

METODOLOGIA DE LA FISICA. I¹

Alberto Cortés O.

*Departamento de Física
Universidad de los Andes
Bogotá, Colombia*

I. Introducción

El desarrollo de la física-matemática constituye una revolución intelectual con las más amplias y profundas consecuencias. El deseo de entender el método que ha seguido esta ciencia en su camino de triunfos se remonta por lo menos a los filósofos y a los científicos contemporáneos a Galileo, Kepler y Newton, e incluye estos, naturalmente.

La física-matemática consiste, por un lado, de una parte formal y abstracta; y por otro, de una parte observacional, o experimental. Los filósofos de que hablé, trataron de caracterizar esta ciencia en cuanto a sus bases epistemológicas y sus métodos; y como es natural, unos (Descartes y Leibniz, por ejemplo) le dieron más importancia a la parte formal, y otros (Locke y Bacon) a la parte observacional. Desde entonces, el esfuerzo por precisar las bases y los métodos de la física no ha cesado. Pero a este proyecto se le han presentado problemas tremendamente difíciles de resolver, y aunque se ha hecho algún avance, todavía queda mucho por entender.

I.1. El concepto de método

Empezaré inmediatamente precisando el significado de la palabra 'método', y más tarde, de 'metodología'. La palabra 'método'

¹La segunda parte de este artículo aparecerá en MOMENTO 19, 1 (1999).

significa, etimológicamente, *siguiendo un camino*. Cuando hablamos de un *método* estamos refiriéndonos a los medios, o “camino” utilizado para alcanzar una *meta*, un *fin*. Un *método* debe especificar una secuencia ordenada, efectiva, de acciones, operaciones o procedimientos que deben tomarse para lograr un fin determinado. Henry Guerlac, en su artículo *Newton y el Método de Análisis*, ha sugerido una analogía muy apropiada para nosotros, que ayuda a aclarar el concepto de método, y la diferencia entre método y *lógica* (deductiva e inductiva), otro concepto que encontraremos más adelante. Después de sugerir que ambos, la *lógica* y el *método* conciernen el cómo deben operar nuestras mentes para obtener conocimientos confiables, y sugiriendo que buscar esos conocimientos es análogo a buscar una ruta que nos lleve a un cierto sitio, él dice: *La lógica es naturalmente indispensable al método: es la maquinaria interna que nos conduce por el camino; nos proporciona las tácticas que empleamos... donde el método nos suministra la gran estrategia.*

En física, la meta o fin que se persigue depende hasta cierto punto de los intereses fundamentales que motivan al investigador. En general, esa meta no es simplemente el conocimiento del mundo físico, sino más bien la *comprensión*, o la *predicción*, o el *control* de ese mundo, si en el individuo prima la *curiosidad* o la *practicalidad*, o el *deseo de poder*. Excepto por la *mecánica cuántica* en este siglo, diría yo que el motivo fundamental de los investigadores ha sido en su gran mayoría *comprender*, el de poder contestar *por qué* ocurren ciertos fenómenos. En otras palabras, el de poder *explicar* cómo y por qué ocurren los fenómenos observables de determinada manera. Resulta que en la física, como veremos, cuando uno puede explicar *por qué* ocurre un fenómeno de determinada manera, también puede hacer toda clase de *predicciones* relacionadas con ese fenómeno. Y que *el poder* que da la física, la ciencia en general, se debe fundamentalmente a la comprensión y a la capacidad de predicción que se ha obtenido. En cuanto a los productos de esa comprensión que da la física, que a veces otorgan enorme *poder* (por ejemplo, un bombardero o un rayo láser en un hospital) pueden y han sido diseñados

para que individuos que no entienden con ninguna profundidad ni el porqué ni el cómo de esos productos, puedan operarlos o mandarlos operar para que se produzca cualquier cantidad de beneficio o daño a otros individuos. Por lo recién dicho y por otras razones que pronto veremos, yo tomaré la meta fundamental de la física como la *comprensión* (y secundariamente la *predicción*) del mundo físico. Por lo tanto, para nosotros, la expresión *el método de la física* se refiere a los procedimientos apropiados y efectivos que, en determinado orden, llevan a cabo los físicos para encontrar y establecer explicaciones sobre los fenómenos del mundo físico.

En la mecánica cuántica, el problema de la meta que se persigue, a que persiguen los físicos es más ambigua. Desde 1900, cuando Planck descubrió la necesidad de los cuanta, hasta 1924 (digamos), y también con de Broglie y Schrödinger, la meta fundamental en la investigación de la física atómica y subatómica seguía siendo la comprensión, la explicación de esos fenómenos siguiendo los métodos tradicionales. Pero desde 1925, y por muchos años, debido a la enorme dificultad de encontrar conceptos y modelos adecuados para comprender, para explicar ese mundo subatómico, la meta a perseguir se modificó por necesidad. Superficialmente, por lo menos, la meta se convirtió en la búsqueda de predicciones y el abandono de explicaciones. Debido también a que Heisenberg encontró, antes que Schrödinger, unas leyes que permitían la predicción de los resultados de experimentos atómicos con gran precisión, pero sin la más mínima idea de cómo entender lo que esas leyes sugerían sobre cómo era el mundo microscópico, sobre cómo entenderlo; y a que Heisenberg también descubrió el Principio de Indeterminación que, apropiadamente interpretado, fortaleció enormemente la idea que el mundo microscópico era inentendible por medio de conceptos tradicionales, Bohr, Heisenberg, Born y von Neuman más tarde, aseguraron dogmáticamente que el mundo cuántico era imposible de entender por medio de modelos imaginables, y que la concepción, la interpretación del mundo cuántico que ellos proponían era para siempre la más adecuada. Esa concepción se llamó la *Interpretación de Copenhagen de la*

mecánica cuántica, en la cual ya no se persigue la comprensión de los fenómenos físicos, sino simplemente la capacidad de *predecir* resultados de experimentos.

Más tarde (1952), David Bohm, mostró lo que se consideraba imposible: un modelo imaginable, entendible, de lo que podía ser el mundo submicroscópico. El estudio de este modelo de Bohm, o de modificaciones de él, es un programa de investigación bastante activo, que muestra muy claramente que para muchos físicos la comprensión profunda de todas las teorías de la física sigue siendo una meta insustituible.

I.2. El concepto de explicación

Uno generalmente supone que la noción de *explicación* no necesita ningún comentario. Pero sucede que en la física lo que se buscan explicaciones de un tipo muy especial, que como veremos, nos definen otras metas que iluminan un poco mejor la estrategia que debemos seguir para encontrar explicaciones apropiadas. Sin embargo, el tipo de explicaciones que se admiten en la física debe ser contrastado con varios otros tipos de explicaciones que se han dado digamos en los últimos dos milenios; pues obviamente, el tipo de explicaciones admisibles en una cierta cultura implanta y limita el carácter de la comprensión que se va a tener de lo que se explica en esa cultura. Además, vale destacar el hecho de que ciertos tipos de explicaciones pueden permitir tipos de errores y de confusiones que otros tipos no toleran. Pero este trabajo no es un estudio en tipos de explicaciones, y por lo tanto sólo mencionaré, sin dar mayor aclaración, algunos que son pertinentes a la noción de explicación en física. Estoy seguro de que hay muchos más: Por ejemplo, *explicación* como clarificación de términos u oraciones; o *explicación* como justificación de un juicio o de una acción.

Divido las explicaciones de mayor interés en dos grandes clases: La clase de explicaciones científicas y la clase de explicaciones no científicas. Siguiendo a Ernest Nagel, encuentro cuatro tipos de explicaciones científicas, y se me ocurren dos tipos de explicaciones no científicas que vale la pena mencionar aquí.

Explicaciones científicas

1. **Deductivas**
2. **Probabilísticas**
3. **Teleológicas**
4. **Genéticas**

Explicaciones no científicas

1. Explicaciones por medio de **mitos, parábolas y analogías**.
2. Explicaciones por medio de **conceptos**.

Principio con el tipo, o tipos, de explicación más antiguo, no científico, y de gran utilidad en la historia de la humanidad: La explicación por MITO, PARABOLA, o ANALOGIA, que sospecho sin mayor análisis, son todas, en últimas, analogías. Por ejemplo, los mitos griegos, las parábolas de Cristo, múltiples analogías en Platón, en Aristóteles y otros filósofos, representan esfuerzos explicativos importantes. Este tipo de explicación –que desgraciadamente no podemos discutir en detalle– puede ser de gran belleza poética, fácil de recordar, y de gran capacidad evocativa. Su debilidad es que casi sin excepción, deja mucho que desear en claridad y precisión.

En contraste, las explicaciones científicas –especialmente las dos primeras– son un gran avance en cuanto a claridad y precisión. Como dije arriba, Nagel las divide en cuatro tipos: sólo los dos primeros se utilizan en la física. Los otros dos en otras ciencias.

1. Las **explicaciones deductivas** son aquellas en las cuales *explicar* algo significa deducirlo lógicamente de una ley general y de condiciones iniciales. Ya diremos más sobre este tipo.

2. Las **explicaciones probabilísticas** son similares a las deductivas, pero en estas, se utilizan leyes probabilísticas en vez de leyes generales. Por ejemplo, el que un individuo haya quedado lisiado después de un choque en un automóvil, no se explicaría por

medio de una ley general que diría que *todos* los individuos que están implicados en accidentes de tráfico serios quedan lisiados, pues no sería cierto. Más bien se usaría una ley probabilística o estadística de acuerdo con la cual, por ejemplo, los individuos involucrados en accidentes automovilísticos en los cuales los vehículos chocan a velocidades mayores de tal valor sufren daños permanentes con determinada frecuencia.

