios, la precesión del perihe-

⁸ Recordemos que tanto para los antiguos o medievales como para Copérnico el universo era finito, pero las distancias estelares muy diferentes. Para la tradición greco-árabe el radio del universo era de alrededor de veinte mil radios terrestres, mientras que para los copernicanos esa distancia se elevaba a un millón y medio de radios terrestres.

lio de Mercurio o los efectos asociados con las ondas de gravitación. Muchos de estos efectos físicos son extremadamente débiles y el margen de error de las mediciones resulta relativamente grande respecto de los valores medidos. Por esta razón, más de una teoría concuerda con cada experimento dentro del margen de error que brindan los instrumentos disponibles. Además, algunas teorías poseen parámetros variables que pueden ajustarse de acuerdo con los valores observados. La mayoría de los físicos considera que la relatividad general está mejor confirmada que sus rivales (*cf.* Will (1993)), pero todos admiten que todavía son necesarios nuevos experimentos con instrumentos de mayor precisión. La subdeterminación de hecho entre las diferentes teorías de la gravitación no está superada, porque las teorías alternativas a la de Einstein no se encuentran claramente refutadas. En este punto, los científicos suelen invocar la mayor simplicidad de la relatividad general como criterio determinante para la elección de esta teoría (por ejemplo, *cf.* Schutz (1990), p. 197).

Los dos ejemplos que hemos expuesto presentan rasgos comunes. En general cuando los hombres de ciencia saben que diversas teorías rivales no son empíricamente equivalentes no aceptan los criterios no factuales (la simplicidad, la belleza) como árbitros definitivos de la elección de una teoría. Por el contrario, se esfuerzan por construir instrumentos más precisos y por diseñar nuevas pruebas experimentales que permitan eliminar la subdeterminación empírica entre las diferentes teorías. En los dos casos que hemos considerado la situación de subdeterminación transitoria sirvió como estímulo a la investigación experimental y al desarrollo de nuevos instrumentos de medición. Esto es particularmente claro respecto de la relatividad general, que en los tiempos de Einstein se aceptó sobre bases observacionales bastante débiles (como el experimento del eclipse de Eddington, que tenía un gran margen de error, entre

el diez y el veinte por ciento, que experimentos posteriores del mismo tipo no lograron mejorar). Nuevos instrumentos y nuevos tipos de pruebas de la relatividad general se idearon a partir de la década de 1960, y consiguieron reducir hasta diez veces el margen de error en las mediciones (*cfr.* Will (1989) y (1993), cap. 4). Actualmente, tanto la paralaje estelar de estrellas cada vez más lejanas como la desviación de la luz en campos gravitatorios continúan observándose mediante satélites o telescopios espaciales.

Volvamos ahora al punto de vista puramente teórico. Hay buenas razones para pensar que la subdeterminación que pueda presentarse en situaciones científicas concretas y en casos históricos reales es siempre de tipo débil y transitorio. Por consiguiente, la equivalencia empírica entre teorías, que implica subdeterminación, debería considerarse como meramente de hecho y relativa a un contexto y tiempo determinados. La principal razón que apoya esta actitud es que no sabemos, ni podemos saber, que dos teorías son empíricamente equivalentes en principio. Laudan y Leplin (1991) han sostenido que no podemos conocer tal equivalencia por el simple hecho de que nunca podremos identificar a la totalidad de las consecuencias observacionales de una teoría. Su argumento se apoya en tres premisas que por sí mismas tienen amplio consenso en la epistemología actual. La primera es la “variabilidad del dominio de lo observable”; la segunda es la inevitabilidad de las hipótesis auxiliares necesarias para realizar predicciones observacionales; y la tercera es la falibilidad de las hipótesis científicas (Laudan y Leplin (1991), pp. 451–452). De acuerdo con la primera premisa, es un hecho que el conjunto de las entidades consideradas observables cambia a medida que se desarrolla el conocimiento y la tecnología de los instrumentos de observación y medición. Las células y los genes alguna vez se tuvieron por inobservables pero hoy son objeto de observaciones de rutina en los laboratorios.

La segunda premisa admite un holismo moderado que nos obliga a emplear hipótesis y teorías auxiliares para deducir consecuencias observacionales. La última premisa postula un falibilismo que nos compromete con la idea de que las hipótesis son derrotables y pueden ser reemplazadas o modificadas. A partir de estas premisas se impone la conclusión de que las consecuencias observacionales de una teoría son variables y no están fijadas de una vez y para siempre. Más aún, no es previsible de qué manera cambiará el conjunto de las consecuencias observacionales de una teoría dada, ya que esta clase podría incrementarse empleando hipótesis auxiliares todavía no inventadas. El argumento de Laudan y Leplin me parece esencialmente correcto para cualquier teoría incompleta o programa de investigación en desarrollo. En estos casos no podemos identificar el conjunto total de predicciones empíricas de una teoría y, por tanto, nunca estamos en condiciones de afirmar que la equivalencia empírica entre diferentes teorías tiene un carácter absoluto.

Hofer y Rosenberg (1994) replicaron al argumento anterior que la subdeterminación empírica en principio es la que se produce entre “teorías globales o ciencia total”, es decir, teorías que además de ser empíricamente equivalentes han alcanzado un estado de completitud (Hofer y Rosenberg (1994), pp. 592 y 594). En esta clase de teorías no puede haber diferencias observacionales generadas por la adición de hipótesis auxiliares externas. Tal extensión se encuentra excluida por principio en las teorías globales. También está excluida la posibilidad de suprimir o modificar las hipótesis ya existentes, puesto que el sistema global debe ser completo y definitivo. Tampoco admite el error observacional en la determinación de las condiciones iniciales o de contorno. Únicamente en estas teorías globales el conjunto de las consecuencias observacionales se encuentra completamente fijado, por lo que si dos de

estas teorías son empíricamente equivalentes deben serlo en sentido absoluto. En algún sistema de este tipo pensaban de un modo menos preciso otros partidarios de la subdeterminación como Quine (1975) cuando se refería a “sistemas del mundo empíricamente equivalentes”, o van Fraassen (1980) cuando respondía a la objeción basada en la posible extensión de las teorías adicionando hipótesis auxiliares (pp. 50 y ss.). El problema con esta estrategia es que sus defensores no ofrecen criterio alguno para reconocer que estamos en presencia de uno de tales sistemas del mundo, puesto que ninguna teoría científica actualmente vigente parece reunir todos los requisitos necesarios.

