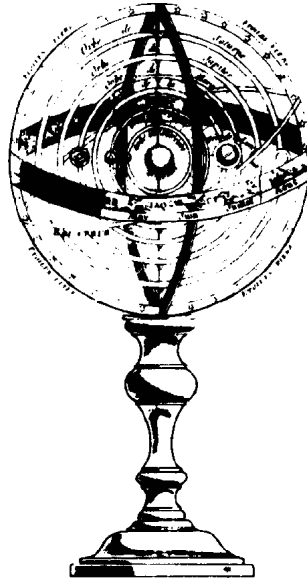


# INNOVACIONES DIDÁCTICAS



---

## **SOBRE LA ESTRUCTURA LÓGICA DE LA FÍSICA. UNA PROPUESTA DE TRABAJO**

**CORNEJO, JORGE, N.**

**Gabinete de Desarrollo de Metodologías de la Enseñanza. Facultad de Ingeniería (UBA).  
Paseo Colón, 850. CP 1063. Buenos Aires. Argentina.**

**E-mail: cornejo@df.uba.ar**

---

### SUMMARY

In the present work we make a proposal of construction of the fundamental concepts relative to the logical structure of the Physics, by means of the work in a regular course of Elementary Mechanics. The basic theoretical mark corresponds to the one exposed in the main works of Carnap and Hempel. We are operating essentially on the hypotheses, laws and theories, as well as about the particularities that they acquire in the context of scientific education. In synthesis, we intend to work in combined form the theoretical activity, the laboratory practices and the interpretation in logical terms, to the effect of the progressive construction of the latter.

## INTRODUCCIÓN

Desde los comienzos de la filosofía moderna nos encontramos con una preocupación definida por hallar la conexión entre el lenguaje (la palabra hablada articulada sintácticamente) y la estructura lógica del pensamiento. Así, por ejemplo, el objetivo filosófico de Ludwig Wittgenstein<sup>1</sup>(1889-1951) fue la creación de un lenguaje lógico perfecto, capaz de enunciar cualquier concepto, idea o proposición con la máxima precisión posible. En su *Tractatus logico-philosophicus* (1989), publicado originalmente en 1921, Wittgenstein afirmó que todo lo pensado también podía ser dicho, y que no puede decirse algo que no pueda ser pensado adecuadamente. Así, la filosofía podría reducirse a la sintaxis, y el análisis de los problemas filosóficos, al análisis de las estructuras del lenguaje.

Por otra parte, Wittgenstein sostuvo que el mundo consistía en hechos simples y que la relación entre esta multitud de hechos elementales daba lugar a todo lo existente. Es ésta una versión lógico-gramatical del atomismo materialista de Demócrito, de ahí que se la conozca como *atomismo lógico*.

Ahora bien, por la misma época, tomaba cuerpo entre los filósofos de la ciencia una idea semejante: la de que el conocimiento científico podría ser analizado como una estructura lógica, en forma parecida al análisis gramatical del lenguaje. Reunidos en el Círculo de Viena, estos *positivistas lógicos*, fanáticamente amigos del análisis filosófico y fanáticamente enemigos de Hegel, editores de la revista *Erkenntnis* (Conocimiento), se dedicaron a buscar los átomos lógicos constitutivos del discurso científico. Se declararon continuadores de, entre otros, Epicuro, Leibniz, Stuart Mill, Spencer, Feuerbach, Marx, Poincaré y Hillbert. Su personalidad más relevante fue Rudolph Carnap (1891-1970). Entre otros de sus integrantes, podemos citar a Schlick, Weissman, Frank, Kraft, Neurath, Gödel, Han, Kaufmann y Feigl. Sus ideas fueron recogidas en otros países de Europa y en los Estados Unidos, a través de autores como Reichenbach, Hempel, Lukasiewicz, Tarski y Nagel. A partir de 1936, prácticamente todos los integrantes del Círculo de Viena emigraron a Norteamérica y *Erkenntnis* comenzó a publicarse en inglés, con el título de *Journal of Unified Science*. Kuhn narra cómo *La estructura de las revoluciones científicas* (1971) fue escrita originalmente para constituir un volumen de la *International Encyclopedia of Unified Science*, y que fueron los editores de esta obra (a la que él califica de «precursora») los que le solicitaron la redacción del ensayo. Lo curioso del caso es que el trabajo de Kuhn fue, precisamente, el libro que puso en entredicho gran parte de las tesis del propio positivismo lógico<sup>2</sup>.