3. Las explicaciones **teleológicas** o **funcionales** son aquellas en las que se menciona algún fin o función de cierto elemento o proceso. Por ejemplo, una pregunta como *¿Por qué tenemos corazón?* o *¿Para qué sirve el corazón?*, se contesta a veces como: *Para bombear la sangre que lleva oxígeno, nutrientes y otras substancias a todo el cuerpo*. Esta sería una típica explicación teleológica o funcional en la cual parece hacerse referencia a un propósito, una meta o una función. Existe una disputa importante entre filósofos de la ciencia sobre si este tipo de explicación es o no siempre reducible a las explicaciones deductivas o probabilísticas mencionadas arriba. La misma clase de disputa existe para el último tipo de explicación científica que mencionamos.

4. Las explicaciones **genéticas**, muy comunes en estudios de carácter histórico, son aquellas en las que se explican ciertas características de un objeto describiendo su evolución de un estado anterior. Por ejemplo, para explicar por qué hay un número notable de palabras de origen árabe en el castellano, sería perfectamente natural hacer referencia al desarrollo del lenguaje durante los varios siglos en que los moros estuvieron en España.

Volviendo ahora a las explicaciones **no científicas**, hay unas que yo llamaría explicaciones por meros conceptos; es decir, no acompañados por leyes. Este tipo de explicaciones se parecen superficialmente a las científicas puesto que ambas, con frecuencia, introducen conceptos nuevos. Un ejemplo típico de este tipo de explicación es el que le atribuye a objetos vivos una cierta característica especial poseída sólo por ellos, a la que se le da un nom-

bre como *entelequia* o *elan* vital, sin especificar las leyes que debe cumplir esa entelequia, y así se supone que se está explicando la vida, lo que es completamente ilusorio. Otro ejemplo similar lo da Molière cuando en una de sus piezas alguien dice que la razón por la cual una cierta substancia produce sueño es porque tiene un efecto dormitivo –donde este efecto dormitivo no es otra propiedad que la de producir sueño–. Por lo tanto lo que se está diciendo es que la substancia produce sueño porque produce sueño.

En la física, podemos decir que la meta de esta ciencia es la de encontrar explicaciones de fenómenos naturales específicamente en términos de leyes generales o probabilísticas; o lo que es equivalente, la meta de la física se puede caracterizar como la de encontrar **leyes** por medio de las cuales se pueden dar esas explicaciones. Y no sólo explicaciones, pues conociendo las leyes físicas se pueden hacer también predicciones de fenómenos descritos por esas leyes de la misma manera en que se hacen explicaciones; es decir, deduciéndolas de esas leyes, en conjunto con ciertas condiciones iniciales. Vemos entonces que existe una conexión íntima entre predicción y explicación en física; y esta conexión se debe a la relación lógica –que hasta ahora sólo hemos mencionado– que tienen la predicción y la explicación con las leyes de esta ciencia.

I.3. El concepto de metodología

Sigamos con la palabra ‘metodología’. esta palabra es utilizada en una gran variedad de maneras, así que es necesario precisar un poco en qué sentido la usaré. La metodología de una cierta disciplina será, para nosotros, simplemente la descripción y análisis de los métodos utilizados en esa disciplina para encontrar y justificar leyes; y derivativamente, también el estudio de los conceptos, reglas, postulados y principios utilizados en esa disciplina, cuando éstos son pertinentes al estudio de los métodos utilizados en ella.

Dada esta aclaración sobre el significado de los términos *método*, *método de la física* y *metodología* es importante recalcar que no existe hoy día una teoría clara, precisa, sin serios problemas, acerca del método en la física que sea considerada substancialmente

adecuada por la comunidad de filósofos y físicos que trabajan en el problema. Esto puede parecer sorprendente ya que estamos hablando de la ciencia empírica más exitosa que ha creado el hombre, y que tiene más de trescientos años de relativa madurez. Hay mucha gente que cree que la metodología de la física es transparente, obvia; pero eso sucede para quien está satisfecho con una descripción metodológica superficial.

I.4. La concepción clásica del método científico

En mi opinión lo que existe son esquemas muy generales cuya estructura concuerda *grosso modo* con pasos fundamentales que se toman en la práctica de la física para encontrar leyes y teorías. Hay dos esquemas que son especialmente conocidos. El uno, un poco más antiguo, se ha llamado la *Concepción Clásica del Método Científico*. y el otro, una modificación del primero, se ha llamado el *Método Hipotético-Deductivo*. El primer método coincide, en su esencia, con la concepción de Newton. El lo llamó, entre otras, el método de análisis y síntesis que consiste de dos partes: **Análisis**, que para Newton consiste en hacer observaciones o experimentos y sacar conclusiones por medio de inducción (términos que estudiaremos más tarde); y **síntesis**, que para él consiste en comprobar las conclusiones obtenidas usándolas como principios de los cuales se deducen consecuencias, en últimas observables. Este método de análisis y síntesis ha tenido una evolución muy larga e interesante descrita entre otros por Guerlac en el artículo citado anteriormente. El método hipotético-deductivo será explicado inmediatamente después de elucidar las etapas de la concepción clásica.

Si lo que uno exige de una metodología de la física es una descripción detallada y fundamentada de los pasos necesarios a seguir para encontrar leyes empíricas y leyes teóricas relacionadas entre sí, y una *justificación* de esos pasos dados para hallarla, nos encontramos con que hay muchos problemas por explicar y conceptos que aclarar.

En la Figura 1 presento un esquema idealizado que he llamado *Estructura de una Teoría*. Se pueden ver tres diferentes niveles

de oraciones: Cualquier oración la represento por una línea horizontal corta con dos o más rectángulos sobre ésta que representan palabras o términos descriptivos; las palabras lógicas, comunes a toda oración, no las represento explícitamente. Si la oración es una ley ya sea general o estadística, principia con una **V** invertida que representa cuantificadores, que son expresiones como *Todo* o *Todos* o *En tal porcentaje de casos*. El nivel más bajo en la figura es el de las oraciones de observación, donde cada oración describiría una sola observación, y que contiene términos observacionales, que ya explicaré. el nivel intermedio es el de las leyes empíricas que se expresan con términos observacionales también, como puede verse, al indicarlos por medio del mismo tipo de rectángulos. El nivel más alto es el de las leyes teóricas que contienen términos teóricos. Entre las leyes teóricas y las empíricas se encuentra lo que Campbell llamó el *diccionario*, que define o relaciona términos teóricos con términos observacionales. La relación exacta entre los dos tipos de términos presenta problemas filosóficos y lógicos muy interesantes, algunos de los cuales mencionaré más tarde.

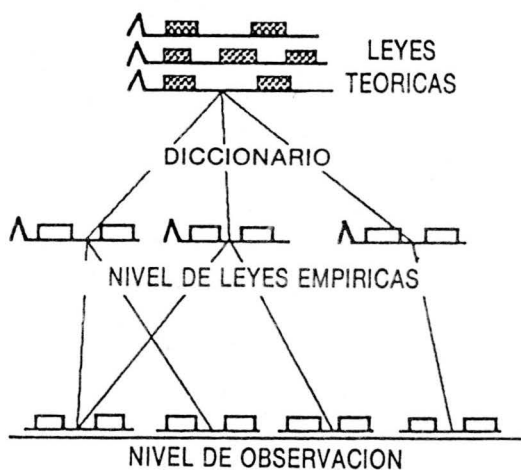


Figura 1. Estructura de una Teoría.

Brevemente por el momento, una teoría en física es un conjunto pequeño de proposiciones que contienen información supremamente básica sobre cierta clase de fenómenos naturales. [La palabra *teoría*

es ambigua: puede referirse a las leyes teóricas solamente, o a toda la estructura que muestro en la figura.] Del conjunto pequeño de proposiciones llamadas, como veremos, leyes teóricas, podemos *deducir* leyes empíricas. Y estas, a su vez nos permiten deducir oraciones observacionales y así, entender los fenómenos naturales en el sentido de explicarlos y predecirlos.

Las nociones de explicación y predicción que acabo de usar son las que mencioné arriba. Uno explica o predice un fenómeno deduciendo la descripción de este fenómeno de una ley empírica, y explica o predice una ley empírica deduciéndola de unas leyes teóricas. Esta concepción de explicación deductiva fue sugerida explícitamente y estudiada en detalle, aparentemente por primera vez, por John S. Mill y luego en este siglo por los filósofos Braithwaite, Hempel, Nagel y Popper. Lo que han hecho estos filósofos es lo que yo llamaría una definición explicativa. [Carnap la llama, en inglés, una *explication*, que no es lo mismo que *explanation*, la traducción usual de *explicación*.] Una definición explicativa (o *explication*) busca precisar un concepto de uso común pero vago; en este caso, precisar la estructura lógica y otras características fundamentales de las explicaciones paradigmáticas existentes en la física.

Históricamente, la metodología de la física de la Edad Media para acá parece haber sido principalmente *prescriptiva* primero (con los filósofos que mencioné hace un momento: Francis Bacon, Locke, Rene Descartes y Leibniz) y luego principiando por John Herschel (*Preliminary Discourse on the Study of Natural Philosophy*, Londres, 1830) *descriptiva* y *analítica*. Herschel desarrolla claramente y en una forma sofisticada la que llamamos la concepción clásica del método científico, que es principalmente la concepción de Newton, pero en Herschel también aparece la concepción del método hipotético-deductivo, que claramente no la tuvo Newton. Yo he añadido un paso a estas dos concepciones del método científico que normalmente no es incluido por la gran mayoría de filósofos de la ciencia —el requisito de formular las leyes matemáticamente— porque estos están interesados en exponer normas que sean aplicables a todas las ciencias, mientras que en este artículo, estoy únicamente

interesado en normas que rigen para la física. Y como la norma de describir matemáticamente las leyes físicas rige desde los tiempos de Galileo, yo la incluyo sin ningún escrúpulo.