Intentemos precisar las condiciones que deben cumplirse para afirmar que dos teorías están subdeterminadas por principio. Ante todo, es necesario que las dos teorías sean genuinamente rivales y no dos formulaciones diferentes de la misma teoría. i) La primera condición es, entonces, que las teorías no sean lógicamente equivalentes. Esto implica que no pueden admitirse como rivales de una teoría dada a las teorías “parásitas” que se obtengan por cualquier forma de reescritura de la primera. Aquí se incluyen estratagemas tales como el intercambio de términos teóricos entre las dos teorías, la reformulación por medio de la oración de Ramsey o el método de Craig, y la introducción de predicados del tipo de los de Goodman (reemplazando “verde” por “verzul”, por ejemplo). En todos estos casos obtenemos reformulaciones de la misma teoría (o de una formulación determinada de esa teoría) que resultan lógicamente equivalentes a ésta cuando se reinterpretan sus términos predicativos.⁹ También debemos descartar como rival genuino

⁹ Quine (1975), pp. 319 y ss.) ha analizado detenidamente esta condición poniendo en evidencia el hecho de que puede ser muy difícil descubrir que una formulación de una teoría es lógicamente equivalente a otra, que aparenta ser una teoría muy diferente. La distinción entre teoría y formulaciones de la teoría se puede establecer, siguiendo a

a una mera lista de enunciados observacionales, porque no constituye una teoría. ii) La segunda condición es que las teorías sean empíricamente equivalentes en sentido fuerte. Como ya indicamos antes, para que esta condición se satisfaga es necesario que las teorías en cuestión sean sistemas globales, completos y definitivos. iii) Finalmente se requiere que las teorías sean empíricamente adecuadas en sentido absoluto.

La última es la condición más fuerte de todas, pero si no se cumple no estaremos ante una situación de subdeterminación por principio. Si dos teorías empíricamente equivalentes no poseen adecuación empírica, la situación no plantea ningún dilema epistemológico porque no tenemos que elegir una de ellas, ya que por el momento las dos se encuentran refutadas. En todo caso, podemos tomar la decisión de modificar una o la otra para restaurar la adecuación empírica; pero también podemos rechazar ambas y ponernos a construir una teoría nueva mejor. Por otra parte, si las dos teorías son sólo empíricamente adecuadas en sentido débil, compatibles con todas las observaciones hechas hasta ahora, no se puede inferir que estén subdeterminadas por principio. Lo único que podemos concluir es que están subdeterminadas transitoriamente. La equivalencia empírica absoluta entre ambas teorías implica que frente a una experiencia desfavorable las dos perderán su adecuación empírica. Es perfectamente concebible que ésa sea la situación en algún momento futuro.

En suma, la subdeterminación empírica epistemológicamente perniciosa sólo puede darse entre teorías rivales empíricamente equivalentes que sean globales (completas y definitivas) y posean una adecuación empírica absoluta. Se trata de condiciones extremadamente fuertes. Nadie osaría

Quine, de la siguiente manera: una teoría es la clase de equivalencia de todas las formulaciones de la teoría.

sostener que alguna teoría científica actual tiene estas características. No hay argumento *a priori* que demuestre la imposibilidad de esta clase de teorías, pero de hecho nadie dudaría en afirmar que son altamente improbables.

El argumento más contundente contra esta forma de subdeterminación es que si ocurriera, no tendríamos manera de reconocerla. Simplemente no tenemos criterios para identificar una teoría global, completa y empíricamente adecuada. La adecuación empírica absoluta de una teoría es un ideal tan inalcanzable como la verdad absoluta, porque ningún número finito de consecuencias observacionales verificadas resulta suficiente para justificar la pretensión de que estamos frente a una teoría verdadera. Lo mismo ocurre respecto de la adecuación empírica, por lo que nunca podemos saber que una teoría es empíricamente adecuada (el propio van Fraassen lo reconoce, (1980), p. 69). Todo lo que podemos afirmar es la adecuación empírica provisoria de la teoría. Por otra parte, las teorías globales son incompatibles con una concepción falibilista de la ciencia, según la cual toda teoría es provisoria y revisable. Una teoría global completa y definitiva nos compromete con una suerte de infalibilismo. A lo sumo, la completitud es un ideal regulativo, como la verdad o la adecuación empírica absoluta, pero no una posesión reconocible. A los partidarios de la subdeterminación empírica radical les corresponde la carga de la prueba, esto es, la responsabilidad de ofrecer algún criterio suficiente para identificar teorías globales y empíricamente adecuadas. De otro modo, este tipo de subdeterminación absoluta entre teorías será una mera posibilidad lógica cuya actualización es inverificable de hecho.

4. *Las teorías del espacio-tiempo*

Las teorías del E-T siempre proporcionan ejemplos paradigmáticos de teorías empíricamente equivalentes y cons-

tituyen uno de los refugios más seguros de las posiciones convencionalistas. La razón fundamental de ello es que el E-T, en caso de que exista realmente, parece ser una entidad inobservable por principio. La estructura geométrica del E-T no admite examen directo por ninguna forma de experiencia. Por consiguiente, cualquier teoría geométrica acerca de las propiedades del E-T carece por sí misma de consecuencias observacionales; es una teoría puramente matemática, es decir, un formalismo sin significado físico. Se convierte en una teoría física cuando se le agregan diversas hipótesis acerca del comportamiento de los instrumentos para medir duraciones temporales y distancias espaciales (relojes, barras rígidas, rayos de luz y ondas electromagnéticas);¹⁰ así como reglas de correspondencia que conectan los resultados de las mediciones físicas con propiedades espacio-temporales. Se requieren, además, ciertas hipótesis físicas más generales, que establecen, por ejemplo, qué tipos de fuerzas y campos existen en el mundo físico. Una teoría acerca del E-T físico es siempre un sistema muy amplio de hipótesis geométricas y físicas, y sólo este sistema global adquiere contenido empírico y puede someterse a contrastación experimental.

