

MODELOS TEORETICOS (*)

Por PETER ACHINSTEIN

El término **modelo** goza de una amplia variedad de usos en las ciencias. Puede referirse a cualquier cosa, desde una construcción física en un caso dado hasta un conjunto abstracto de ideas. Aquí examinaré un importante uso del término en física, ilustrado por ejemplos tales como el modelo atómico de Bohr, el modelo de las bolas de billar de los gases, el modelo corpuscular de la luz, el modelo de capas del núcleo atómico y el modelo del electrón libre de los metales. Llamaré a estos **modelos teóricos** (1) o, más brevemente, **modelos**. No pretendo que todo cuanto se llama modelo en física se pueda mostrar que sea un modelo en el presente sentido. Ciertamente argüiré que estos modelos son completamente diferentes de otras concepciones llamadas a veces modelos. Es mi propósito mostrar que los ejemplos citados, como otros muchos que podrían haberlo sido, tienen ciertas características comunes en virtud de las cuales se les llama modelos.

Los filósofos de la ciencia que han acentuado la importancia de los modelos, y señalado que su consideración iluminará la estructura, interpretación y desarrollo del pensamiento científico, incluyen en sus listas algunos de los citados mas arriba. Con todo, estos filósofos han continuado planteando exigencias que —sostendré— tienden a ser engañosas y no revelan qué es específicamente característico de los modelos del tipo que consideraré. A pesar de que mi empresa tiene que ver sólo con los modelos físicos, creo que mucho de lo que tengo que decir es aplicable a varias concepciones —aunque no ciertamente a todas— también llamadas modelos en biología (por ejemplo, el modelo de Crick-Watson de la molécula del ADN), en psicología (modelos de la conducta de aprendizaje) y en economía (el modelo multiplicador-acelerador del crecimiento económico), aunque no sea mi intención tratar aquí de esto.

1.

Hay cuatro características de los modelos teóricos sobre las que me propongo insistir.

(*) *The British Journal for the Philosophy of Sciences*, Vol. XVI, No 62, 1966.

(1) Este término también es usado por MAX BLACK en *Models and Metaphors*, Ithaca, 1962, pág. 226, si bien presenta una concepción algo diferente de la que ofreceremos aquí.

(2) Ver R. D. PRESENT, *Kinetic Theory of Gases*, New York, 1958, págs. 108 ss.

1. Un modelo teórico consiste en un conjunto de **supuestos** sobre algún objeto o sistema. Por ejemplo, el modelo de las bolas de billar de los gases es aquel conjunto de supuestos de acuerdo con el cual las moléculas de un gas no ejercen fuerzas entre sí excepto por impacto, viajan en línea recta excepto en el instante de la colisión, son de pequeñas dimensiones comparadas con la distancia intermolecular promedio, etc. El modelo de Bohr es aquel conjunto de supuestos de acuerdo con el cual el electrón gira alrededor del núcleo de un átomo de tal modo que su momento angular orbital está "cuantizado" del mismo modo en que está "cuantizada" la energía radiada o absorbida por el átomo. Dos puntos merecen notarse. En primer lugar, los modelos teóricos deben ser distinguidos de los diagramas, ilustraciones o construcciones físicas que, si bien son útiles a veces para presentar el modelo, no deben ser identificados con el modelo mismo. En segundo lugar, es cierto algunas veces, aunque no siempre, que aquello que se llama modelo es también llamado teoría, como en el caso del modelo atómico de Bohr y el modelo del electrón libre de los metales. Esta intercambiabilidad de los rótulos es posible desde que, en tales casos, los términos "modelo" y "teoría" se refieren al mismo conjunto de supuestos, aunque llamar modelo a este conjunto no sugiere las mismas cosas que cuando se le llama teoría. Algunas de las diferencias, tanto como de las razones de por qué no todos los modelos se llaman teorías y viceversa, emergerán de lo que sigue.

2. Un modelo teórico describe un tipo de objeto o sistema atribuyéndole lo que puede llamarse una estructura interior, composición o mecanismo, con referencia al cual se explicarán varias propiedades exhibidas por ese objeto o sistema. El modelo de las bolas de billar adscribe una estructura molecular a los gases de modo de posibilitar la deducción de principios relativos a la presión, volumen, temperatura, entropía, etc., de los gases. El modelo corpuscular de la luz adscribe una composición corpuscular a la luz que intenta explicar propiedades de la luz tales como reflexión y refracción. El modelo de Bohr describe el mecanismo subyacente del átomo de hidrógeno de modo que explique la radiación de longitudes de onda discretas observada cuando el hidrógeno es excitado. La explicación mediante tales nociones comprende un número de análisis de tipos similares (aunque de ninguna manera idénticos). Los puntos siguientes ayudarían a aclarar algunas de las ideas implicadas.

La distinción entre un conjunto de propiedades exhibidas de un objeto y su estructura interior, etc., con referencia a la cual se pueden explicar estas propiedades, no debe ser confundida con la distinción entre "macrofenómenos" y "microfenómenos". Muchas de las propiedades explicadas por un modelo teórico pueden ser ellas mismas del "micronivel" (como en el caso de los modelos atómicos y nucleares). Por otra parte, tanto las propiedades explicadas como los componentes estructurales del modelo pueden pertenecer al "macro-nivel" (como en el caso de los "modelos del mundo" en cosmología). Además la estructura descrita se debe considerar siempre con referencia a aquellas propiedades a las que sirve de explicación y no como algo último o incapaz de explicación posterior. (Así, la estructura molecular descrita en el modelo de

las bolas de billar se explica ella misma por modelos atómicos). Finalmente, la distinción en cuestión no se debe entender simplemente como una distinción entre propiedades y sus explicaciones, porque no todo conjunto de principios capaces de explicar propiedades exhibidas por un objeto o sistema necesita referirse a su estructura interna. Algunas explicaciones proceden por descripción de las relaciones que existen entre las propiedades exhibidas mismas. En termodinámica clásica, por ejemplo, los cambios en ciertas propiedades termodinámicas de la materia —tales como la presión, el volumen, la temperatura y la energía— pueden explicarse por cambios en otras, aun cuando no se atribuya una estructura interna a la materia (tal como la que introduce una hipótesis molecular). Otras explicaciones refieren propiedades del objeto a propiedades de objetos completamente diferentes (como las mareas de la tierra son explicadas por una atracción gravitatoria del sol y la luna). Un modelo teórico, por otra parte, procederá analizando al objeto que exhibe ciertas regularidades conocidas en componentes más básicos, no exactamente por expresar estas regularidades en términos cuantitativos o por referencia de las propiedades conocidas a otras de distintos objetos o sistemas. De acuerdo con esto el uso del término “teoría” es en este respecto más amplio que el de “modelo”, desde que no todas las teorías se conciben para proporcionar el análisis estructural típico de los modelos.