Supongamos que estamos interesados en comprender un cierto grupo de fenómenos naturales. ¿Cuál debe ser nuestro método, según la concepción clásica (o según el método hipotético–deductivo) para encontrar las *leyes* o *teorías* físicas que nos puedan explicar los fenómenos de que hablamos? (Para simplificar nuestra descripción supongamos que estamos interesados ahora en leyes generales y no en leyes probabilísticas.) Nuestro método consta de 5 instrucciones o reglas o etapas. Llamémoslas, por conveniencia, las *etapas* metodológicas en la concepción clásica:

1. Etapa de observación: En esta etapa (supuestamente) *observamos* cuidadosa y exactamente todos los hechos que estamos interesados en entender.

2. Etapa de descubrimiento: Ya sea por medio de *inducción*, o de *abstracción*, formulamos una *generalización* o *ley*.

3. Etapa de matematización: En esta etapa, que puede ocurrir simultáneamente con la de descubrimiento, expresamos la hipótesis *matemáticamente*.

4. Etapa de deducción: *Deducimos consecuencias* observables de la hipótesis.

5. Etapa de comprobación: Comparamos las consecuencias observables de la teoría o ley con la experiencia y *confirmamos* la teoría si encontramos que concuerdan; o *desconfirmamos* la teoría si las consecuencias no concuerdan con la experiencia.

El **Método Hipotético–Deductivo** se puede describir usando los mismos nombres de las cinco etapas que acabamos de presentar. La única diferencia con la concepción clásica reside en la caracterización de la segunda etapa:

2(H-D). Etapa de descubrimiento: El investigador, *inventiva*, *crea* una hipótesis que presenta en forma de *generalización* o *ley*

En el método hipotético-deductivo se afirma que en esta etapa de descubrimiento no hay inducción o abstracción de ninguna especie. Según la mayoría de los exponentes de esta concepción, la creación de una hipótesis es un acto psicológico que no sigue un mismo método en diferentes ocasiones. Cada creación es un proceso único; y generalmente no es considerado de incumbencia del filósofo. Si alguien lo ha de estudiar, ha de ser el psicólogo. Cuando hablamos, entonces, de las etapas metodológicas de la concepción hipotética-deductiva, nos estamos refiriendo a las etapas 1, 2(H-D), 3, 4 y 5.

En la Figura 1A he colocado representativamente las etapas metodológicas sobre el esquema de la estructura de una teoría de tal modo que den una idea de la relación que existe entre las etapas y la teoría.

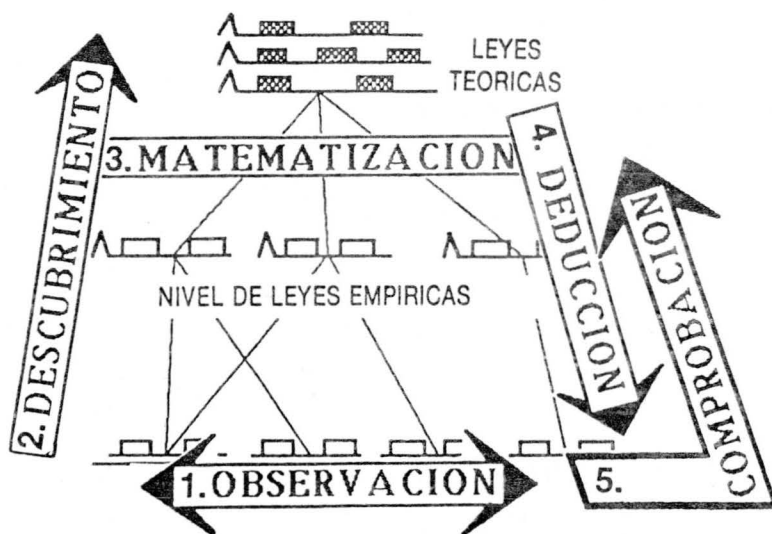


Figura 1A. Estructura de una Teoría.

II. Etapa de Observación

Uno pensaría que la primera regla de Herschel –observar los hechos– es la menos problemática de todas. En esto estaría muy bien acompañado, pues desde los empiristas ingleses –Locke, Berkeley y Hume– hasta los empiristas lógicos en este siglo, han pensado que no hay problemas con la observación (más allá de los errores que ocasionalmente cometemos). Que el mundo es como lo vemos, oímos, sentimos Que si algo está dado en nuestra experiencia, que si en algo podemos confiar, es en la información que entra por los sentidos de un individuo saludable y normal. Los empiristas ingleses postularon como uno de los principios fundamentales de su filosofía que todas nuestras ideas válidas provienen directa o indirectamente de nuestros sentidos. Si alguna idea no es rastreable a ideas primitivas directamente ligadas a nuestros sentidos, esa idea no es aceptable. (Hoy día, en vez de hablar de ideas hablaríamos de conceptos o referentes de nuestras palabras descriptivas.) Los empiristas lógicos, aunque ya no aceptaron el principio de los empiristas ingleses, postularon a su vez que cualquier proposición empírica verdadera tiene que ser equivalente o reducible a oraciones observacionales [nótese el cambio de *concepto* a *proposición*, donde la proposición es *el significado de una oración*]. En otras palabras, para estos dos grupos de empiristas radicales no solo no hay problemas de ninguna especie con las observaciones sino que son la base sólida, indudable e *inmodificable* de todos nuestros conocimientos sobre el universo. El problema que llevó a los mismos empiristas lógicos a debates sin fin fue la duda sobre qué precisamente constituye los datos inmodificables, fundamentales de observación: si son los más inmediatos a nuestros sentidos (los llamamos, en inglés, *sense-data*), o si son ya percepciones, o algo intermedio entre los dos. Dejemos este problema en ese punto –ya volveremos a él– y miremos otro acceso al problema de la observación: el de los psicólogos.

Supongamos que en un momento dado observamos algo, cualquier fenómeno observable, y que describimos esa *experiencia* por medio

de una *oración* de observación, la cual consideramos verídica. Nos concierne el problema de si esa oración describe el mundo como el mundo es. Parece absurda la pregunta pues ya dijimos que la oración era verídica, y eso significa por definición que lo que dice es un hecho. Sin embargo, consideremos algunas figuras que los psicólogos han estudiado cuidadosamente (ver Figura 2) [y aquí presento excusas a los psicólogos que estoy seguro dirían lo que yo voy a decir de una manera más adecuada].

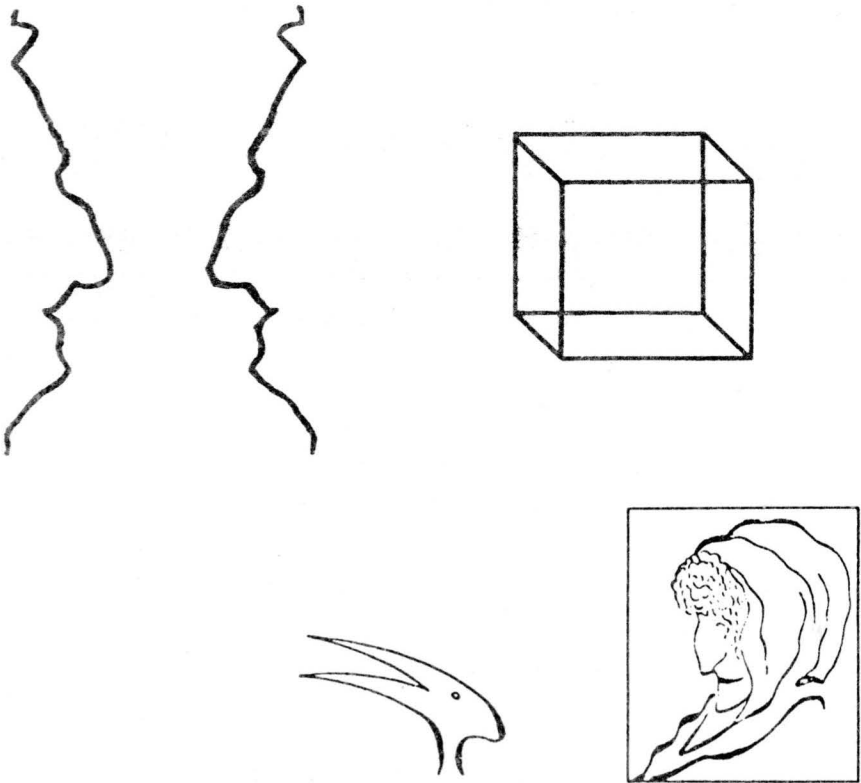


Figura 2.

Estas figuras son ambiguas en cierto sentido y representan claramente al observador el fenómeno que los psicólogos han llamado paradojas de la percepción que estoy seguro todos ustedes conocen, pero quizás algunos no se hayan dado cuenta de las implicaciones

tan importantes que tiene la existencia de esas figuras:

La **primera** se puede ver como un jarrón o como dos caras mirándose una a otra.

La **segunda** un cubo al que le vemos directamente las caras inferior y derecha, o las caras superior e izquierda.

La **tercera** un ciervo o un pájaro.

La **cuarta**, a veces una mujer joven y bella; y a veces una mujer vieja y fea.

Los psicólogos conocen muchas de estas figuras paradójicas, pero he considerado que unas pocas son suficientes para mostrar el fenómeno de que hablo. Estas figuras demuestran, a cualquier individuo que personalmente pueda verlas de más de una manera, que por lo menos a veces, dada una cierta sensación a nuestros sentidos (en este caso, presentada una cierta configuración a nuestros ojos) es posible organizarla, verla, percibirla de maneras diferentes.