En las teorías del E-T se da una típica situación holista semejante a las que ya analizamos respecto de las teorías empíricas en general. Hay, sin embargo, una diferencia importante. En el caso de las teorías del E-T podemos identificar un subsistema de hipótesis, la parte geométrica del sistema total, del cual sabemos *a priori* que no tiene contenido empírico. Por consiguiente, todo el contenido empírico del sistema recae en las hipótesis físicas (inclu-

¹⁰ La porción de teoría involucrada puede ser muy grande. Por ejemplo, si el tiempo se mide con relojes atómicos, como de hecho se hace actualmente, se presupone la mecánica cuántica; y si las distancias espaciales se miden mediante ondas de radar, se emplea la relatividad especial.

yendo aquí las reglas de correspondencia). Para este sistema físico valen todas las consecuencias del holismo que ya hemos indicado. Pero en una geometría física la libertad de elección que permite el holismo alcanza también a la parte puramente geométrica del sistema. Supongamos que disponemos de una teoría del E-T, llamémosla T_1 , formada por un conjunto de hipótesis geométricas G_1 y un conjunto de hipótesis físicas F_1 ; ante una experiencia de mediciones desfavorable para T_1 podemos elegir modificar F_1 , G_1 o ambas. Como resultado de estrategias diferentes podría ocurrir que se obtuvieran dos nuevas teorías, $T_2 = (F_1 + G_2)$ y $T_3 = (F_2 + G_1)$, ambas empíricamente adecuadas. Ya sabemos que no hay manera de decidir experimentalmente entre las geometrías G_1 y G_2 si no es en el contexto de un sistema físico-geométrico más amplio, T_1 o T_2 . Pero tales sistemas están subdeterminados por la experiencia. ¿Hay alguna manera de probar que esta subdeterminación es de principio y no de hecho? Evidentemente no, si se aceptan todos los argumentos antes expuestos. Lo único que está subdeterminado por principio es la parte geométrica pura, ya que todas las geometrías son empíricamente equivalentes en el sentido trivial de que carecen de consecuencias observacionales. Pero no puede decirse lo mismo del sistema global de geometría física. La única forma de establecer la subdeterminación por principio de estos sistemas consiste en probar que la parte física de cada uno de ellos se compone de teorías completas y empíricamente equivalentes. No hace falta insistir sobre lo improbable que es esta posibilidad.

Consideremos más de cerca el problema de la observación. Es evidente que para establecer la equivalencia empírica entre teorías se necesita un criterio más o menos preciso que permita discriminar las entidades observables (objetos, propiedades, eventos, procesos). Sólo así podremos determinar el contenido empírico de una teoría dada.

La tesis de la variabilidad del ámbito de lo observable intentaba mostrar que la equivalencia empírica entre teorías es siempre relativa al estado del conocimiento y la tecnología en un momento histórico particular. La teoría atómico-molecular de la materia se consideró altamente especulativa en el siglo XIX, pero actualmente se halla apoyada por numerosas observaciones que no eran técnicamente posibles en el siglo pasado. El conjunto de las consecuencias observacionales de la teoría se incrementó notablemente gracias al desarrollo de los instrumentos. Los científicos emplean hoy un concepto muy amplio de observación, según el cual, observable es toda entidad acerca de la cual es posible obtener información confiable (*cf.* Shapere (1982) y Brown (1987)). La posición y la energía de un electrón son, por ejemplo, magnitudes observables porque se pueden medir, registrar y amplificar con márgenes de error y distorsión razonables. Desde este punto de vista, cualquier partícula elemental es observable, aunque no haya sido observada de hecho. Es evidente que se trata de un concepto relativo de observación: la clase de las entidades observables se incrementa a medida que se desarrollan los instrumentos que permiten obtener información confiable. Esto presupone progresos tanto tecnológicos como teóricos.

El E-T parece ser una entidad inobservable por principio y no meramente de hecho. Tal inobservabilidad es intrínseca, es decir, no es relativa al estado actual del conocimiento o de la tecnología de los instrumentos de observación, sino ocasionada por la naturaleza misma de esa entidad. La inobservabilidad del E-T depende de sus propiedades geométricas, más precisamente, de sus simetrías internas. G. Nerlich ha sostenido la tesis audaz de que el espacio en general es observable en principio, ya que un espacio extremadamente curvo podría tener efectos directamente perceptibles, como la presión o deformación que un cuerpo experimentaría al atravesar las regiones de

elevada curvatura.¹¹ Sea como fuere, no obstante es cierto que cualquier E–T homogéneo e isótropo (como el espacio euclídeo, el E–T newtoniano, o el E–T de Minkowski) es inobservable en principio por el hecho de poseer este tipo de simetrías.¹² Lo mismo vale a escala local para los espacios de Riemann en tanto son localmente homogéneos e isótropos, o sea, aproximables por un espacio plano. A esta categoría pertenece también el E–T semirriemanniano de la relatividad general (excluyendo las singularidades). Por consiguiente, el E–T físico de nuestro universo resulta inobservable por principio a escala local para cualquiera de las teorías vigentes, sean clásicas o relativistas. Otra manera, quizá más discutible o menos clara, de expresar la inobservabilidad del E–T consiste en decir que el E–T es causalmente inerte y no admite interacción con entidades físicas. Puesto que toda observación o medición es una especie de interacción física entre el observador y/o el instrumento y el objeto observado, el E–T resulta entonces una entidad inobservable por principio. La premisa débil de este último argumento es que no toda observación requiere una interacción causal con el objeto observado, como lo muestran las mediciones de sistemas cuánticos sin interacción, en las que se realizan auténticas observaciones negativas.

La estructura geométrica del E–T no es objeto de experiencia, sino que se infiere de la observación de ciertos fenómenos físicos mediante diversas hipótesis físicas auxiliares. En las teorías corrientes del E–T estos fenómenos físicos son *eventos*, más precisamente coincidencias

¹¹ *Cfr.* Nerlich (1994), pp. 36 y ss.; y también Nerlich (1994a), pp. 169 y ss. El argumento y los ejemplos de Nerlich son discutibles, pero no los analizaré aquí.

¹² Esto es, simetrías respecto de cualquier traslación o rotación, respectivamente. Sobre el concepto de simetría en general y las simetrías espacio-temporales en especial *cfr.* Rosen (1995), sobre todo el cap. 4.

espacio-temporales de eventos, tales como la coincidencia de la emisión o recepción de un pulso de luz con determinada configuración del cuadrante de un reloj. También son observables las *líneas de mundo*, que pueden concebirse como procesos o encadenamientos de eventos. Para cada observador en el E-T sólo son observables los eventos que ocurren en su entorno inmediato, así como las líneas de mundo cercanas a su propia línea de mundo. La observación es, pues, estrictamente local. En un instante dado se reduce a un único evento en la línea de mundo del observador, mientras que en un determinado intervalo temporal se extiende sólo a los eventos ocurridos dentro del cono de luz pasado del observador. Por supuesto, el tipo de procesos o eventos físicos que se tomen como observables presentará la misma variabilidad que ya mencionamos respecto de los objetos físicos en general. La emisión de un pulso de luz y la línea de mundo de un rayo de luz son directamente perceptibles, pero también podrían considerarse como observables el evento que consiste en la colisión de dos protones, o la línea de mundo constituida por la trayectoria de un electrón en un campo magnético. Es simplemente una cuestión de utilidad cuáles eventos o procesos físicos se elijan como los observables apropiados para las mediciones correlacionadas con la estructura geométrica del E-T. Actualmente se emplean relojes atómicos para la medición de tiempos, y junto con éstos, radares para la medición de distancias, porque se los considera los instrumentos más precisos y confiables a la luz de las teorías vigentes (la mecánica cuántica y la relatividad especial, respectivamente) (*cfr.* Ellis y Williams (1988), pp. 40 y ss.). Aquí los eventos observables son la emisión y recepción de ondas de radio, que, sin embargo, no son directamente perceptibles.