3. Un modelo teórico se utiliza como una aproximación útil para ciertos propósitos. Quien formula un modelo razonará como sigue: “Es útil representar las x como teniendo tal y tal estructura, porque entonces pueden deducirse varios principios conocidos; además la estructura real que tienen las x es de un tipo semejante, aunque muy posiblemente más compleja (o en muchos casos se sabe, efectivamente, que son más complejas)”. Por ejemplo: “Es útil representar a los gases como compuestos de minúsculas esferas elásticas que obedecen las leyes de Newton, porque entonces podemos deducir la ley del gas ideal, las ecuaciones de difusión y transporte, etc.; además la estructura real de los gases es de un tipo similar, aunque más compleja, porque las fuerzas intermoleculares de atracción y repulsión no se consideran en esta representación”. El valor de un modelo dado, por consiguiente, puede ser juzgado desde dos puntos de vista diferentes aunque relacionados: ¿en qué medida sirve a los propósitos para los cuales se emplea, y la completitud y precisión de la representación que propone? ¿Es el modelo de las bolas de billar un buen modelo? Sí y no. Permite que se deduzcan varias importantes relaciones, aunque por ignorar ciertas fuerzas intermoleculares fracasa en proporcionar una representación completa y precisa.

El hecho de que un modelo teórico se propone como una manera de representar la estructura de un objeto o sistema para ciertos propósitos, explica por qué frecuentemente se aplican modelos alternativos: diferentes representaciones pueden emplearse para diferentes propósitos; por ejemplo, el modelo de las bolas de billar para derivar la ley del gas perfecto; el modelo de las esferas rígidas que se atraen débilmente para deducir la ecuación de Van der Waal; el modelo que representa a las moléculas como centros puntuales de fuerza de

repulsión inversa, para facilitar cálculos de transporte más realistas. Hay aquí entonces otro punto de diferencia entre el uso de los términos "modelo" y "teoría". Proponer algo como **modelo** de (una) x es sugerirlo como un modo de representar x que permite al menos alguna aproximación a la situación real; además admite la posibilidad de representaciones alternativas útiles para diferentes propósitos. Proponer algo como **teoría** de (una) x , por otra parte, es sugerir que las x son gobernadas por tales y tales principios, no estrictamente que es útil para ciertos propósitos representar a las x como gobernadas por estos principios o que tales principios se aproximen a aquellos que realmente rigen. De acuerdo con esto, el científico que propone algo como una teoría de (una) x debe sostener que las teorías alternativas han de ser rechazadas o modificadas o entendidas como valiéndolo sólo para casos especiales, o algo similar.

Esto ayuda a explicar por qué ciertos conjuntos de principios llamados primero teorías pudieron posteriormente llamarse modelos. Originalmente propuestos como manifestaciones de la estructura real de los items en cuestión (e. g. átomos, metales), se reconocen hoy como aproximaciones, útiles aun para ciertos propósitos. Por supuesto, tales concepciones pueden continuar siendo llamadas teorías, reflejando así el hecho histórico de que una vez fueron propuestas como teorías y no simplemente como modelos.

4. Frecuentemente se formula, desarrolla y hasta designa un modelo teórico sobre la base de una *analogía* entre el objeto o sistema descrito en el modelo y algunos objetos o sistemas diferentes. Esto entraña una comparación por la cual se advierten propiedades y principios en cierto sentido similares. El modelo de Bohr postula electrones orbitales por analogía con un sistema planetario. El modelo de la gota líquida del núcleo atómico explica la fisión nuclear por analogía con la división de una gota líquida en dos gotas más pequeñas. El modelo nuclear de capas se desarrolló invocando una analogía entre el núcleo atómico y las capas electrónicas extranucleares. Esto concuerda con el punto anterior, de que los modelos teóricos tienen por objeto proporcionar una representación útil de un sistema: para proporcionar tal representación frecuentemente es provechoso procurarse una analogía entre el sistema en cuestión y algún sistema conocido gobernado por leyes comprensibles, y suponer que algunas de estas leyes, u otras similares, gobiernan también el sistema que se describirá en el modelo. Un razonamiento de este tipo, fundado como está en un argumento por analogía, nunca se considera suficiente para establecer los principios en cuestión sino sólo para sugerir que se los puede considerar primeras aproximaciones razonables, sujetas a pruebas y posteriores modificaciones. Sin embargo, en cada caso el modelo mismo puede distinguirse de cualquier analogía sobre la cual pueda haberse desarrollado. El *modelo* de las bolas de billar consiste en aquellas proposiciones que afirman que los gases están formados de minúsculas esferas elásticas. La *analogía* se infiere entre los gases así descritos y las bolas de billar perfectamente elásticas.

Los puntos anteriores exponen lo que considero algunas de las más importantes características de los modelos teóricos. Algo debe decirse ahora respecto de su *uso*. Los modelos teóricos pueden cumplir las mismas funciones