¿Pero serán estas figuras ambiguas casos aislados, raros, en los que se obtienen diferentes percepciones de una misma sensación? ¿O es ésta una experiencia más o menos común? En mi opinión, cualquier persona que le ponga atención a sus propias percepciones se dará cuenta que de vez en cuando interpreta, por ejemplo un sonido, erróneamente, digamos oyendo una canción cuando la fidelidad no es excelente. Y lo que es importante es que la interpretación errónea es concreta; es una palabra u oración real que se cree es lo que se dijo u oyó, y que sólo más tarde el intérprete se da cuenta es un error. Casos de visión también abundan, y son más comunes cuando la iluminación es pobre, o cuando no se tiene muy buena vista. Las sensaciones se interpretan erróneamente, se perciben erróneamente (el punto clave es que se interpretan o perciben las sensaciones como algo *concreto, real*. La persona que percibe erróneamente cree que lo está haciendo correctamente). Y este hecho muestra clarísimamente que ha habido una intervención de nuestra mente entre una sensación y lo que nosotros juzgamos que observamos, pues de otra

manera no podría haber percepciones erróneas. (Nótese, quizás en la figura superior izquierda, que inicialmente, en los primeros instantes de observación, pudimos haber visto sólo dos líneas quebradas trazadas de arriba hacia abajo, sin haberles dado ninguna interpretación. Sólo instantes más tarde, las interpretamos en una de las dos maneras que sugerimos antes. Esa primera experiencia es lo que llamaríamos la sensación original que nos produce la figura, antes de ser percibida, o sea, interpretada.)

En los casos de las figuras que acabamos de mostrar las varias maneras de verlas son igualmente aceptables. Poniendo esta idea en términos de oraciones, la oración, *En la primera figura aparece un jarrón* es tan verdadera como la oración, *En la primera figura aparecen dos caras mirándose*. Si no hubieramos experimentado en carne propia el percibir sucesivamente dos diferentes objetos de una sensación única y aplicáramos a esta situación las normas aparentemente lógicas a que hemos estado acostumbrados con respecto a cualquier observación, diríamos que una de dos: o el objeto es un jarrón, o son dos caras mirándose, pero no los dos. El que, en cierto sentido, percibamos los dos objetos tiene implicaciones profundamente interesantes para nuestra concepción de lo que es la observación, pues es claro que el postulado fundamental de los empiristas radicales –que las oraciones de observación son la base inmodificable de todos nuestros conocimientos sobre el mundo físico– no es tan sólido, tan indudable como ellos pensaban, pues hemos encontrado casos donde el postulado empirista es claramente dudoso. *No hay duda* que en estos casos de las figuras ambiguas, una oración de observación dada puede ser cierta o falsa según la interpretación perceptual que le dé el observador.

Como he dicho, los psicólogos conocen muchos ejemplos de paradojas de percepción. Tal vez con su evidencia, el lector acepte que la observación no es tan simple ni tan indudable como lo suponían los empiristas clásicos. Quizás entonces, una duda se puede presentar. ¿No será posible, quizás probable, que cuando observamos el mundo, lo que creemos que observamos pueda bien ser una de de muchas otras posibles percepciones?: ¿una de muchas otras posibles

organizaciones de algo supuestamente dado psicológicamente más elemental, que nosotros inconscientemente estemos interpretando según nuestras creencias, nuestras enseñanzas, nuestras expectativas? ¿Y que lo que nosotros vemos de una manera más tarde lo veamos de otra?

Un ejemplo muy valioso, casi único —pues éticamente sería inaceptable reproducirlo— que también parece demostrarnos que la observación es tremendamente compleja, dependiendo en parte de nuestras creencias; y que las oraciones observacionales no son tan indudables como a primera vista parecen —y en este caso a un nivel todavía más básico, sensorialmente hablando, que las figuras arriba mostradas— lo constata las experiencias de gente nacida ciega que ha recobrado la vista ya de adulta. El biólogo John Z. Young, en su libro, *Duda y certitud en la Ciencia, las Reflexiones de un Biólogo Sobre el Cerebro*, relata las experiencias de individuos nacidos con cataratas y mucho más tarde, operados de estas ya de adultos, cuando se descubrió la técnica de la operación:

¿Qué diría tal persona? ¿Qué diría al abrir los ojos por primera vez a un mundo nuevo? Durante el presente siglo la operación ha sido efectuada con suficiente frecuencia para haberse coleccionado informes sistemáticos y precisos. El paciente, al abrir los ojos por primera vez, siente o poco, o ningún placer; en realidad encuentra que la experiencia es dolorosa. El informa sólo de un conglomerado de luces y colores girando. El se demuestra incapaz de escoger objetos visualmente, de reconocer qué son, o de nombrarlos. El no tiene ninguna concepción de un espacio con objetos en él, aunque lo sabe todo con respecto a objetos y sus nombres al tacto. Naturalmente, usted dirá, le tomará su tiempito aprender a reconocerlos por medio de la vista. No un tiempito, sino mucho, mucho tiempo; en realidad, años. Su cerebro no ha sido entrenado en las reglas de ver. Nosotros no estamos conscientes de que existen esas reglas; nosotros creemos que vemos, como diríamos, naturalmente. Pero en realidad hemos aprendido un gran número de reglas durante la

niñez.²

Más adelante nos describe Young algunas experiencias específicas de estos individuos nacidos ciegos.

Un hombre, cuando se le mostró una naranja una semana después de principiar a ver dijo que era dorada. Cuando se le preguntó, *¿Qué forma tiene?*, dijo, *¡Déjeme tocarla y le digo!*. Después de hacerlo dijo que era una naranja. Luego la miro por un buen rato y dijo: *Sí, puedo ver que es redonda*. Cuando se le mostró inmediatamente después un cuadrado azul dijo que era azul y redondo. Un triángulo también lo describió como redondo. Cuando se le mostraron los ángulos, dijo, *¡Ah!, sí, ya comprendo, uno puede ver como se siente al tacto*.

Vale la pena mencionar aquí que uno de los debates filosóficos más activos sobre la física contemporánea —específicamente en la mecánica cuántica— concierne al problema de si esta mecánica en últimas nos dice algo sobre el mundo, o si lo que nos dice es sobre nuestra manera de observar el mundo.

Pasemos ahora a otro problema de las oraciones de observación. El problema más natural que nos viene a mente después de considerar las paradojas de la percepción y las experiencias de los que fueron ciegos: *¿De qué depende, qué determina la manera cómo organizamos un grupo de sensaciones elementales?*

Los filósofos de la ciencia Mary Hesse y Paul Feyerabend, siguiendo las inquietudes con respecto a la base empírica del lenguaje observacional expresadas por los filósofos Pierre Duhem en *La Meta y Estructura de la Física* (1906), Norman R. Campbell en *Fundamentos de la Ciencia* (1920); y Willard V. O. Quine en varios de sus ensayos, han presentado argumentos muy convincentes que defienden la tesis de que todo lenguaje observacional está impregnado de teoría. Es decir, que todas las palabras de observación implican una teoría. Feyerabend ha usado ejemplos históricos para mostrar cómo ciertas palabras usadas en diferentes épocas tienen significados diferentes debido a cambios en teoría. Por ejemplo, *luz* y

²Traducción del autor.

pesado tienen diferente significado para Aristóteles y para Newton. La palabra *masa* tiene diferente significado para Newton y para Einstein.

Mary Hesse ha presentado argumentos sutiles cuyo objeto es demostrar la dependencia de todo adjetivo en teoría. Me limito a dar algunos ejemplos de palabras cuya dependencia en teoría es obvia: *radioactivo, metálico, transistor, genético, neurótico, psicótico, aislante, magnético, vitaminas, carbohidrato, proteína, enzima, antibiótico, etc.* No es fácil mostrar tal dependencia para un adjetivo arbitrario, pero para otros, como por ejemplo, *rojo* sí se me ocurre cómo se podría mostrar esa dependencia. Un esquema de cómo demostrarlo consistiría en considerar imaginativamente las necesidades y las circunstancias de la creación de ese concepto por algún individuo, hace miles de años. El tuvo que ver similitud de color entre varios objetos unos con otros y quiso agruparlos de determinada manera, obviamente no muy precisa, pero definitivamente arbitraria, pues por un lado, en la mayoría de los casos, hay diferencias observables en el color de dos o más objetos clasificados en nuestra cultura como rojos; y por otro, hay culturas con sólo tres colores donde nosotros usamos seis o siete. Hay otra cultura —la de los esquimales— que usan muchas distinciones de color donde nosotros usamos sólo el color blanco; demostrando, que podemos, si queremos, utilizar muchas más distinciones para una sola agrupación de color. En resumen, en el caso de los colores, es bastante evidente que la mente humana inventa esquemas —pequeñas teorías— de cómo clasificar objetos, y que la naturaleza no nos obliga a las clasificaciones que hacemos, aunque claramente, tiene que haber cierta correspondencia para que la clasificación sea útil.

Del análisis de la primera etapa en la concepción clásica de la física, hemos sacado dos conclusiones importantes, aunque naturalmente, sin profundizar en demostrarlo: Primera, que si en nuestra experiencia hay algo dado a nuestros sentidos, ese algo puede ser organizado de más de una manera aunque nosotros normalmente no nos damos cuenta de ese hecho. Segunda, que cuando describimos cualquier observación, lo hacemos en función de términos impregna-

dos de las teorías presentes y pasadas sobre el mundo y sus objetos.