El aspecto esencial de la cuestión es que cualquier medición de las propiedades geométricas del E-T es indirecta y

se refiere directamente sólo a eventos y procesos físicos observables. De allí que cualquier conclusión que se obtenga acerca de la estructura del E-T en sí mismo estará mediada por un complicado sistema de hipótesis físicas acerca del comportamiento de los observables que se utilicen para realizar las mediciones. Se abre así la posibilidad cierta de que determinados cambios en la teoría física produzcan también cambios en la interpretación geométrica de las mediciones realizadas. Mediante modificaciones apropiadas en las hipótesis físicas de un sistema de geometría física, dos geometrías diferentes pueden hacerse compatibles con las mismas experiencias.

Veamos un ejemplo concreto que se debe a K. Thorne ((1994), pp. 397 y ss.) relativo a la explicación del comportamiento de los agujeros negros. Frente a un fenómeno de esta clase disponemos de dos teorías empíricamente equivalentes que postulan diferentes estructuras métricas para el E-T. Ambas son compatibles con cualquier medición que pudiera realizarse en el entorno de un agujero negro. Supongamos que tales mediciones muestran que el horizonte de un agujero negro sin rotación es una circunferencia de 100 km. de perímetro. Si trazamos otra circunferencia de 200 km. de perímetro alrededor de la primera, las mediciones indicarán que la distancia entre ambas circunferencias es de 37 km. Este resultado es incompatible con la geometría euclídea, que predice una distancia aproximada de 16 km. (radio mayor = $200 / 2\pi$, menos radio menor = $100 / 2\pi$). Sin embargo, no se sigue de ello que la geometría del E-T sea no euclídea en el entorno del agujero negro. Tenemos dos maneras de explicar estos resultados experimentales. La primera, adoptada por la relatividad general, supone que el E-T es curvo en el entorno del agujero negro, y que no existen en esa región fuerzas que alteren los instrumentos de medición (encogiendo las reglas, retardando los relojes y las ondas electromagnéticas). La segunda

explicación, de tipo newtoniano, sostiene que el E-T es plano pero que en el entorno del agujero negro hay un fuerte campo gravitatorio que distorsiona los objetos físicos que se aproximan a él. Las reglas de medición, por ejemplo, se encogen cuando se las orienta radialmente, y la contracción de su longitud es tanto mayor cuanto más se acercan al centro común de ambas circunferencias. La presencia de esta fuerza, generada por la gran concentración de masa-energía en el interior del agujero negro, explica la discrepancia de los fenómenos respecto de la geometría euclídea como una apariencia debida a la contracción de las reglas. Para otras formas de medición, como la que emplea relojes y ondas de radar, hay una explicación similar en términos del retraso de los relojes y las ondas electromagnéticas en un campo gravitatorio.

Tenemos aquí dos teorías empíricamente equivalentes que emplean diferentes hipótesis teóricas, tanto físicas como geométricas. La situación es esencialmente la misma que habían imaginado los convencionalistas como Poincaré (1902) y Reichenbach (1928) para sostener la tesis de que no existe una verdadera geometría del E-T y que ésta se elige por convención.¹³ El punto central es que en estas circunstancias la geometría del E-T queda efectivamente subdeterminada por la experiencia. No podemos decir cuál es la distancia *real* entre las dos circunferencias: si 37 km. como predice la geometría no euclídea incorporada en la relatividad general, o 16 km., como implica la geometría euclídea. Sólo podemos afirmar que la distancia *aparente* es de 37 km., pero este fenómeno admite tanto una explicación en términos de E-T plano como curvo, según las hipótesis físicas que se adopten. Los mismos fenómenos

¹³ El ejemplo de Thorne tiene la ventaja de no postular la existencia de fuerzas universales ficticias o de existencia no comprobada, como hacían Poincaré y Reichenbach.

que confirman la existencia de una curvatura del E–T en una región vecina al agujero negro, confirman también la presencia de un campo gravitatorio en esa región. La elección entre ambos sistemas de geometría física sostienen los convencionalistas, sólo puede hacerse de acuerdo con criterios de simplicidad y utilidad, es decir, convencionalmente.

En general, es posible construir teorías empíricamente equivalentes de una manera bastante trivial. Basta para ello reemplazar en una teoría una magnitud X , denotada por un término teórico, por otras dos magnitudes arbitrarias A y B , especificando que $X = A + B$ y que A y B nunca son nulas. Si conservamos sin cambios el resto de la teoría, obtendremos dos teorías que son empíricamente equivalentes. Podemos repetir esta operación indefinidamente. En el contexto de las teorías del E–T, esta forma trivial de construir teorías empíricamente equivalentes consiste en general en cambiar la estructura métrica de una teoría dada, introduciendo a la vez un campo de fuerzas que compensa exactamente los resultados divergentes de la nueva métrica, de modo tal que se reproduzcan todas las consecuencias observacionales de la métrica original. Así, si una teoría de E–T tiene un modelo de la forma $\langle M, g \rangle$, donde M es una variedad diferenciable (generalmente igual a \mathbb{R}^4) y g es el objeto geométrico que especifica la estructura métrica (generalmente un tensor métrico); la nueva teoría tendrá un modelo de la forma $\langle M, h + F \rangle$, el cual se obtendrá reemplazando g por la métrica arbitraria h e introduciendo el campo de fuerzas F , de modo que g sea igual a $h + F$. Así, mientras que en la primera teoría se postulaba que los cuerpos libres (no sujetos a otras fuerzas) se mueven siguiendo las geodésicas de g , en la nueva se postula que dichos cuerpos se moverán sobre las geodésicas de $h + F$. El campo de fuerzas F tendrá la característica de introducir una fuerza de tipo universal, es decir, que afecta a todos los cuerpos por igual, incluyendo a las reglas rígidas, a los

relojes, a las señales electromagnéticas y a todo instrumento de medición. De esta manera los resultados de cualquier experiencia de medición que confirmen a la métrica g confirmarán también a la métrica $h+F$. Por tanto, no se podrá decidir empíricamente entre estas dos teorías del E-T (suponiendo que todas las restantes hipótesis físicas auxiliares sean comunes a ambas teorías).