que las teorías: pueden usarse con propósitos de explicación, predicción, cálculo, sistematización, deducción de leyes, etc. La diferencia entre el uso de un modelo y el uso de una teoría no reside en el tipo de función en que pueden emplearse sino en cómo cumplen tal función. Los modelos teóricos proporcionan explicaciones, etc., pero basadas en supuestos presumiblemente simplificados. Y esta condición debe estar presente en la mente cuando se los compara con las teorías. La explicación y sistematización por medio de una teoría se dice frecuentemente que es "más profunda" y que proporciona mayor comprensión, reflejando así la creencia de que los principios que constituyen la teoría son más precisos que los del modelo y toman en cuenta más cantidades conocidas. ¿Por qué entonces no empleamos siempre la teoría, que es más precisa y completa? Primero, porque puede no existir ninguna, como ocurre actualmente, por ejemplo, con los modelos del núcleo atómico. Segundo, porque aun si existiera alguna un modelo teórico puede ser de considerable importancia. Puede facilitar cálculos imposibles o excesivamente difíciles con una teoría más compleja. En los cálculos de teoría cinética que implican fenómenos de transporte tales como difusión, conducción del calor y viscosidad, llegan a ser sumamente difíciles, a menos que se adopten supuestos simplificadores incluidos en varios modelos de campos de fuerzas intermoleculares. Además estudiando las consecuencias de los supuestos deliberadamente simplificados que constituyen un modelo, el científico puede ganar una más amplia comprensión acerca de una teoría más compleja. Y hasta puede ser conducido a extenderla o modificarla. Finalmente, los modelos teóricos cumplen un importante rol didáctico. Frecuentemente, es un procedimiento más simple estudiar el modelo de Bohr antes que considerar la teoría de los cuanta; tratar los fenómenos de transporte utilizando el modelo de las bolas de billar antes de aprender la más avanzada teoría del transporte de Maxwell - Chapman; y así podrían darse otros ejemplos.

2.

Me propongo examinar ahora varias suposiciones que frecuentemente se formulan acerca de los modelos teóricos. Una dice que un modelo se concibe a fin de proporcionar una interpretación para un formalismo o cálculo de otro modo no interpretado. Nagel, por ejemplo, entiende por modelo "una interpretación para el cálculo abstracto, que provee de carne a la estructura esquelética en términos de materiales conceptuales o visualizables más o menos familiares". (3) Hutten afirma que "el modelo da una interpretación razonable de los símbolos (en una ecuación o fórmula), los que adquieren así un sentido y podemos entonces aplicar la ecuación o fórmula y someterla a comprobación". (4) Braithwaite defiende una posición similar. (5) Una se-

(3) ERNEST NAGEL, *The Structure of Science*, New York, 1961, pág. 90.

(4) ERNEST H. HUTTEN, *The Language of Modern Physics*, Londres, 1956, pág. 82. Ver también su *The Role of Models in Physics*, en este Journal, 4, 1954, págs. 284-301.

(5) R. B. BRAITHWAITE, *Scientific Explanation*, Cambridge, 1955, cap. 4; *Models in the Empirical Science*, en el libro de E. NAGEL, P. SUPPES y A. TARSKI (eds.), *Logic, Methodology, and Philosophy of Science*, Stanford, 1962, págs. 224-231.

gunda proposición dice que un modelo se propone siempre con referencia a alguna teoría ⁽⁶⁾ en la cual el modelo tiene la misma estructura formal que esta teoría. Braithwaite entiende por modelo "otra interpretación del cálculo de la lo que se exige a la relación del modelo con la teoría". ⁽⁷⁾ Nagel define un modelo para una teoría T como un conjunto de enunciados verdaderos que tienen la misma estructura formal o cálculo que T. ⁽⁸⁾ May Brodbeck adopta una definición similar. ⁽⁹⁾ Esta posición está estrechamente relacionada con un modelo deberá interpretarse, al menos en algún sentido, como una analogía. La exigencia anterior de que un modelo proporcione una interpretación para un formalismo no interpretado. Según la presente exigencia este formalismo se deberá construir en función de alguna teoría. El tercer supuesto dice que Nagel, por ejemplo, usa en forma intercambiable los términos "modelo" y "analogía" y clasifica al modelo atómico de Bohr y al modelo ondulatorio de la luz junto con la analogía entre moléculas y bolas de billar y la analogía entre luz y sonido. ⁽¹⁰⁾ Braithwaite adopta una posición similar y se refiere a modelos de moléculas como sistemas enlazados de átomos y a la analogía entre átomos de hidrógeno y sistemas solares como ejemplos del mismo orden de cosas. ⁽¹¹⁾ Mary Hesse clasifica la analogía entre moléculas gaseosas y bolas de billar junto con postulados relativos a las partículas atómicas, proponiendo ambas cosas como ejemplos de modelos. ⁽¹²⁾

Para empezar debo confesar que encuentro oscuras estas tres suposiciones. Varias interpretaciones diferentes se podrían dar para cada una, y no es siempre evidente cuál debe adoptarse. Discutiré en esta sección las dos primeras suposiciones, dejando la tercera para después.

Es necesario comenzar dando algún fundamento. Los autores citados emplean conceptos de semántica formal en sus análisis de metodología científica. Siguiendo a Carnap ⁽¹³⁾ ellos se refieren a un conjunto de enunciados, obtenidos cuando se interpreta un cálculo dado, como un **modelo** (o **interpretación**) para ese cálculo. Aplican entonces las distinciones semánticas de Carnap a las teorías científicas, especialmente a aquellas que se presentan de un modo axiomático. Aquí los axiomas considerados como series de símbolos no interpretados se pueden distinguir de los mismos axiomas considerados como proposiciones interpretadas. Usando la terminología de Carnap los primeros se

(6) *Models in the Empirical Sciences*, pág. 225.

(7) *Scientific Explanation*, pág. 93.

(8) *Op. cit.*, pág. 96.

(9) *Models, Meaning and Theories*, en la obra de L. Gross (ed.), *Symposium on Sociological Theory*, Evanston, 1959, pág. 279.

(10) *Op. cit.*, cap. 6.

(11) *Scientific Explanation*, pág. 93.

(12) *Models in Physics*, en este *Journal*, 4, 1953, págs. 198-214; ver págs. 199, 203. Sin embargo en su último trabajo, *Models and Analogies in Science*, Londres, 1963, se distinguen dos sentidos del término "modelo" que parecen corresponder al modelo teórico y a la analogía respectivamente; ver cap. 1.