Hay también un importante cambio en la visión que se tiene de una teoría. Los individuos que primero visualizaron una teoría física en la forma que presenté arriba bajo el nombre de *Estructura de una Teoría* juzgaban el nivel de observación como un ancla rígida y fija a la experiencia sensorial; como la base epistemológica absoluta de una teoría. Con las consideraciones que hemos hecho en esta sección, nuestra visión ha cambiado cualitativamente. La base epistemológica de las teorías; su necesaria conexión a la experiencia sigue siendo el nivel de observación. Pero es ahora una base más fluida, menos precisa, más dependiente del observador.

Entramos ahora a analizar la segunda etapa en la concepción clásica del método científico en la física, la del descubrimiento o creación de hipótesis. Aquí también encontraremos problemas metodológicos serios que están en proceso de estudio y desarrollo.

III. Etapa de Descubrimiento o Creación de Hipotesis

III.1. Leyes empíricas y leyes teóricas

Esta es una etapa misteriosa, la etapa creativa que probablemente nadie entiende bien. Sin embargo, para entender en qué consiste la etapa es necesario, por un lado, conocer la diferencia entre leyes empíricas y leyes teóricas, que está relacionada a otra distinción valiosa, sobre tipos de descubrimiento científico, a la cual hemos aludido en lo anterior, que hizo Thomas Kuhn en su obra, *La Estructura de las Revoluciones Científicas*.

La diferencia fundamental entre una ley empírica y una ley teórica tiene que ver con la palabras descriptivas que aparecen en éstas, es decir, con los conceptos que se usan para expresarlas, que se puede captar esquemáticamente en la Figura 1 que vimos anteriormente. Una ley empírica es una ley cercana a la experiencia sensorial. Por lo tanto es una ley cuyos términos descriptivos son cercanos a la experiencia sensorial. Por otro lado, es claro que de las leyes teóricas expresadas en términos teóricos es lógicamente imposible deducir directamente alguna oración que contenga términos

diferentes a los teóricos iniciales. En una deducción estrictamente lógica no pueden aparecer términos nuevos, diferentes a los iniciales, a menos que se introduzcan éstos por medio de definiciones que relacionen los nuevos a los iniciales. Esto es lo que hace imperativo la existencia de algún tipo de Diccionario que relacione los términos teóricos a los empíricos. Hans Reichenbach llama este tipo de relaciones, *definiciones coordinativas*; Rudolf Carnap las llama reglas de correspondencia.

Aunque hemos visto que no existen conceptos puramente observacionales y que los más cercanos a la experiencia son parcialmente teóricos, ese hecho no invalida el que haya conceptos que se acerquen a la experiencia sensorial mucho más que otros, y que la distinción sea muy útil.

Un ente teórico o una propiedad teórica es algo inobservable directamente por medio de nuestros sentidos. Por ejemplo, *el campo eléctrico, la función de onda, un electrón, un neutrino, el espín de cualquier partícula elemental, y aun la energía o la entropía de un objeto*. Una ley teórica es por lo tanto una ley que contiene por lo menos un término teórico. Por ejemplo, las ecuaciones de Maxwell que contienen términos que se refieren a las intensidades de los campos eléctricos y magnéticos son leyes teóricas.

Aunque la distinción entre términos teóricos y observacionales es en extremo útil, el hecho de que los términos observacionales sean siempre parcialmente teóricos nos obliga a no esperar una distinción tajante entre los dos, y nos lleva a encontrar toda una gama de conceptos desde puramente teóricos a casi puramente observacionales. Conviene añadir, que según el contexto, estos conceptos intermedios en la distinción teórico observacional pueden parecernos en un momento dados teóricos y en otro observacionales. Por ejemplo, el concepto *presión* tiende a ser teórico dentro de la mecánica Newtoniana, pero observacional dentro de la teoría cinética de los gases. En mecánica Newtoniana, *presión* es *fuerza por unidad de área*, donde *fuerza* es un término teórico que aparece en la Segunda Ley de Newton. En la teoría cinética de gases, en contraste, todas las características cinemáticas de las moléculas que componen un gas

son inobservables y por lo tanto teóricas; mientras que la presión, en esa teoría, se considera como la conexión con la experiencia, medida posiblemente con un instrumento tan práctico y observable como un manómetro. Dada esa clarificación, podemos decir que una ley empírica es una generalización que se expresa en términos de conceptos que la comunidad de físicos considera, en el contexto del momento, como observacionales. Por ejemplo, *todos los metales, cuando se calientan se expanden*, es una ley empírica en casi cualquier contexto; pero *fuerza es igual a masa por aceleración* se puede considerar como una ley intermedia en la distinción teórica-observacional. Para estudiantes aprendiendo física, es claramente teórica; para físicos de larga trayectoria, es muy cercana la experiencia. Lo mismo se puede decir, y se dice, de cualquier ley o leyes que conecten *presión, calor, volumen, temperatura* o *trabajo*. Muchos físicos aseveran que la termodinámica es una ciencia puramente empírica, sin darse cuenta que en muchos contextos cada uno de los términos fundamentales que usa, como son *presión, volumen, calor, temperatura, trabajo* y ciertamente *entropía*, requieren de un estudio detallado y cuidadoso para ser entendidos claramente. ¡Sería extraño –aunque no contradictorio– que uno tuviera que someterse a un estudio minucioso para poder entender los términos puramente observacionales!

Dada esta corta explicación de la diferencia entre leyes empíricas y teóricas, debemos notar, antes de seguir adelante, el problema tan serio y difícil que las conclusiones a que llegamos en la sección sobre observación presentan para la construcción de teorías (en el sentido de conjuntos de leyes teóricas) en esta etapa de descubrimiento: El problema consiste en que al construir una nueva teoría sobre un campo determinado, el presente lenguaje observacional –o aun teórico– en ese campo –que en este momento se usa para describirlo– va a ser modificado drásticamente por la teoría que se tendrá que introducir. En otras palabras, ¡el físico teórico que quiere desarrollar una teoría fundamental, una teoría revolucionaria, confronta el problema que su teoría será expresada por medio de conceptos que en el momento no existen! ¡Y esos conceptos teóricos tendrán

que ser relacionados a conceptos observacionales que en el momento no se tiene idea cuáles puedan ser! Por eso es que construir una nueva teoría —una teoría básica, revolucionaria— es uno de los retos más difíciles que se le puede presentar a la mente humana. (Eso decía Newton, comparando su trabajo en física con su trabajo en matemáticas).

III.2. Ciencia revolucionaria y ciencia normal

En sus teorías sobre el desarrollo de la ciencia, Thomas Kuhn distingue varios tipos de descubrimiento de los cuales dos son, desde el punto de vista metodológico, especialmente importantes. El uno tiene que ver con cambios revolucionarios, fundamentales en la ciencia. En éstos, se postulan teorías básicas realmente originales —que cambian drásticamente nuestra visión del mundo en los campos relevantes a éstas—. Las nuevas teorías siempre traen consigo conceptos nuevos, revolucionarios, como corresponde a nuevas maneras de organizar nuestra experiencia. La transformación en nuestra visión u organización conceptual del campo relevante es un proceso análogo al cambio de Gestalt que nos ocurre cuando al mirar una de esas figuras que usamos para ilustrar las paradojas de la percepción, de repente se nos invierte la manera de verla. En el caso de una revolución científica la transformación es más global, concierne una región mucho más amplia de la experiencia; pero la transmutación de visión es cualitativamente similar en el sentido de que lo que antes se organizaba de una determinada manera, ahora se organiza de otra que puede ser drásticamente diferente, como sucede en el paso de la mecánica clásica a la mecánica cuántica. Otros ejemplos de este tipo de descubrimiento (o creación) son: Las teorías dinámica y gravitacional de Newton, la Teoría Electromagnética de Maxwell, las Teorías Especial y General de la Relatividad de Einstein. Pero hay muchas otras, no tan importantes, que también traen consigo revoluciones conceptuales como fue por ejemplo el principio de la propagación rectilínea de la luz en la que aprendimos a concebir la luz, y muchos fenómenos asociados con ésta, como son las sombras, de una manera totalmente diferente a la que existía.

Cuando una etapa revolucionaria ha concluido, la ciencia en cuestión entra en otra etapa que Kuhn ha llamado la etapa de Ciencia Normal. Este es un período durante el cual la nueva visión es en general aceptada, y el campo que concierne a esa ciencia se empieza a investigar bajo esta nueva visión. Es un período de *resolución de rompecabezas*, como lo llama Kuhn. Sus características principales son dos. Por un lado, no hay cambios importantes en cuanto a conceptos; se siguen utilizando los mismos conceptos que la nueva teoría introdujo. Por otro, el crecimiento de la ciencia en estos períodos de ciencia normal se puede considerar como una acumulación de conocimientos, pues los problemas que se plantean y luego se resuelven, están todos lógicamente relacionados entre sí por la nueva teoría; son consistentes unos con otros. En contraste, los períodos de revolución científica no son períodos de acumulación de *conocimientos*, pues las teorías anteriores y otras doctrinas asociadas con ellas se descartan, o por lo menos no se consideran *verdaderas*, y se reemplazan por la nueva teoría. Descubrimientos o creaciones importantes en la física que pertenecen a períodos de ciencia normal son por ejemplo: el descubrimiento de Kepler que los planetas se mueven en órbitas elípticas; el descubrimiento del átomo nuclear de Rutherford; los descubrimientos teóricos sobre la superconductividad. Esto debe ser suficiente sobre la distinción de Kuhn.