5. *Respuestas al problema de la subdeterminación*

Hay muchos otros ejemplos de teorías del E-T que son empíricamente equivalentes, y, por consiguiente, observacionalmente indistinguibles. La situación se presenta no sólo con las propiedades métricas del E-T, que son las que hemos considerado aquí, sino especialmente con las propiedades topológicas, que conciernen a la estructura global del E-T. Las limitaciones de cualquier observador terrestre para la recepción de información proveniente de fuentes lejanas limita las posibilidades de elección entre teorías globales aunque no sean empíricamente equivalentes.¹⁴ Por las razones que señalamos antes, no podemos saber que la equivalencia y la subdeterminación de teorías es de principio, por lo cual la actitud más racional es considerarlas como de hecho. Sin embargo, esto no resuelve el problema de la elección de una teoría en particular. Aunque transitorio, el estado de subdeterminación entre teorías rivales puede durar mucho tiempo, sin que se vislumbre una resolución empírica del conflicto en un futuro cercano. ¿Qué se debería hacer mientras tanto respecto de estas teorías?

Generalmente se ha supuesto que es necesario elegir una de ellas y que en ausencia de criterios empíricos hay que apelar a criterios no factuales como la simplicidad, la utilidad y la belleza. El comportamiento de los científicos ante

¹⁴ *Cfr.* los trabajos de Glymour y de Malament en Earman, Glymour y Stachel (1977).

estos casos no siempre se adecua a esta norma. Algunos adoptan una teoría invocando su mayor simplicidad, incluso frente a rivales que no son empíricamente equivalentes pero que por el momento poseen adecuación empírica. Ésta suele ser la actitud de quienes aceptan la relatividad general y descartan a las otras teorías métricas de la gravitación, a las que de manera unánime se considera como mucho menos simples (Will (1989) y (1993), Schutz (1990)). Otros científicos, en cambio, niegan que siempre sea forzoso elegir una de las teorías en conflicto ante una situación de subdeterminación. Si son empíricamente equivalentes se puede retener a ambas. Es posible que cada una tenga virtudes pragmáticas diferentes, y por esa razón convenga emplearlas alternativamente en la resolución de distintos problemas. Ésta es la posición de Thorne ante su propio ejemplo. El modelo de E-T curvo, la relatividad general, permite realizar cálculos más fáciles y rápidos en cuestiones referentes a agujeros negros, mientras que el modelo de E-T plano, la teoría newtoniana, es más apta para resolver problemas sobre ondas gravitatorias. Siendo ambas teorías empíricamente adecuadas, los científicos son libres de usarlas indistintamente (Thorne (1994), p. 403), ya que en el fondo sólo importan las predicciones observacionales. Las teorías empíricamente equivalentes proporcionan descripciones teóricas diferentes de los mismos fenómenos, pero como el objetivo de la ciencia es sólo la descripción y predicción de los fenómenos, tales diferencias teóricas no tienen especial importancia. Es clara la actitud instrumentalista implícita en esta estrategia.¹⁵

¹⁵ S. Hawking, teórico muy cercano a K. Thorne, se expresa de una manera más directa: “Yo adopto el punto de vista positivista según el cual una teoría física es solamente un modelo matemático y no tiene sentido preguntar si se corresponde o no con la realidad. Todo lo que uno puede pedir es que sus predicciones concuerden con la observación”. (Hawking y Penrose (1996), p. 12) La tesis de que dos

El ejemplo de Thorne muestra también que la elección de una teoría subdeterminada mediante criterios no factuales no siempre es posible. Puede ocurrir que la aplicación de tales criterios no llegue a establecer ventajas decisivas para ninguna de las teorías rivales, o bien que se desemboque en una situación de inconmensurabilidad o de conflicto entre los criterios mismos. Generalmente los criterios no factuales son altamente ambiguos y están caracterizados con vaguedad. La simplicidad nos ofrece un caso paradigmático de ambigüedad, que hace tiempo señaló Bunge (1963). Es perfectamente posible que una teoría sea más simple que la otra en un sentido, por ejemplo en su formalismo matemático, pero su rival resulte más simple en otro sentido, digamos en su parsimonia ontológica (postulando menos tipos de entidades fundamentales o de hechos brutos no explicados). Algo semejante ocurre con los criterios pragmáticos, como la utilidad o la fertilidad explicativa, o estéticos, como la belleza de la teoría. Por otra parte, no existe metrización de estos conceptos que haga posible una comparación cuantitativa entre diferentes grados de simplicidad o utilidad de cada teoría. Queda así un amplio margen para la evaluación subjetiva del científico en cada caso de aplicación de estos criterios. Finalmente, no son raros los conflictos entre criterios, tales que una teoría sea más simple que otra, pero ésta más fecunda que la primera. Para resolver estos conflictos sería necesario disponer de una jerarquía entre los criterios fundada objetivamente. Pero no tenemos siquiera un consenso mínimo sobre la jerarquía de estos criterios.

teorías empíricamente equivalentes ofrecen descripciones diferentes de los mismos fenómenos presupone que los fenómenos o hechos de observación son identificables independientemente de tales teorías. Éste es un supuesto epistemológico discutible, pero no me ocuparé aquí de él, ni del problema general de la observación cargada de teoría.

No debería esperarse una solución instantánea por esta vía. Los criterios no factuales, por su propia naturaleza, no proveen métodos seguros de decisión o elección entre teorías empíricamente equivalentes. Tampoco se ha podido establecer ninguna conexión necesaria entre los conceptos de verdad o adecuación empírica y las propiedades no factuales, de manera que no hay garantía de que las teorías más simples, útiles y bellas sean las más verosímiles o las empíricamente más adecuadas.

Los planteos tradicionales del problema de la subdeterminación empírica de las teorías se hicieron, entre otros, bajo dos supuestos cuestionables. El primero es que la única evidencia confirmatoria para una teoría proviene de sus consecuencias observacionales verificadas. El segundo es que cualquier otra forma de apoyo se limita a los criterios no factuales y, por consiguiente, no tiene peso evidencial, ya que no aumenta el grado de confirmación de la teoría. Ésta es una posición estrechamente empirista que no se ajusta a la forma efectiva en que las teorías científicas obtienen confirmación. En la práctica, las pruebas teóricas y la evidencia empírica indirecta que aporta la compatibilidad con otras teorías resultan tan importantes como la evidencia observacional directa. La compatibilidad de una nueva teoría con el conjunto (o al menos con el núcleo) del conocimiento científico vigente es una prueba teórica fundamental. Si de dos teorías empíricamente equivalentes una de ellas es incompatible con varias teorías importantes y bien confirmadas mientras que la otra es compatible, es esta última la que debe considerarse mejor confirmada.¹⁶ Análogamente, si de estas dos teorías una puede unificar-

¹⁶ Tampoco aquí han de excluirse posibles casos de conflicto cuando las dos teorías son incompatibles con teorías fundamentales diferentes.

se con otra teoría vigente, recibirá confirmación empírica indirecta de ésta y será preferible frente a una rival empíricamente equivalente que no admita tal unificación.