(13) RUDOLF CARNAP, *Introduction to Semantics*, Cambridge, 1942, pág. 203.

llamarían un cálculo, los últimos un modelo. Ahora bien, si los modelos teóricos del tipo que hemos considerado se pueden identificar con los modelos en sentido semántico, entonces la primera exigencia podría parecer justificada. Porque un modelo en sentido semántico proporciona una interpretación para un cálculo de otro modo no interpretado. Si además el cálculo en cuestión es el de alguna teoría, entonces la segunda exigencia también podría parecer justificada porque el conjunto de proposiciones que contiene el modelo tendría la misma estructura formal que la teoría. Pero, ¿qué razones se pueden dar para identificar modelos teóricos con modelos semánticos, qué se oculta en tal identificación y cuál es la garantía para sostener que el supuesto cálculo a ser interpretado por el modelo teórico es el de alguna teoría? Aquí puede resultar instructivo examinar la discusión brindada por Nagel, quien, quizá más que ningún otro representante de esta posición, presta una atención minuciosa a ejemplos específicos.

En la página 94 de *Structure of Science* Nagel escribe:

La teoría atómica de Bohr... supone que existen átomos, cada uno de los cuales está compuesto de un núcleo relativamente pesado que tiene una carga positiva y un número de electrones cargados negativamente, de masa más pequeña que se mueven en órbitas aproximadamente elípticas, con el núcleo de uno de los focos... La teoría supone además que hay sólo un conjunto discreto de órbitas posibles para los electrones y que los diámetros de las órbitas son proporcionales a h^2n^2 , donde h es la constante de Planck... y n es un número entero. Además la energía electromagnética de un electrón en una órbita depende del diámetro de la órbita...

Sin embargo, en la página 95, Nagel nos hace saber que lo que realmente expuso no fue la **teoría** de Bohr sino más bien el **modelo** de Bohr ("en dicha exposición los postulados de la teoría se incluyen en un modelo o interpretación"). Porque la teoría de Bohr, según sabemos, es realmente un cálculo en el que sólo algunos de sus términos se interpretan, mientras que lo que se expuso más arriba no es un conjunto de "esquemas de enunciados" sino "enunciados —plenamente logrados— de cuyo contenido al menos parte se puede representar visualmente". (En la p. 97 Nagel declara que un modelo no necesita incluir referencias a "conceptos experimentales o procedimientos observacionales"). Después de esto podemos ciertamente convenir en que lo que presenta más arriba es el **modelo** de Bohr (como se advirtió antes, también podemos convenir en que lo que se expone es la **teoría** de Bohr, según el modo en que habitualmente se usa esta expresión). En efecto, dada la noción de teoría de Nagel se sigue que el modelo de Bohr no sólo aplica el mismo cálculo que la teoría de Bohr, sino también que el modelo de Bohr proporciona una interpretación para este cálculo (de otro modo no interpretado o par-

cialmente interpretado). Consideraré en primer lugar la primer exigencia. Esta podría entenderse de diferentes maneras.

(i) El modelo de Bohr como sistema interpretado puede distinguirse de su cálculo; de hecho es una entre muchas posibles interpretaciones que pueden darse para este cálculo. Si es esto lo que se da a entender, no tengo objeciones que formular. Por cierto una distinción similar se puede hacer respecto de cualquier proposición o conjunto de proposiciones. ("Todos los metales funden" puede distinguirse del esquema "todo A es B", y de hecho es una entre muchas posibles interpretaciones que se pueden dar a este esquema). Más generalmente, no hago objeciones si Nagel y otros simplemente quieren distinguir la presentación de una teoría (hipótesis, ley) en una forma interpretada de una presentación en la cual (dicen) se dan sólo ecuaciones matemáticas sin significados anexos, donde por modelo entienden referirse a una presentación del tipo anterior y nada más. Por otra parte los ejemplos citados por Nagel y otros sugieren que su posición no consiste meramente en esto. Referencias al modelo de Bohr, al modelo de las bolas de billar, al modelo corpuscular de la luz, modelos de moléculas como sistemas vinculados de átomos, etc., sugieren que ellos entienden estar describiendo lo que es específicamente característico de aquellas concepciones que he llamado modelos teóricos, no lo que es característico de cualquier conjunto de proposiciones (interpretadas). Además, con respecto a estos modelos la sugerencia no parece ser precisamente que los modelos son enunciados interpretados distinguibles de sus respectivos cálculos, sino algo más. Observamos que Nagel dice que la teoría de Bohr es un cálculo parcialmente interpretado, pero que cuando "es explicada del modo habitual" está "incluida en un modelo". Esto puede tomarse como indicación de la siguiente exigencia.

(ii) El objeto de formular y utilizar un modelo es proporcionar una interpretación para términos no interpretados en una teoría; o, al menos, el modelo se usa realmente **porque** constituye una tal interpretación. Nagel reconoce que esto no representa necesariamente el orden histórico de desarrollo: no dice que los científicos formulan primero un cálculo no interpretado o parcialmente interpretado y luego suministran un modelo. Debe entenderse que dice que una vez concebida una teoría (no importa de qué orden) el modelo es realmente utilizado por el físico para proporcionar (o porque proporciona) una interpretación para el cálculo (de esta teoría). Tal exigencia, sin embargo, es demasiado fuerte. El físico no utiliza el modelo de Bohr con el objeto de suministrar una interpretación para un cálculo más que quien pronuncia el enunciado "todos los metales funden" lo hace así con el objeto de interpretar el esquema "todo A es B" (o porque el enunciado proporciona una interpretación). Esto no significa negar que el modelo de Bohr **pueda** usarse en ciertos casos para proveer (o porque provee) interpretaciones. Uno puede considerar, por ejemplo, ciertas ecuaciones matemáticas y en tal caso mostrar qué interpretaciones físicas tienen en este modelo. Pero este contexto es muy especial y lo que se observa no es algo especialmente característico de los modelos teóricos sino que vale igualmente para cualquier conjunto de

proposiciones que contenga ecuaciones matemáticas. Tampoco significa este negar que ciertos modelos han jugado importantes papeles en la tarea de proporcionar interpretaciones para fórmulas, y que pueden usarse en ciertos ejemplos porque proporcionan tales interpretaciones. Por ejemplo, la ecuación de onda de Schrödinger en la mecánica cuántica se interpretó como un modelo corpuscular mediante la especificación de que el cuadrado de la función ψ en un punto dado del espacio representa la probabilidad de hallar el corpúsculo correspondiente en la vecindad de ese punto. Tres aspectos, sin embargo, deben advertirse.