III. 3. Newton y sus reglas de razonamiento

Dado que Newton formuló algunas instrucciones metodológicas de gran valor en esta etapa de creación, y dado que esta etapa es seriamente problemática, quiero incluir las instrucciones de Newton. Aunque tres de ellas, las primeras, son de diferente categoría a las etapas metodológicas que estamos considerando –y han sido llamadas principios metacientíficos o artículos básicos de fe científica– no cabe duda que introducen conceptos metodológicos importantísimos. A estas instrucciones Newton las llamó *Reglas de Razonamiento en Filosofía*:

1a. Regla. *No debemos admitir más causas de cosas naturales que las que sean verdaderas y suficientes para explicar las apariencias.*

Esta regla es en esencia la regla de economía o de simplicidad en la formulación de hipótesis. Según parece, fue formulada originalmente por Guillermo de Occam (1285–1349) a principios del siglo XIV y es llamada hoy día *la cuchilla de Occam*. Newton hace el siguiente comentario sobre esta regla: *Los filósofos dicen que la Naturaleza no hace nada en vano, y más es en vano cuando menos sirve; pues la Naturaleza se alegra de la simplicidad.* Relacionado con esta primera regla de Newton, está el problema de la simplicidad, uno de los problemas más difíciles que han encontrado los filósofos en su análisis del método científico. Este problema consiste de dos fases fundamentales: por un lado, el problema de definir *simplicidad*; y por el otro, el de tratar de explicar por qué leyes intuitivamente sencillas parecen ser correctas más frecuentemente que leyes complejas.

2a. Regla. *A los mismos efectos debemos asignar las mismas causas, siempre que esto sea posible.*

Esta regla ha sido llamada *el principio de analogía*. Newton da ejemplos de ella: *[Le asignamos las mismas causas a] la respiración en un hombre y en una bestia; a la caída de piedras en Europa y en América; a la luz [producida por] la llama con que cocinamos o por el Sol.*

3a. Regla. *La característica de los cuerpos que no tienen grados de aumento o disminución, y que son poseídas por todos los cuerpos observables experimentalmente, deben ser consideradas características de todos los cuerpos en el Universo.*

Esta tercera y profunda regla nos da el criterio de Newton para clasificar características como más o menos básicas: entre más básica una característica, más cuerpos la poseen.

4a. Regla. *En filosofía natural, las proposiciones a las que se ha llegado por medio de inducción general deben ser consideradas exactas o aproximadamente ciertas, aunque se pueda uno imaginar hipótesis contrarias, hasta tal día que otros fenómenos ocurran, que nos obliguen a hacerlas más exactas o sujetas a excepciones.*

En esta regla Newton nos dice que debemos darle más validez a nuestras leyes empíricas que a las teóricas, y que las empíricas sólo deben ser modificadas por resultados empíricos. Dejemos aquí las reglas de Newton por el momento.

Teniendo en mente ahora las distinciones que hicimos entre leyes teóricas y leyes empíricas, y entre ciencia normal y ciencia revolucionaria, es obvio que el descubrimiento de una ley empírica va a ser claramente diferente al descubrimiento de una ley teórica.

III.4. Descubrimiento de leyes empíricas

Por muchísimos años se ha pensado que el descubrimiento de una ley empírica consiste en una inferencia inductiva (o inducción) del siguiente tipo: Los objetos de tipo A que hemos observado, tienen característica B (también observable). Por lo tanto (inferimos inductivamente que) *todos* los objetos de tipo A tienen característica B. Un ejemplo de una inferencia inductiva –cuya conclusión podemos considerar como ley natural empírica– es la siguiente. Todos los seres humanos que hemos podido observar –o todos los mamíferos que han vivido– y no están vivos ahora, han muerto. Por lo tanto, todos los seres humanos –o mamíferos– que hoy día vivimos, moriremos. (Dese cuenta el lector de la enorme seguridad que tenemos en la conclusión de esta inferencia inductiva –o de muchas otras que el lector puede suplir.) Parece fácil y natural descubrir leyes por este método. Sin embargo, los que han intentado utilizar este método directo de descubrir leyes han encontrado que es muy difícil hallar cualquier relación que valga la pena. ¿Por qué es tan difícil? Tal vez porque la relación buscada debe ser fructífera, e importante, pues hay múltiples leyes que son triviales. Por ejemplo, el hielo se derrite en agua hirviendo, es trivial y no

muy útil. Y aquí no estoy seguro en qué consiste que una ley resulte *importante*. Sospecho que las características a que se refiere la ley deben ser *básicas* en el sentido especificado por Newton en su 3a. Regla. Pero puede haber mucho más.

Robert Boyle, por ejemplo, encontró que *en gases a temperatura constante la presión multiplicada por el volumen del gas es constante*. Esta ley, que se podría llamar empírica si no somos muy estrictos con nuestro criterio sobre propiedades observacionales, y que parece tan simple, ha inmortalizado a Boyle. ¡Y lo ha inmortalizado porque los químicos y físicos saben que leyes como esta son tremendamente difíciles de hallar!

Hoy día, la mayoría de los filósofos de la ciencia mantienen que el método inductivo de que hablé arriba no es el método por el cual se descubren las leyes físicas. Lo que ocurre, según ellos, es que el físico hace una conjetura, es decir, tentativamente sugiere una hipótesis, y luego procede a ponerla en prueba. Esta idea, de que por medio de conjeturas se descubren una gran mayoría de las leyes tiene mucho sentido, particularmente porque la hipótesis nos da un *criterio de pertinencia*. Ya no es observar cientos de características que objetos de muchos tipos pueden poseer, sino solamente aquellas que su hipótesis supone que están relacionadas entre sí. Esta teoría del método, en la que no se efectúan inducciones en el descubrimiento, sino más bien se intuyen, se sugieren hipótesis es precisamente el llamado método hipotético-deductivo al cual me referí anteriormente. La única diferencia entre la concepción clásica del método científico y la concepción hipotético-deductiva es que esta última no admite inducción de ninguna especie en la etapa de descubrimiento mientras la primera sí. Podemos aceptar, creo yo, que en los descubrimientos de una gran mayoría de leyes empíricas el método hipotético-deductivo describe más adecuadamente lo que ocurre que la concepción clásica.

III.5. La lógica del descubrimiento

La gran mayoría de filósofos de la ciencia ha mantenido que no es de su incumbencia el cómo se descubre una hipótesis; que le

corresponde a los psicólogos estudiar este tipo de actividad mental; no a los filósofos. A los filósofos les corresponde analizar solamente las justificaciones que se dan de la hipótesis. Es decir, analizar la validez de argumentos cuyas premisas son la evidencia que se tiene y la conclusión es la hipótesis. Sin embargo, algunos filósofos, muy pocos, mantienen que existe un método, una lógica precisamente en esta etapa de descubrimiento donde la mayoría cree haber sólo un salto genial de la experiencia a la hipótesis. Mencionaré brevemente ahora dos esfuerzos valiosos e interesantes que buscan elucidar esta etapa misteriosa de descubrimiento.

El primero es Charles S. Peirce (1839–1914), ignorado pero brillante filósofo norteamericano. El consideró este salto a la hipótesis como un raciocinio en dirección opuesta a una implicación de tipo: *[Si H, entonces O]*, donde *H* y *O* son oraciones, *H* una hipótesis y *O* una oración observacional verídica. Supongamos que *H* implica lógicamente a *O*. Es decir que de *H* se puede deducir *O* por medios puramente lógicos. En lo que Peirce llamó una *retroducción*, hacemos el razonamiento al contrario, de *O* a *H*. Conociendo *O*, encontramos imaginativamente una *H* que implique *O*. Pero naturalmente no podemos tener ninguna seguridad que *H* sea cierta, *aunque O lo es*. El problema de la confianza que debemos tener en que *H* sea verdadera, es el problema fundamental de la última etapa metodológica de la concepción clásica: La etapa de comprobación, que veremos luego.

¿Qué clase de validez se le puede atribuir a la retroducción —es decir a conjeturar la hipótesis— pregunta Peirce? Observe, dice él, que todo avance científico lo produce la retroducción por medio de conjeturas espontáneas (ni la deducción ni la inducción producen conocimientos según él); y esas conjeturas espontáneas son intuitivas. La función natural del hombre, dice Peirce, es concretar ideas generales en creaciones de arte, en herramientas, y por encima de todo en conocimiento teórico. La razón por la cual el hombre con cierta frecuencia ejecuta retroducciones correctas es que él posee una propensión, una disposición natural que concuerda o armoniza con la naturaleza. Según Peirce, entonces, el salto de retroducción

es instintivo, y su validez ocasional proviene de una cierta armonía que tenemos con la naturaleza. Y con esas ideas fascinantes, dejamos a Peirce.

Tal vez el filósofo que más ha defendido y analizado la tesis de Peirce –y de Aristóteles antes de Peirce– de la existencia de una lógica de descubrimiento es Norwood R. Hanson (1924–1967). El sugiere que existe una diferencia *lógica* entre

1. Razones por las cuales se acepta una hipótesis H, y
2. Razones por las cuales se sugiere la hipótesis H, en primera instancia.

Hanson defiende la tesis de que la sugerencia de una hipótesis es frecuentemente una acción razonable: hay buenas razones y malas para proponer una hipótesis. El salto de observaciones a hipótesis que hace un físico competente no es un salto al azar, sino un salto dirigido a metas razonables.