Podemos dar un ejemplo concreto y vigente de una situación de este tipo. Desde hace tiempo se sabe que la relatividad general es incompatible con la mecánica cuántica y que, a diferencia de la relatividad especial, no es unificable con ella. Este hecho motivó la búsqueda afanosa, hasta ahora sin éxito definitivo, de una teoría cuántica de la gravitación alternativa a la teoría clásica de Einstein. Aunque no se dispone de una teoría de este tipo, se conocen las razones técnicas de tal incompatibilidad y se sabe que la gravedad cuántica exige un marco conceptual muy diferente del de la relatividad general (*cf.* Isham (1989) y Hawking y Penrose (1996)). Si se descubriera una teoría de la gravitación empíricamente equivalente a la de Einstein pero compatible con la mecánica cuántica, sería claramente preferible, incluso aunque resultase menos simple que la relatividad general. La nueva teoría se consideraría mejor confirmada por la evidencia teórica y la evidencia observacional indirecta que le aportaría la mecánica cuántica.

La confirmación de teorías es un asunto más complejo que la mera verificación de consecuencias observacionales; involucra también evidencia indirecta y no factual. De allí que dos teorías puedan ser empíricamente equivalentes y sin embargo una hallarse mejor confirmada que la otra. Glymour (1977) señaló que esto es precisamente lo que ocurre con las teorías del tipo de las propuestas por Reichenbach (1928), en las cuales se introducen campos de fuerzas universales para dar cuenta de las experiencias aparentemente desfavorables para una geometría física. Ante todo, no hay evidencia adicional que apoye esa hipótesis, de modo que, estando las demás cosas igual, es preferible la

teoría que no postula la existencia de fuerzas universales.¹⁷ Además, dicha hipótesis es incompatible con el resto del conocimiento físico, donde se acepta que toda fuerza tiene una fuente material o física que la genera (la masa, por ejemplo, es la fuente de la fuerza de gravedad), mientras que las supuestas fuerzas universales no tienen una fuente identificable independientemente de los efectos producidos por esas mismas fuerzas.¹⁸ Las teorías sin fuerzas universales son preferibles no sobre la base de su mayor simplicidad, sino por estar mejor confirmadas que sus rivales empíricamente equivalentes.

Muchas veces se dan ejemplos de propiedades del E-T subdeterminadas por la experiencia, tales como si éste es continuo o discreto, finito o infinito, y otras (*cf.* Newton-Smith (1978) y (1980)). Es claro que aquí no se trata de teorías enteras del E-T, sino de hipótesis aisladas que, como ya hemos indicado, no admiten confirmación empírica por sí mismas. Por consiguiente, no plantean un problema de subdeterminación radical como el caso de las teorías globales que estamos discutiendo. Es perfectamente posible que una de estas hipótesis sobre la geometría del E-T forme parte de un sistema físico más amplio que no esté subdeterminado por la experiencia. Por ejemplo, la hipótesis de que el E-T es infinito podría hallarse integrada en una teoría cosmológica bien confirmada y no empíricamente equivalente a una rival que incluya la hipótesis contraria.

¹⁷ Reichenbach también pensaba que era preferible excluir a las fuerzas universales de la teoría física, pero por razones de simplicidad y no de confirmación. Según su punto de vista, la presencia de fuerzas universales es empíricamente irrefutable, por lo que sólo se las puede eliminar por convención.

¹⁸ Sobre este punto *cf.* Nerlich (1994), pp. 176–177. La gravedad, por su parte, no es una fuerza universal, en el sentido de Reichenbach, porque provoca efectos diferenciales en los cuerpos. Una vara de acero colocada a 45 grados con un peso de un kilogramo en su extremo no se dobla de la misma manera que una vara de goma con el mismo peso.

Es verdad que la hipótesis de que el E-T es infinito está subdeterminada por la experiencia incluso cuando se le agregan hipótesis auxiliares acerca de los instrumentos de medición. Pero este hecho indica únicamente la necesidad de apelar a un sistema físico más amplio, como una teoría cosmológica.

En general, todas las propiedades globales del E-T, como las topológicas, pero también las métricas globales, como la infinitud, están subdeterminadas por la observación, aunque se las tome en el contexto de un sistema de geometría física. La razón de ello es que todas las mediciones que podamos hacer son estrictamente locales y dejan indeterminada a la estructura global. Es físicamente imposible observar la totalidad del universo, ya que existe un horizonte cosmológico que limita la información que podemos recibir proveniente de una distancia mayor que la que la luz pueda haber recorrido desde el origen del universo.¹⁹ Este hecho técnicamente insuperable deja necesariamente fuera de toda observación posible a una región del E-T. Por su parte, la estructura geométrica que se infiera de las mediciones locales es compatible con diversas estructuras globales. Por ejemplo, una estructura topológica local de tipo R^4 es compatible con otras topologías globales distintas de R^4 . Igualmente, una métrica local de tipo minkowskiano es compatible con métricas globales no minkowskianas. Puede decirse en general que las estructuras geométricas globales están subdeterminadas por las estructuras geomé-

¹⁹ En un universo estático cuyo tiempo de vida es t , el horizonte será una esfera de radio igual a ct . En un universo en expansión, el horizonte puede receder a una velocidad mayor o menor que la de la luz, según el tipo de expansión que experimente. La cuestión del horizonte cosmológico es intrincada y sólo tiene una analogía superficial con el horizonte observacional sobre la Tierra. Para un tratamiento detallado del tema *cf.* Harrison (1981), cap. 19. Sobre los límites que los horizontes imponen a la observabilidad *cf.* Kosso (1989), pp. 51-65.

tricas locales. Por consiguiente, las hipótesis acerca de la estructura global del E–T sólo pueden obtener confirmación empírica en el contexto de una teoría cosmológica.