Primero, este tipo de papel interpretativo no es una característica exclusiva de los modelos: la misma tarea la realizan frecuentemente teorías, muchas de las cuales no pueden clasificarse como modelos. Así, la estadística cuántica proporciona interpretaciones para ciertos términos e interpretaciones de la termodinámica. Segundo, cuando un modelo teórico es usado para proporcionar (o porque proporciona) una interpretación para ecuaciones, estas ecuaciones no serán meras series no interpretadas de símbolos. Los términos de la ecuación de Schrödinger, por ejemplo, ya tienen significado, aunque puedan ser completamente abstractos; el modelo corpuscular se emplea entonces para asignar una nueva interpretación a la función ψ que aparece en esta ecuación y que ya está interpretada como representando la amplitud de una onda de materia en un punto del espacio. También el modelo de Bohr puede usarse para asignar significado al término R que, en la ecuación de Balmer, aparece describiendo una relación entre las longitudes de onda de las líneas de la región visible del espectro del hidrógeno. No obstante ello, ya se dio a este término (la constante del gas) un significado, independientemente del modelo de Bohr, mediante su referencia a la ley del gas ideal. Tercero, a pesar del hecho de que un modelo teórico se utiliza a veces para suministrar (o porque suministra) nuevas interpretaciones para términos de ciertas ecuaciones, como señalamos más arriba, sería equivocado considerar que sea ésta una de las razones principales para su uso, especialmente cuando se consideran aquellas ecuaciones que aparecen en sus propios supuestos básicos. Por ejemplo, el modelo de Bohr no es algo ideado o utilizado por el físico para proporcionar (o porque proporciona) interpretaciones nuevas o diferentes para términos tales como "órbita elíptica", "masa" o "carga", que aparecen en sus postulados centrales (en verdad tales términos estaban en uso antes que apareciera este modelo y conservan sus sentidos originales en él). Se trata más bien de un conjunto de supuestos que requiere el empleo de estos términos (ya interpretados) para describir la estructura atómica.

Una interpretación final que podría proponerse sobre la exigencia de Nagel es ésta.

(iii) Aunque los científicos no utilicen realmente cálculos parcialmente interpretados, es importante reconocer, para ciertos propósitos, la posibilidad de reconstruir de esta manera los sistemas que nos ofrecen. Si nos atenemos a esta posibilidad, un modelo sería importante en la medida en que proveyera una interpretación para un sistema así reconstruido. En otras palabras, si los científicos fuesen realmente a exponer sus ideas como cálculos parcialmente

interpretados, entonces los modelos se utilizarían para servir al propósito especificado. Impuesta esta exigencia necesitarían examinarse las razones para reconstruir los sistemas científicos como cálculos parcialmente interpretados, un proyecto que está más allá de las miras del presente ensayo, bien que en otra parte he formulado críticas a tal aproximación a los sistemas científicos. ⁽¹⁴⁾ (Podría advertirse que por las muchas razones generalmente aducidas en favor de la reconstrucción de los sistemas en la forma propuesta —razones que tienen que ver con la presencia de términos “teoréticos”— muchos modelos teoréticos, tales como los modelos atómicos y nucleares, necesitarían ellos mismos ser construidos como cálculos parcialmente interpretados). Para los presentes propósitos, sin embargo, basta advertir que aún si fuera valioso para los científicos reconstruir sus ideas como cálculos parcialmente interpretados y aún si los modelos teoréticos se consideraran como sistemas interpretados en el sentido requerido, el papel interpretativo no sería una característica especial de tales modelos sino que sería utilizado por cualquier conjunto de proposiciones científicas. Porque un conjunto tal, cuando fuera presentado como un cálculo parcialmente interpretado, se podría entonces utilizar para interpretar ese cálculo.

Volviendo al segundo supuesto, a saber, que un modelo tiene la misma estructura formal que alguna teoría, pueden proponerse varias interpretaciones sobre la posición de Nagel:

(a) Consideremos un conjunto (axiomatizado) cualquiera de proposiciones. Pensémoslo como un cálculo no interpretado. Asignémosle sentidos “empíricos” a algunos de los símbolos incluidos y llamemos teoría a este cálculo parcialmente interpretado, puesto que todo cálculo parcialmente interpretado (cuyos términos interpretados se refieren a “observables”) se debe llamar teoría. El conjunto original de proposiciones se convertirá en un modelo en virtud de esta teoría. Entonces, según este criterio, obtenemos un modelo si y sólo si interpretamos un cálculo. (Esta interpretación se podría sugerir sobre la base de la definición de modelo (p. 96) y de teoría (pp. 90 ss.) de Nagel. Esta ciertamente parece ser la posición de Braithwaite en *Models in the Empirical Sciences*, p. 231).

(b) Consideremos cualquier teoría científica generalmente reconocida. Una teoría de este tipo, tal como es “habitualmente expuesta”, está “incluida de un modelo”. Es decir, lo que usualmente se presenta es un conjunto de proposiciones (interpretadas) — el modelo. La teoría misma debe ser construida como un cálculo para este conjunto de proposiciones en el cual ciertos términos están interpretados (como designando “observables”). Desde este punto de vista obtenemos un modelo si y sólo si interpretamos el cálculo de alguna teoría generalmente reconocida, donde la interpretación será aquella en cuyos términos dicha teoría es usualmente presentada. (Esta interpretación podría sugerirse sobre la base de la discusión que hace Nagel sobre el modelo de Bohr).

(14) *Theoretical Terms and Partial Interpretation*, en este *Journal*, 14 (1963), págs. 98-105; *The problem of Theoretical Terms*, *American Philosophical Quarterly*, julio 1965.

(c) Consideremos cualquier cosa generalmente reconocida como teoría científica. Obtenemos un modelo sí y sólo si interpretamos el cálculo de esta teoría, donde una tal interpretación puede emplear cualesquiera nociones con sentido y puede ciertamente engendrar una descripción de un "segundo sistema" (p. 110) que sea, físicamente hablando, completamente diferente del sistema descrito en la teoría. (Esta interpretación, que incluye (b) pero no (a) como caso especial, se podría insinuar sobre la base de la última discusión de Nagel, en las páginas 108 y siguientes).