Según Hanson, las razones por las cuales uno acepta H son aquellas que le hacen pensar que H es *verdadera*, pero las razones por las cuales uno *sugiere* la hipótesis H son aquellas que le hacen pensar que H es una *conjetura plausible*. Y Hanson mantiene que estos dos tipos de razones son, con frecuencia, fundamentalmente diferentes; no psicológica o sociológicamente diferentes sino lógicamente diferentes. Por ejemplo, dice Hanson, uno puede *sugerir* H: 1, como resultado de un argumento analógico (de los cuales hablaremos en breve). 2, como resultado de consideraciones de simetría. 3, apelando a alguna autoridad en la materia. Cada una de estos tipos de razones nos sugiere que H es plausible. Pero este tipo de razón no es aceptable como justificación de que H sea verdadera. Para justificar H se requieren ciertas observaciones a las cuales H está relacionado inductivamente. Esta tesis de Hanson es hoy día activamente debatida y estudiada. El punto clave en debate es si la diferencia entre razones para sugerir una hipótesis y razones para justificarla es lógica o no.

III.6. Modelos y descubrimiento de leyes teóricas

En esta etapa del descubrimiento hemos estado hablando casi exclusivamente de la naturaleza y problemas en el descubrimiento de leyes empíricas; nos hace falta tratar el problema del descubrimiento de leyes teóricas, que normalmente consiste en inferir (de alguna manera) leyes teóricas de leyes empíricas conocidas. Podemos suponer, eso sí, que las tesis de Hanson y de Peirce no se referían únicamente al paso de observación a leyes empíricas sino que también incluían este segundo y más problemático paso. En la inferencia a la que nos estamos refiriendo ahora se quiere encontrar leyes teóricas –es decir, una teoría– que explique las leyes empíricas que suponemos existen, y que prediga nuevas leyes empíricas también. Es evidente que en la historia de la física, con mucha frecuencia, se han encontrado dichas leyes teóricas de las cuales se pueden deducir las leyes empíricas existentes y otras también; y con menos frecuencia, también se han encontrado leyes teóricas a niveles más abstractos, más generales, que explican las leyes teóricas a niveles inferiores. Hoy día se podría decir con justicia que el objetivo primordial de muchos físicos teóricos es encontrar teorías del segundo tipo. Por ejemplo, la recientemente creada teoría de supercuerdas, de la cual hemos escuchado mucho hasta el momento. Esta es una de muchas teorías unificadoras que se han estado sugiriendo en los últimos años. Pero nuestro problema es *¿Cómo se descubren esas leyes teóricas?* El paso inductivo, que para leyes empíricas parece a veces tan natural, está vetado ahora puesto que hay un cambio de lenguaje al pasar de leyes empíricas –expresadas en función de conceptos empíricos o semi-empíricos– a leyes teóricas –expresadas en función de términos teóricos–. Y la retroducción de Peirce también hay que considerarla improbable debido a ese mismo cambio de lenguaje.

Parece ser, que en la inmensa mayoría de los descubrimientos de teorías –si no en todos– han sido usados entes conceptuales llamados modelos que por medio de analogías han ayudado en la concepción y el desarrollo de esas teorías.

Doy dos ejemplos: Cuando James Maxwell estaba tratando de unificar y matematizar lo que se sabía sobre electricidad y magnetismo en una sola teoría, él concibió un campo eléctrico, como un fluido. Figura 3; concibió las líneas de fuerza sugeridas por Faraday, como si fueran tubos por los cuales pasaba el fluido; y concibió las cargas eléctricas, como fuentes o sumideros de ese fluido. Luego, asoció intensidad de campo eléctrico con la velocidad del fluido. El fluido, con sus tubos, fuentes, sumideros y velocidades –todos objetos o características descriptivas fácilmente de acuerdo con las leyes de la mecánica ya conocidas– constituyó parte del modelo que le sirvió a Maxwell para encontrar la teoría físico-matemática del campo electromagnético. Esta hazaña lo mostró al mundo como uno de los más grandes físicos de todos los tiempos.

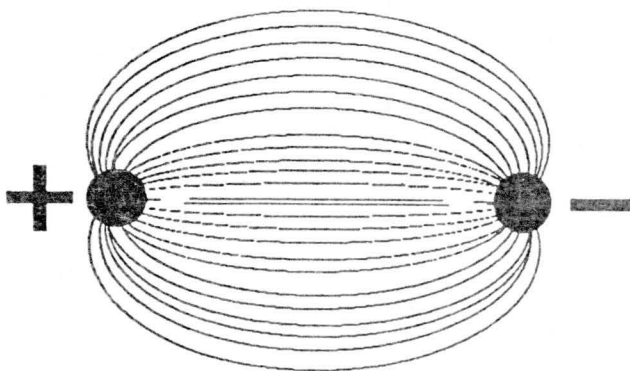


Figura 3. Líneas de fuerza de Faraday o tubos de fluido de Maxwell.

Segundo ejemplo: En la teoría cinética de gases se hipotetiza que un gas es *como* un conglomerado de esferitas elásticas, cada una con masa, posición, y velocidad, que se mueven en todas direcciones y chocan unas con otras y contra las paredes del recipiente en que se encuentra el gas, si está confinado. En los primeros modelos, las esferitas se consideraban puntuales, y por lo tanto no chocan entre sí; más tarde, Clausius les da tamaño. Se supone también que esas esferitas se comportan de acuerdo con las leyes de la mecánica. El

modelo en esta teoría es el conglomerado de esferitas imaginarias, con la características citadas. El *objeto modelado* es el gas, normalmente invisible, que se quiere entender, digamos *helio* u *oxígeno* dentro de un envase.

Entre los filósofos que más han hecho para elucidar el concepto de modelo están Mary Hesse (*Models and Analogy in Science*, 1956; in *The Encyclopedia of Philosophy*, 1967; *Forces and Fields*, 1965); Rom Harré, Max Black y E. H. Hutten. Lo que diré está basado más que todo en el trabajo de Hesse. Ella encuentra por lo menos cinco conceptos diferentes e importantes de Modelo, y por lo menos dos conceptos de Analogía que se necesitan para entender el uso de los modelos en la física. No veo manera de entender el uso e importancia de los modelos en la construcción de teorías, y varios de los problemas asociados con teorías, sin entrar en algún detalle a explicar los diferentes tipos de modelo y analogía de que habla Hesse. Por lo tanto esta sección será un poco pesada. Estos conceptos de modelo y analogía de que hablamos, están tan entrelazados entre sí, que resulta ventajoso explicar dos tipos clave de modelo primero, luego las analogías, y luego los otros tipos de modelo. Los tipos de modelo que nos interesan son los siguientes:

1. *Modelos lógicos.*
2. *Réplicas, modelos a escala, máquinas analógicas.*
3. *Modelos matemáticos o semiformales.*
4. *Modelos simplificantes.*
5. *Modelos teóricos.*

De estos modelos, los que más nos interesan en la física son los modelos teóricos seguidos por los simplificantes.

Los dos tipos de analogía, fundamentales para entender el uso de modelos en física son:

1. *Analogía formal.*
2. *Analogía material.*

1. El concepto de modelo lógico viene de la lógica formal. En esta disciplina se postulan axiomas y se derivan consecuen-

cias lógicas de estos. Los axiomas lógicos inicialmente no son realmente oraciones sino formas de oraciones, pues no se les da ningún significado a lo que serían las palabras descriptivas. Estas se dejan como variables. Un modelo lógico de determinados axiomas A_1, A_1, \dots, A_n , es una interpretación que convierte estos axiomas simultáneamente en oraciones verdaderas. Por ejemplo, si en los axiomas de la Geometría Euclideana sustituimos por la palabra *punto* la letra P y por la palabra *línea* la letra L , los axiomas dejan de tener significado. Entonces, cualquier interpretación de P y L que simultáneamente convierte en verdaderos todos los axiomas, es un modelo lógico de esos axiomas.

2. Los conceptos de réplicas, modelos a escala, y máquinas analógicas representan el sentido de *modelo* más cercano al que se usa en el lenguaje ordinario. En las réplicas y en los modelos a escala, el modelo y el objeto modelado tienen en común características sustanciales, materiales. Por ejemplo, un modelo a escala de un aeroplano Boeing 747 tiene la misma forma y color; y un material exterior muy similar al del original. En las máquinas analógicas la similitud consiste en igualdad de relaciones entre las respectivas partes. Por ejemplo, en un modelo electrónico de una red de nervios se considera que las relaciones entre los componentes electrónicos son las mismas que las que existen entre unos y otros nervios. Presumiblemente, la forma de las ecuaciones fundamentales del comportamiento relevante de la máquina analógica y del objeto modelado son las mismas pero estas ecuaciones normalmente no se conocen.

Observamos ahora que la relación entre un modelo y el objeto modelado es una relación de analogía, lo que quiere decir que objeto y modelo son similares en ciertos aspectos y diferentes en otros. Dicho esto, y teniendo en cuenta los dos tipos de modelos recién discutidos, las dos clases de analogía de que hablé se pueden entender más fácilmente.

Llamamos analogía formal a la analogía de estructura o isomorfismo entre modelo y sistema cuando las mismas relaciones a-

xiomáticas y deductivas conectan individuos y predicados del modelo y del sistema. Por ejemplo, un circuito eléctrico puede servir de modelo de un oscilador armónico (que puede ser un bloque de masa m conectado a un resorte de constante K) o vice-versa, puesto que la carga eléctrica en el uno y el desplazamiento en el otro obedecen leyes de la misma forma; a la constante del resorte le corresponde el inverso de la capacitancia del circuito y a la masa inercial del bloque le corresponde la inductancia del circuito. Evidentemente, existe una analogía formal, o de estructura entre los dos sistemas que en apariencia son completamente diferentes.

El otro tipo de analogía que Hesse considera fundamental es el de analogía material, que es aquel tipo de analogía entre sistema y modelo por encima de la similitud estructural. Una réplica, o un modelo a escala, o un juguete, fuera de tener similitudes formales, estructurales con los objetos que modelan, tienen también similitudes materiales con los objetos modelados como es la forma geométrica, el color, a veces el material y la sensación al tacto. En lenguaje común y corriente, aunque vago, la analogía material consiste en parecerse físicamente.