Ningún tipo de subdeterminación radical se sigue forzosamente de este hecho. Es cierto que en su estado actual de desarrollo la cosmología es una rama de la física bastante imprecisa y plena de incertidumbres. La teoría del *Big Bang*, que se considera la mejor confirmada, es en realidad una familia de teorías que predicen fenómenos muy diferentes. Así, por ejemplo, los modelos del llamado *Big Bang* abierto implican que el universo es infinito y continuará expandiéndose por siempre; mientras que los modelos cerrados sostienen que el universo es finito y que su expansión se detendrá para comenzar luego un proceso de contracción. En general, estas teorías cosmológicas dependen de ciertos parámetros empíricos mal conocidos y difíciles de determinar, como la constante de Hubble H (que en realidad varía con el tiempo), y la densidad de masa del universo ρ , de la cual depende el parámetro de aceleración q que describe la manera en que la expansión del universo varía con el curso del tiempo. Actualmente no estamos en condiciones de determinar si el universo es abierto o cerrado, por lo cual muchas propiedades geométricas globales, como la infinitud, permanecen subdeterminadas. Sin embargo, esta subdeterminación es meramente de hecho y se debe a la falta de conocimiento, en concreto, a la falta de datos empíricos precisos para determinar H , ρ y q , que son parámetros en principio observables, pero en la práctica muy difíciles de medir. Resulta bastante plausible esperar que a medida que se adquieran mayores conocimientos empíricos sobre el universo, alguna teoría cosmológica en particular resulte la mejor confirmada y, consiguientemente, se elimine el estado de subdeterminación transitoria tanto de teorías globales como de propiedades particulares. Después de todo, la cosmología científica

es una ciencia muy joven que debe afrontar problemas de observación excepcionales²⁰ y, pese a todo, ha exhibido progresos notables en pocas décadas.

6. Conclusiones

Ninguno de los argumentos que hemos presentado se propone negar que existan teorías subdeterminadas por la experiencia. Por el contrario hemos admitido que este hecho es frecuente en las ciencias físicas y mostrado algunos ejemplos relativos a las teorías del E-T. Los argumentos que presentamos tampoco niegan la existencia de teorías empíricamente equivalentes. Simplemente afirman que toda subdeterminación empírica entre teorías, equivalentes o no, debe considerarse transitoria y meramente de hecho. Esto es obvio respecto de las teorías que no son empíricamente equivalentes: siempre es posible que en el futuro se encuentren los medios para contrastar aquellas predicciones observacionales en las que las teorías rivales no coinciden. Es sólo una cuestión de tiempo que depende del desarrollo teórico y tecnológico. Aunque en la práctica el estado de subdeterminación no se resuelva (imaginemos dos teorías cosmológicas cuyas predicciones discordantes se refieran a eventos observables que ocurrirán millones de años en el futuro), dicha subdeterminación nunca se establece por principio.

El aspecto positivo de nuestros argumentos se dirige a probar que la situación es esencialmente la misma para las teorías empíricamente equivalentes. La razón de ello es que toda equivalencia empírica también debe considerarse como transitoria y de hecho. Dos teorías son empíricamente equivalentes sólo respecto de las consecuencias observacionales *conocidas* en un momento dado. Por tanto, están subdeterminadas únicamente respecto de ese conjunto de

²⁰ Sobre este punto véase Lequeux (1991).

hechos conocidos, o sea, relativamente al estado de la ciencia en un momento determinado. Esto es todo lo que podemos afirmar fundadamente. Nunca nos encontramos en condiciones de establecer la equivalencia empírica absoluta entre teorías, porque nunca podemos identificar el conjunto total de consecuencias observacionales de ninguna teoría. Éste es un conjunto abierto y variable, que es susceptible de aumentar o disminuir cuando la teoría se extiende o se revisa. La posibilidad de una teoría completa y definitiva, que no admita extensiones ni revisiones, tampoco nos permite afirmar la subdeterminación por principio entre dos teorías. La razón es otra vez la misma: no tenemos manera de reconocer una teoría de este tipo. Por lo demás, su existencia implicaría un conocimiento de una certeza absoluta, incompatible con cualquier concepción falibilista de la ciencia. Ninguno de estos argumentos nos permite rechazar *a priori* la posibilidad de que existan dos teorías globales empíricamente subdeterminadas por principio. Podría ocurrir que alguna de las teorías que consideramos empíricamente equivalentes de hecho lo fueran en realidad de modo absoluto. Aquí sólo caben dos posibilidades: o bien con el tiempo se mostrará que no lo son, o bien nunca lo sabremos. Es cierto que no podemos probar que es imposible que existan dos teorías globales, completas y empíricamente adecuadas en sentido absoluto. No obstante, estamos autorizados a afirmar que tales teorías son altamente improbables, dados los requisitos extremadamente fuertes que deberían cumplir.

Frente a teorías rivales empíricamente adecuadas y subdeterminadas de hecho disponemos de criterios adicionales, además de la evidencia empírica directa, para evaluarlas y determinar que una de ellas se encuentra mejor confirmada que las otras. Estos criterios incluyen la evidencia empírica indirecta, la compatibilidad interteórica y los criterios no factuales. Ninguno de estos criterios proporciona un mé-

todo de decisión automático o infalible, pero su aplicación conjunta nos capacita, en principio al menos, para manejar la situación sin caer de entrada en la aceptación convencional de alguna de las alternativas o en el rechazo escéptico de todas ellas. En última instancia, si ninguno de todos estos criterios logra discriminar entre las teorías en competencia, podemos apelar a la regla del conservadorismo metodológico y atenernos a la teoría que teníamos en primer lugar, esperando a que alguna de las rivales desarrolle alguna ventaja apreciable sobre las demás.²¹ Por razones pragmáticas también podemos aceptar provisoriamente ambas teorías, suspendiendo el juicio acerca de su respectivo grado de confirmación, a la espera de que desarrollos ulteriores nos permitan discriminar entre ambas teorías. La elección de una teoría no es un asunto instantáneo, sino que tiene una indudable dimensión histórica.

Una situación completamente indecible sería aquella en la que se enfrentaran dos sistemas del mundo empíricamente equivalentes, que fueran además idénticos respecto de cualquier criterio empírico y no factual. Tales teorías serían completas, empíricamente adecuadas en sentido absoluto, máximamente simples, bellas y útiles. No habría razones para creer en una teoría más que en la otra. Reconocemos aquí el antiguo tópico de la equipolencia (*isosthéneia*), que según los escépticos griegos llevaba a la suspensión del juicio. Hemos dicho que esta situación es absolutamente improbable desde el punto de vista epistemológico. Al escéptico, sin embargo, le basta con que sea posible para sembrar sus dudas. También hemos argumentado que no podemos verificar que esta situación se ha producido de

²¹ Sklar (1985), cap. 1, estudia con detalle el conservadorismo metodológico. El fundamento de esta posición es simple: el cambio de creencias demanda esfuerzo y energía, por lo que sería un gasto irracional cambiar el propio sistema conceptual por otro que no ofrece ninguna ventaja en absoluto.

hecho, porque no tenemos criterios suficientes para reconocerla. Sin embargo, insistiría el escéptico, ello no implica imposibilidad alguna, al menos desde el punto de vista lógico.