Cada una de estas exigencias implica que un modelo tiene la misma estructura formal que alguna teoría. Pero nada de esto es aún aceptable si se utiliza para lo que he llamado modelos teóricos. Para ciertas cosas ninguna de ellas proporciona una condición suficiente. Consideremos un cálculo arbitrario. Que al interpretar este cálculo se obtenga un modelo teórico (como se exigía en (a)), depende de que las proposiciones resultantes cumplan o no los criterios para modelos teóricos expuestos anteriormente. Y esto no podrá en general asegurarse, aún sí (como en (b) y (c), el cálculo en cuestión es el de alguna teoría reconocida, y sí, además, (siguiendo (b)), la interpretación es aquella en cuyos términos dicha teoría es usualmente presentada. Además, aunque (a) proporciona una condición *necesaria* para que exista un modelo teórico, ésta es una condición perfectamente trivial. Cualquier modelo teórico (o, para este propósito, cualquier conjunto de proposiciones) es una interpretación de su propio cálculo. Y si una teoría puede construirse simplemente interpretando algunos de los términos de este cálculo, entonces cualquier modelo teórico (cualquier conjunto de proposiciones) tiene la misma estructura formal que una teoría construida por este procedimiento. Las exigencias (b) y (c), por otra parte, no son de ningún modo triviales, desde que requieren que la teoría en cuestión sea generalmente reconocida como tal y no forjada simplemente por la arbitraria reinterpretación de un cálculo. Empero ninguna de las dos es aceptable como condición necesaria. Porque muchos modelos teóricos, por ejemplo los del núcleo atómico, no son interpretaciones del cálculo de alguna teoría (conocida) del tipo requerido. Para estar seguros sería deseable plantear la exigencia de que los cálculos parcialmente interpretados de tales modelos fueran ellos mismos teorías. Pero de ser así parecería violarse el requerimiento de que la teoría en cuestión sea una teoría generalmente reconocida como tal; y algo más importante aún, si se clasifica como teoría a este tipo de cálculo parcialmente interpretado es difícil evitar la conclusión de que las condiciones (b) y (c) pudieran del modo más simple ser satisfechas virtualmente por cualquier conjunto de proposiciones "empíricas".

3

Además de los modelos teóricos tales como el modelo atómico de Bohr, Nagel cita los siguientes ejemplos en defensa de su posición: las leyes del sonido y las de la teoría ondulatoria de la luz, las leyes de la conducción del calor y

las de la gravitación, las leyes de la mecánica clásica y las de la mecánica relativista, amén de otras, donde el primer conjunto de leyes en cada par es el que designa (intercambiamente) como modelo o analogía respecto del segundo. (15) Al emplear tales ejemplos en defensa de su posición, Nagel parece estar reivindicando que los dos principales supuestos discutidos en la sección precedente valen también para estos casos. Consideraré primero esta posibilidad y luego examinaré el tercer supuesto antes aludido, a saber, que un modelo debería identificarse de algún modo con una analogía.

Para comenzar, la exigencia que se sigue del supuesto 2, de que los conjuntos de leyes citados más arriba tengan el mismo cálculo, requiere considerable modificación. Mientras varias de las leyes de cada par son formalmente similares, otras no lo son, o bien pueden no tener equivalentes formales, similares o no. (16) Además, aun si sus cálculos fuesen idénticos, sería engañoso exigir, como en el caso del primer supuesto, que un conjunto de leyes provea una interpretación para el cálculo de otro (salvo que esto se entienda en el sentido trivial de que cualquier conjunto de proposiciones proporciona una interpretación para su propio cálculo). Cuando, por ejemplo, se usa un modelo corpuscular para proporcionar una interpretación (en el sentido más o menos ordinario) para la función psi en la ecuación de Schrödinger, entonces puede decirse que el cuadrado de la función psi en la teoría de Schrödinger representa, simboliza o significa la probabilidad de hallazgo de la partícula correspondiente. Pero no podemos decir de la misma manera, por ejemplo, que la expresión "centro de atracción" en teoría gravitacional represente, simbolice o signifique una fuente de calor (aunque podemos decir que la expresión anterior corresponde, en las leyes de la gravitación, a la última, en las leyes de conducción del calor). En resumen, se debe distinguir entre (i) la demostración de que dos términos desempeñan formalmente roles similares en diferentes conjuntos de leyes y (ii) la provisión de una interpretación (representación, etc.) para un término en una teoría dada (como se presume que lo hace un modelo semántico respecto de los símbolos de un cálculo).

¿Que pasa con el supuesto de que un modelo es, en algún sentido, una analogía? Para aquellos que aceptan la caracterización de modelos teóricos ofrecida al principio, tal sugerencia puede parecer enigmática. Pues podría decirse que el modelo de Bohr, por ejemplo, es algo que atribuye propiedades a un cierto objeto o sistema, mientras que la analogía planetaria es esencialmente una comparación entre ese objeto o sistema y uno diferente, el análogo. Además, los roles de cada uno son diferentes. La analogía planetaria quizá sugirió algunos de los supuestos básicos del modelo de Bohr; se utiliza en la enseñanza de los principios de este modelo para ayudar a entender el átomo según es descrito por este modelo; fue útil para sugerir cómo podía ofrecerse el modelo en su forma original; nada de lo cual puede decirse del modelo mismo de Bohr. Este último se usa para explicar ciertos fenómenos espectrales, para deducir la ecuación de Balmer, para predecir líneas espectrales adicionales,

(15) Op. cit., págs. 108-114.

(16) Ver mi artículo *Models, Analogies and Theories, Philosophy of Science*, 31, enero de 1965.

etc., nada de lo cual puede decirse de la analogía planetaria (o cualquier otra). Podría objetarse por cierto que ambos proporcionan **representaciones** del átomo. Aun así es posible distinguir entre la representación del átomo, que lo describe como **siendo** un sistema que satisface los supuestos de Bohr, y la representación del átomo que lo describe como **semejante** en cierto modo a un sistema solar. ⁽¹⁷⁾

Entonces ¿qué podría entrañar la identificación propuesta? ¿Sugiere quizá que un conjunto de supuestos constituye un modelo de x si y sólo si es una descripción de un análogo para x ? Esto concordaría con el punto de vista, insinuado a la vez por Nagel, de que un modelo describe, o puede describir, un "segundo sistema" distinto del descrito en la teoría correspondiente. Sin embargo, si consideramos muchos de los ejemplos de modelos citados por Nagel y otros, lo anterior no es ni una condición necesaria ni una condición suficiente. Muchos de esos modelos (de x) no son descripciones de análogos (para x). (El modelo atómico de Bohr describe átomos, no sistemas solares). La descripción de un análogo tampoco es necesariamente un modelo teórico. Las leyes de conducción del calor describen fenómenos análogos en ciertos aspectos a fenómenos de electrostática. No obstante, estas leyes no constituyen un modelo teórico en el sentido en que lo son los modelos de Bohr y de las bolas de billar.