Cuando hablamos de analogías en la física, ya sea material o formal, conviene referirse al *conjunto de características comunes entre modelo y objeto modelado* como la analogía positiva, y al *conjunto de características en las cuales difieren* como la analogía negativa entre los dos. Cuando hay un conjunto de características de las cuales no se sabe si son positivas o negativas lo llamamos la analogía neutra.

Usando estos conceptos de analogía, Hesse describe los otros tres tipos de modelo que mencionamos arriba –que son los que se usan en física– de acuerdo con su función con respecto a teorías, y no de acuerdo con sus características intrínsecas.

3. Modelos Matemáticos o Semiformales. En este tipo de modelos, los elementos del modelo son entes puramente matemáticos sin ninguna característica material. No es fácil encontrar este tipo de modelo en la física; me parece razonable catalogar aquí lo que usó Heisenberg en su desarrollo de la mecánica matricial. Por lo

menos él parece decir esto (*The Physical Principles of the Quantum Theory*, 1930, p. 12).

4. Modelos Simplificantes. Estos son modelos que deliberadamente simplifican y aun falsifican la situación empírica por razones netamente de conveniencia en investigación o en aplicaciones. Ejemplos de este tipo: la Tierra como esfera; gases ideales; universos cuya densidad de materia es uniforme; calor como fluido; objetos físicos como partículas puntuales. Todos estos son útiles en ocasión.

5. Modelos Teóricos. Estos modelos son los que más nos interesan porque son los más frecuentemente asociados con teorías físicas. Una característica de ellos es que, a primera vista por lo menos, los modelos parecen confundirse con la teoría que modelan. Pero más importante:

1. Son modelos lógicos de las teorías que modelan. Es decir, son interpretaciones de las estructuras lógicas de las teorías que modelan. Por ejemplo, las características matemáticas del fluido con fuentes y sumideros que usó Maxwell como modelo del campo eléctrico son idénticas a las del campo eléctrico con cargas.

2. Estos modelos teóricos son dependientes para su comprensión y aplicación, en teorías anteriores a las que se quieren modelar; además, estas teorías anteriores ayudan a explicar los fenómenos nuevos en términos de algún otro sistema ya conocido e inteligible. De esta asociación con otro sistema se deriva una característica fundamental de estos modelos teóricos, a la cual se ha llamado significado adicional o extra o textura abierta: Al modelo lo acompañan asociaciones e implicaciones, generalmente debidas a la analogía material neutra, difícilmente especificables, que se le pueden extender a la teoría modelada. La teoría se modifica y se desarrolla en direcciones sugeridas por el modelo. Por ejemplo, el recipiente con esferitas elásticas en movimiento que se utilizó para modelar un gas, era conocido e inteligible por medio de la mecánica

clásica. Se sugirió que si las bolitas clásicas chocan una pared van a tener un cambio de momentum que representa una fuerza contra la pared. Se investigó esto, y se descubrió que la presión del gas se puede entender perfectamente como producida por choques de las moléculas del gas contra el objeto que recibe la presión. Si no es por el modelo y lo que éste le sugiere al investigador (es decir, su analogía neutra), si se hubiera tenido sólo el aparato matemático sin ninguna interpretación, es difícil ver alguna razón para multiplicar unas cuantas variables unas con otras, una de ellas consigo misma, y luego para asociar esa expresión con la presión del gas, que fue lo que se hizo [$p = (1/3)\eta m \langle v^2 \rangle$], donde p es la presión, η la densidad numérica de moléculas del gas, m la masa por molécula, y $\langle v^2 \rangle$ el promedio de la velocidad de las moléculas al cuadrado].

3. Estos modelos teóricos, también debido a su *textura abierta* o *significado extra*, aportan al que los usa habilidad de predecir y explicar múltiples fenómenos. La manera cómo se ha entendido esta característica de predicción y explicación de los modelos teóricos, es acudiendo a lo que hace un instante llamamos analogía neutra: Por medio de un argumento analógico, que es claramente un tipo de argumento inductivo, se hace la inferencia de que por el hecho de que el modelo tiene una cierta característica (que pertenece a la analogía neutra entre modelo y objeto modelado), el objeto modelado también la debe tener. El hecho de que el modelo posea ciertas características neutras es excelente razón para buscarlas en el sistema modelado, para predecirlas tentativamente y para explicarlas cuando se encuentran. Por ejemplo, usando las características de textura abierta que tienen los modelos, Clausius modificó el modelo inicial de un gas dándole tamaño a las esferitas que inicialmente fueron consideradas como puntuales. Esto naturalmente introdujo cambios en el comportamiento imaginario del modelo; por ejemplo, choques entre las esferitas, y disminución de volumen disponible a una esferita dentro de un recipiente. A consecuencia de estos cambios sugeridos por la analogía neutra, Clausius desarrolló una ecuación (que lleva su nombre) más sofisticada y correcta

del comportamiento de un gas que la que existía hasta entonces. Van der Waals, a su vez, siguiendo el mismo procedimiento, supuso que las esferitas imaginarias del modelo ejercerían fuerzas de atracción unas con otras cuando se encontraran cerca, y por lo tanto disminuyendo la velocidad de las esferitas, disminuiría la presión producida por el conglomerado de esferitas. Así logró encontrar una ecuación aun más sofisticada y correcta del comportamiento de un gas real. Ahora, si el modelo con esferitas de volumen no despreciable y con fuerzas entre sí, da lugar a predicciones mucho más correctas del comportamiento del gas, esta es una muy buena razón, inductiva, para pensar que los átomos son realmente objetivos con masa inercial, volumen no despreciable, que ejercen fuerzas entre ellos.

A nadie le cabe duda que los modelos han servido enormemente en el descubrimiento y desarrollo de teorías. Donde sí ha habido gran controversia es en el debate de si los modelos son o no indispensables lógicamente para esas teorías. Este debate viene desde hace muchos siglos, y concierne la pregunta de si las teorías deben considerarse realísticamente como describiendo aspectos reales pero normalmente inobservables del mundo, o si deben considerarse positivísticamente, sólo como instrumentos para organizar nuestras experiencias sensoriales. Un ejemplo de este tipo de debate, en el siglo pasado, lo constituye la pugna entre los positivistas que seguían a Mach, y los científicos realistas, sobre si los átomos existen o no. En este siglo el físico N. R. Campbell (en *Physics, The Elements*, 1920) atacó la posición positivista de Mach, Heinrich Hertz y de Pierre Duhem, y defendió la posición, que si no es netamente realista, por lo menos mantiene que los modelos son indispensables para las teorías que modelan. Primero que todo, mostró cómo es de fácil construir un aparato matemático que implique lógicamente alguna ley que conocemos. Pero esa *teoría* no tendría ninguna capacidad explicativa. No daría ninguna satisfacción intelectual; una teoría con un modelo apropiado sí la da. Y esa es una cualidad que exigimos de una teoría. Segundo, Campbell arguyó que las teorías

no se dan inmediatamente maduras: las teorías son dinámicas, dijo, tienen que desarrollarse, y en ese desarrollo, la función de los modelos es esencial. Un ejemplo clarísimo de la ayuda de un modelo en el desarrollo de una teoría es el que dimos hace un momento sobre Clausius y sobre van der Waals. En todo caso, el argumento sobre si los modelos son esenciales o no continúa hasta nuestros días.

La mecánica cuántica, como la han concebido la inmensa mayoría de los físicos del siglo XX en la llamada interpretación de Copenhagen, es uno de los casos más patentes de una teoría sin modelo visualizable o imaginable. A eso, en gran parte, se debe el trauma conceptual que ha producido. Niels Bohr lo dijo: "Quien no esté "shocked" (profundamente sorprendido, perturbado, sacudido y hasta escandalizado) por la teoría cuántica no la ha entendido."

Afortunadamente, para algunos, el tentativo modelo de David Bohm, presentado en 1952, parece estar demostrando que la mecánica cuántica sí puede tener un modelo visualizable o por lo menos entendible en gran parte, que elimina algunas de las ideas "perturbantes, escandalizantes" a que se refería Bohr. Existe un programa de investigación serio con respecto a esta interpretación de Bohm de la mecánica cuántica. (Ver David Albert y James Cushing.) En este modelo de Bohm, las partículas existen siempre en el espacio-tiempo como entes casi puntuales, acompañadas siempre por una función de onda espacio-temporal y real; en contraste con la función de onda usual, que es más puramente matemática que física.

Dos funciones fundamentales que los modelos suplen y donde pueden ser necesarios son: **1.** Prácticamente, en la búsqueda de predicciones posibles de una nueva teoría, y **2.** Filosóficamente, en ayudar a comprender cómo adquieren significado los términos teóricos, pues es evidente que los axiomas de las teorías significan algo para el físico, aun cuando éste se da cuenta que los términos teóricos no tienen ninguna conexión directa con la experiencia. En algún momento, los lógico-positivistas se propusieron demostrar en detalle cómo los términos teóricos se pueden definir en función de los términos observacionales. Hay que recordar aquí su axioma fundamental que todo conocimiento del mundo físico está en últimas

anclado a la experiencia. Ellos mismos llegaron a la importantísima conclusión de que eso no se puede hacer: Se pueden definir los términos observacionales o cuasi-observacionales en función de los teóricos; pero no vice-versa. Entonces, ¿de dónde viene el significado de los términos teóricos. De los modelos, contestan los realistas. Y aquí dejamos esta sección.