¿Qué hacer ante estas situaciones posibles pero inverificables? Aquí no me propongo responder a esta forma de escepticismo radical. Creo, sin embargo, que lo mejor que puede decirse es que la argumentación a partir de tales posibilidades no proporciona buenas razones para creer en ellas ni para renunciar a las creencias vigentes. Ninguna teoría cosmológica, por ejemplo, puede probar que el universo es único, ni que no existen infinitos universos desconectados entre sí, ni muchas otras situaciones posibles que la imaginación pueda concebir. Desde el punto de vista topológico es concebible que existan muchos espacio-tiempos no conexos. Sin embargo, el hecho de que tales situaciones sean lógicas, matemáticas, o incluso físicamente posibles, no es una razón suficiente para creer que se encuentran realizadas, ni para abandonar las teorías vigentes bien confirmadas. Únicamente nos advierten que nuestras mejores teorías no tienen certeza y podrían estar equivocadas. Pero esto es algo que el falibilismo epistemológico puede aceptar perfectamente, sin que por ello se vea obligado a descalificar a las teorías corroboradas hasta el momento presente.

BIBLIOGRAFÍA

- Balashov, Y., 1994, "Duhem, Quine, and the Multiplicity of Scientific Tests", *Philosophy of Science*, 61, pp. 608–628.
- Brown, H.I., 1987, *Observation and Objectivity*, Oxford University Press, Nueva York.
- Bunge, M., 1963, *The Myth of Simplicity*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Cassini, A., 1996, Reseña de Nerlich (1994), en *Crítica*, XXVIII, no. 82, pp. 127–131.

- Davis, P. (comp.), 1989, *The New Physics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Duhem, P., 1914, *La Théorie physique: son objet, sa structure*, 2a. ed. (1a. ed. 1906), Marcel Rivière, Paris.
- Earman, J., C. Glymour y J. Stachel (comps.), 1977, *Foundations of Space-Time Theories*, University of Minnesota Press, Minneapolis.
- Ellis, G. y R. Williams, 1988, *Flat and Curved Space-Times*, Clarendon Press, Oxford.
- Friedman, M., 1983, *Foundations of Space-Time Theories*, Princeton University Press, Princeton.
- Glymour, C., 1977, "The Epistemology of Geometry", *Noûs*, XI, pp. 227–251.
- Grünbaum, A., 1973, *Philosophical Problems of Space and Time*, 2a. ed. (1a. ed. 1963), Reidel, Dordrecht.
- Harrison, E.R., 1981, *Cosmology. The Science of the Universe*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Hawking, S. y R. Penrose, 1996, *The Nature of Space and Time*, Princeton University Press, Princeton. [Trad. al castellano: Debate, Madrid, 1996.]
- Hofer, C. y A. Rosenberg, 1994, "Empirical Equivalence, Underdetermination, and Systems of the World", *Philosophy of Science*, 61, pp. 592–607.
- Isham, C., 1989, "Quantum Gravity", en P. Davies, (comp.), pp. 70–93.
- Kosso, P., 1989, *Observability and Observation in Physical Science*, Kluwer, Reidel.
- Laudan, L. y J. Leplin, 1991, "Empirical Equivalence and Underdetermination", *Journal of Philosophy*, 88, pp. 449–472.
- Lequeux, J., 1991, "Les tests cosmologiques", en M. Lachièze-Rey (comp.), *La recherche sur les origines de l'Univers*, Editions du Seuil, Paris, pp. 15–35.
- Nerlich, G., 1994, *The Shape of Space*, 2a. ed. (1a. ed. 1976), Cambridge University Press, Cambridge.
- , 1994a, *What Spacetime Explains. Metaphysical Essays on Space and Time*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Newton-Smith, W.H., 1978, "The Underdetermination of Theory by Data", *Proceedings of the Aristotelian Society, Supplementary Volume*, LII, pp. 71–91.

- , 1980, *The Structure of Time*, Routledge, Londres.
- Pannekoek, A., 1951, *A History of Astronomy*, reeditado en Dover, Nueva York, 1989.
- Poincaré, H., 1902, *La science et l'hypothèse*, reeditado en Flammarion, París, 1968.
- Quine, W.V.O., 1950, *Methods of Logic*, Holt, Nueva York.
- , 1953, *From a Logical Point of View*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.).
- , 1975, "On Empirically Equivalent Systems of the World", *Erkenntnis*, 9, pp. 313–328.
- , 1981, *Theories and Things*, Harvard University Press, Harvard. [Trad. al castellano: UNAM, México, 1986.]
- , 1992, *Pursuit of Truth*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.). [Trad. al castellano: Barcelona, Crítica, 1992.]
- Reichenbach, H., 1928, *Philosophie der Raum-Zeit Lehre*, Berlín, W. De Gruyter. [Trad. al inglés: Dover, Nueva York, 1958.]
- Rosen, J., 1995, *Symmetry in Science. An Introduction to the General Theory*, Springer Verlag, Nueva York.
- Schutz, B.F., 1990, *A First Course in General Relativity* (1a. ed. 1985), Cambridge University Press, Cambridge.
- Shapere, D., 1982, "The Concept of Observation in Science and Philosophy", en *Philosophy of Science*, 49, pp. 485–525.
- Sklar, L., 1976, *Space, Time and Spacetime*, University of California Press, Berkeley.
- , 1985, *Philosophy and Spacetime Physics*, University of California Press, Berkeley.
- Smith, R.C., 1995, *Observational Astrophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Thorne, K.S., 1994, *Black Holes and Time Warps. Einstein's Outrageous Legacy*, Norton, Nueva York.
- Will, C.M., 1989, "The Renaissance of General Relativity", en P. Davis (comp.), pp. 7–33.
- , 1993, *Was Einstein Right? Putting General Relativity to the Test*, 2a. edición (1a. ed. 1986), Basic Books, Nueva York.

Recibido: 28 de noviembre de 1997

SUMMARY

The paper analyses two different senses in which it can be said that rival theories are empirically equivalent. This amounts to distinguish two types of underdetermination of theories by experience. The first is transient and relative to the status of scientific knowledge in one moment. The second is absolute and implies that no future experience will be able to confirm one theory and refute the others. That circumstance leads to conventionalism or skeptical relativism when the rival theories have empirical adequacy. Against this conclusion it is argued that we cannot know that two or more theories are empirically equivalent in the absolute sense. So, we have to assume that every example of underdetermination is merely transient. Even in that case, it is possible to apply factual and non factual criteria of choice. If one theory cannot be selected by this way, further developments of both theories will be required. Finally, several cases of underdetermination in physical theories are discussed, and some strategies of assessment are proposed.