Tal vez la identificación de modelos y analogías sirve entonces para sugerir algo más débil, a saber, que la formulación de un modelo teórico requiere, entre otras cosas, que se invoque una analogía. Sin embargo, hasta esto es dudoso. Sin duda, una analogía se utilizará frecuentemente, y quizá se incorporará en la misma formulación de un modelo teórico, explícita o implícitamente ("los electrones, como los planetas, giran en órbitas elípticas alrededor de un objeto que los atrae", "el electrón planetario gira alrededor del núcleo solar" El uso del símil y la metáfora es bien notorio y frecuentemente se muestra provechoso para el aprendizaje y la comprensión de supuestos básicos del modelo. Esto no es sin embargo algo peculiar de los modelos teóricos, pero generalmente sirve para las hipótesis científicas. Además, los supuestos que constituyen un modelo científico se formulan frecuentemente sin la ayuda de analogías, lo cual depende del nivel de la presentación. ⁽¹⁸⁾ Si la identificación propuesta sirve luego sólo para sugerir que las analogías **pueden** ser importantes para formular (y explicar) modelos teóricos, el punto está bien fundado (indudablemente esto ya se reconoció en nuestra anterior caracterización de tales modelos). Relaciones más fuertes, de los tipos mencionados arriba, no parecen sin embargo ser ni necesarias ni suficientes.

4.

Formuladas estas observaciones sobre modelos y analogías debemos ahora reconocer algunos factores de complicación. Por alguna razón los términos "modelo" y "analogía" han sido usados frecuentemente en forma intercam-

⁽¹⁷⁾ Cfr. BLACK, *Models and Metaphors*, pág. 228.

⁽¹⁸⁾ Ver, por ejemplo, ROBLEY D. EVANS, *The Atomic Nucleus*, Nueva York, 1955, para una presentación de modelos nucleares que está bastante libre del uso de analogías.

biable por científicos e historiadores de la ciencia, especialmente en aquellos casos en que un análogo de un objeto o sistema dado es descrito en detalle cuantitativo. Por ejemplo en su escrito "Acerca de las líneas de fuerza de Faraday" describe Clerk Maxwell un análogo del campo eléctrico que consiste en tubos de sección variable a través de los cuales fluye un fluido imaginario incompresible que satisface ecuaciones análogas en ciertos aspectos a aquellas que gobiernan los campos eléctricos. (19) La descripción de este análogo, desarrollado, como declara Maxwell, para establecer teoremas "de un modo más inteligible para muchas mentes y más aplicable a los problemas físicos que aquél en que se usan sólo símbolos algebraicos", se menciona a veces como un modelo del campo eléctrico (20) (si bien Maxwell mismo lo llamó analogía). Los supuestos de Maxwell que atañen al fluido imaginario semejan un modelo teórico en el siguiente respecto: atribuyen una estructura subyacente al sistema que describen. Además, por propia admisión, este sistema es distinto del campo eléctrico. Consecuentemente, los supuestos en cuestión, si bien pueden sugerir varias hipótesis sobre el campo eléctrico, no pueden ellos mismos interpretarse como un modelo teórico de este campo, sino sólo como una descripción de un análogo de éste.

Un punto conexo debe también subrayarse. A veces es difícil determinar si una concepción dada es propuesta como un modelo teórico de un sistema x o como una analogía para x , p. ej., si lo que se describe es x o un análogo de x . Esto es importante y puede dar razón en parte de la propuesta identificación de modelos y analogías. Se pueden hallar ejemplos particularmente buenos si nos apartamos del análogo hidrodinámico de Maxwell y nos dirigimos a posteriores "modelos" mecánicos del éter.

El propósito general es aquí el de proporcionar una consideración enteramente mecánica de las fuerzas eléctricas y magnéticas. Pueden distinguirse dos tipos de cuestiones: (1) ¿es posible una explicación mecánica? y (2) si así es, ¿cuál debe aceptarse? Algunos de los "modelos" mecánicos del éter al menos, deben atenderse como proveedores de respuestas para la primera cuestión, no así para la segunda. Los físicos que formularon "modelos" de este tipo intentaban imaginar sistemas mecánicos que tuvieran los mismos efectos que los campos electromagnéticos, en tanto que ignoraban la plausibilidad de sus concepciones particulares (y hasta admitían su implausibilidad). Por ejemplo en su escrito posterior "Acerca de las líneas de fuerza físicas", Maxwell introduce un conjunto de supuestos que conciernen al éter, algunos de los cuales citaré:

1. Los fenómenos electromagnéticos se deben a la existencia de materia bajo ciertas condiciones de movimiento o de presión en cada parte del campo magnético, y no a la acción directa a distancia entre imanes o corrientes...

(19) *Scientific Papers*, I, Cambridge, 1890, págs. 155-229.

(20) Véase, por ejemplo, Sir EDMUND WHITTAKER, *History of the Theories of Aether and Electricity*, I, Nueva York, 1960, pág. 279.

2. La condición de cualquier parte del campo, a través del cual pasan líneas de fuerza magnética, es la desigual presión en diferentes direcciones...
3. La desigualdad de presión se produce por la existencia en el medio de vórtices o remolinos...
4. Los vórtices están separados unos de otros por una única capa de partículas redondas...
5. Las partículas que forman la capa están en contacto giratorio con los dos vórtices que separan...
6. El efecto de una corriente eléctrica sobre el medio circundante consiste en poner los vórtices en contacto con la corriente giratoria (21).

¿Cómo trata Maxwell estos supuestos? Citaré otra vez:

Mi objeto en este escrito es desbrozar el camino para la especulación... investigando las consecuencias mecánicas de ciertos estados de tensión y movimiento en un medio (el éter) y comparando éstos con los fenómenos observados de magnetismo y electricidad. Haciendo notar las consecuencias mecánicas de tal hipótesis espero hacer alguna contribución para quienes consideran los fenómenos como debidos a la acción de un medio pero están en duda en cuanto a la relación de esta hipótesis con las leyes experimentales ya establecidas, las que generalmente se expresan en el lenguaje de otras hipótesis... No propongo esto como un modo de conexión existente en la naturaleza, ni siquiera como una hipótesis eléctrica, alcance que gustosamente le atribuiría. Sin embargo, constituye un modo de conexión que es mecánicamente concebible y fácil de investigar, y que sirve para poner de manifiesto las conexiones mecánicas reales existentes entre los fenómenos electromagnéticos conocidos; tanto que me aventuro a decir que quienquiera comprenda el carácter provisional y temporario de esta hipótesis se hallará más bien ayudado que obstaculizado por ella en su búsqueda posterior de la verdadera interpretación de los fenómenos eléctricos (22).

Formuló Maxwell un modelo teórico del éter o simplemente describió un análogo de él? La respuesta no es bien definida. Si examinamos su declaración a la luz de las características de los modelos teóricos antes citadas, notaremos tanto similitudes como diferencias. Como los modelos teóricos la concepción de Maxwell consiste en un conjunto de supuestos sobre un sistema, a saber, el éter. Además, estos supuestos atribuyen una estructura interior o mecanismo al sistema. Sin embargo, el espíritu que inspira la concepción, aun cuando es cosa semejante a los modelos teóricos, es diferente en importantes sentidos. Con propósitos de comparación podríamos formular la esencia de la exigencia de Maxwell como sigue: "Es útil representar al éter como si tuviera la estructura que he descrito, porque entonces varios principios conocidos pue-

(21) *Scientific Papers*, I, págs. 485-487.

(22) *Scientific Papers*, I, págs. 452-486.

den derivarse de supuestos enteramente mecánicos; como no conozco la real estructura del éter tampoco reclamo que sea algo como lo que he presentado aquí; sin embargo, el hecho de que tal estructura permite deducir conocidos principios que gobiernan los campos electromagnéticos, muestra la **posibilidad de una teoría mecánica**". Por otra parte, el que propone un modelo teórico exige que su representación proporcione al menos alguna aproximación a la estructura real del sistema en cuestión. Esto significa que la concepción de Maxwell es en algún respecto al menos semejante a la descripción de un análogo. Porque, admitiendo que "no lo ofrece (al sistema mecánico propuesto) como un modo de conexión existente en la naturaleza", concede que este sistema es distinto del éter. No obstante, a diferencia de las analogías ordinarias, Maxwell supone, al menos por el momento, que el sistema mecánico que describe constituye realmente a los campos electromagnéticos, es decir, que ellos no son distintos sino realmente una y la misma cosa ⁽²³⁾. En una analogía no se hace jamás tal identificación. Aun cuando pueda suponerse que un átomo es como un sistema solar en ciertos aspectos, la suposición de que ambos son idénticos jamás se establece, ni siquiera con el propósito de mostrar la posibilidad de un tipo dado de teoría.

Aunque el éter mecánico de Maxwell no encaja nitidamente en la clasificación de modelo teórico del éter o descripción de un análogo del éter, hay otra concepción del siglo diecinueve acerca del éter que encuadra en ella. En 1885 George Francis Fitzgerald formuló un "modelo que ilustra algunas propiedades del éter" ⁽²⁴⁾. "El modelo —escribe— consiste en unas series de ruedas que rotan sobre ejes fijados perpendicularmente a una tabla plana, y conectadas por cintas de goma de la India. Fitzgerald aclaró que "no tenía intención de que se supusiera que el éter está formado realmente por ruedas y cintas de goma de la India, ni tampoco de ruedas de paleta con canales de conexión"... ⁽²⁵⁾. Además, a diferencia de Maxwell en su ejemplo ya citado, Fitzgerald no atribuyó al éter el mecanismo real que describió, ni siquiera como una posibilidad. Construía claramente un análogo mecánico del éter, y, sin duda con frecuencia, describió lo que hacía como el diseño de una analogía entre el éter y el sistema mecánico que presentó. En años posteriores, sin embargo, Fitzgerald propuso una concepción diferente, que trató como un modelo teórico del éter:

..he defendido la hipótesis de que el éter tiene la naturaleza de un fluido lleno de movimiento vorticoso y que las acciones electromagnéticas son debidas a la particular distribución de ese movimiento, que es, en general, irregular o al menos no dirigido... Sobre lo que deseo llamar la atención es sobre una hipótesis sobre la naturaleza del

(23) Esto deberá cotejarse con la anterior propuesta de Maxwell que incluye el fluido imaginario incomprensible, al cual nunca lo supone para comprender el éter sino sólo para hacer la función de un análogo de éste.

(24) *Scientific Writings*, Dublin, 1902, pág. 142.

(25) *Ibidem*, pág. 151.

movimiento de onda, que puede transmitirse por un sistema de filamentos en vórtice (26).

La hipótesis en cuestión, que atribuye vórtices espirales al éter, no fue propuesta como un mero análogo y, a diferencia de Maxwell, Fitzgerald no dice que "no la ofrece como un modo de conexión existente en la naturaleza". La llama en cambio una "hipótesis... propuesta realmente de primera intención".

En suma, las especulaciones sobre el éter, del siglo diecinueve, a pesar del hecho de que fueran llamadas "modelos", variaron considerablemente en importancia conceptual. Algunas las entendimos como modelos teóricos del éter, otras como descripciones de análogos del éter; otras finalmente tuvieron un status intermedio. Se pueden tener en cuenta características del tipo estipulado al comienzo de este escrito para determinar el status de una proposición dada, incluso para reconocer su carácter limítrofe. La existencia de casos de este tipo no vicia de ningún modo la distinción entre supuestos que implican un modelo teórico de x y aquellos que describen un análogo de x , sino que sólo muestra que tal distinción puede ser difícil de aplicar en ciertas instancias (27).

(Traducción del inglés de JORGE A. ROETTI)

(26) *Ibidem*, págs. 472-473.

(27) Este trabajo fue escrito como parte de un tomo sobre las teorías científicas respaldado por la National Science Foundation.