Otros autores, como Karl Popper, si bien no se identificaron con el Círculo de Viena, compartieron varios aspectos de sus tesis. Sin embargo, después de Kuhn, Feyerabend, Toulmin, Hanson, etc., el empirismo lógico cedió amplio terreno y, tal como ocurrió en el plano específicamente filosófico, fue necesario «salir» del lenguaje para encontrar una forma aceptable de expresar

la génesis y la evolución del conocimiento científico. A pesar de ello, cuando leemos algunas obras de divulgación o cuando observamos las referencias que en algunos textos de enseñanza media se realizan acerca del «método científico», nos encontramos con posturas que parecen corresponderse con estadios previos a los desarrollos del propio positivismo lógico: versiones que repiten el antiguo esquema observación-experimentación-hipótesis-leyes-teorías, sin referencia alguna a las variantes y complicaciones lógicas que se presentan en torno al mismo (Flichman et al., 1998). En otras palabras, puede decirse que el empirismo lógico cayó antes de que sus tesis fuesen general y extensamente comprendidas.

Por lo tanto, y para contribuir al entendimiento de las mismas, hemos tratado de desarrollar una propuesta que, a partir del trabajo realizado en un curso regular de física, permita la construcción de los conceptos fundamentales vinculados a su estructura lógica. Esta propuesta, en el plano teórico, se basa fundamentalmente en las obras de Carnap (1985) y Hempel (1970)<sup>3</sup>. Por otra parte, para su realización práctica, hemos tomado como base los temas que se desarrollan habitualmente en un curso de Física I de nivel universitario; específicamente, aquéllos dictados en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. El orden escogido para el desarrollo de los temas está basado en la sucesión de los capítulos del texto de Hempel, que parte de las consideraciones lógicas más elementales y avanza progresivamente hacia las complejidades de leyes y teorías. Correlativamente, los temas de física empleados para la construcción de cada concepto siguen el orden habitual de los cursos de esta asignatura. La idea general subyacente, entonces, ha sido la construcción de la lógica de la física no como un *a priori*, sino como el resultado del trabajo mismo en la disciplina. Se han enfatizado esencialmente las cuestiones vinculadas al contexto de justificación, con alguna referencia al contexto de descubrimiento en el apartado siguiente.

En los primeros apartados se expone el trabajo sobre las hipótesis, su invención, condiciones de científicidad, clasificación y formas lógicas de contrastación. Más adelante se analizarán las leyes requeridas para una explicación científica, sus requisitos y el esquema lógico de las «explicaciones nomológico-deductivas». El trabajo sobre la construcción de las teorías será realizado a continuación, donde nos basaremos en la concepción clásica, recibiendo aquéllas el tratamiento de sistemas axiomáticos hillbertianos formales. Por último, exponemos nuestras conclusiones sobre el tema.

## ¿DE DÓNDE SURGE UNA HIPÓTESIS?

Enfrentado con un problema, con un enigma en el sentido kuhneano, el científico debe comenzar elaborando una hipótesis que, aún en forma provisional, pueda

servir como explicación o interpretación del mismo. Ahora bien, ¿cómo surge, cómo se elabora una hipótesis? En numerosos físicos parece persistir la impresión de que la ciencia, en general, y la física, en particular, continúa trabajando según un modelo baconiano clásico, consistente en registrar y clasificar hechos en forma experimental y en derivar inductivamente generalizaciones de los mismos<sup>4</sup>. Esto es lo que se conoce como la *concepción inductivista estrecha de la investigación científica*. Pero esta concepción, según Hempel, es insostenible, porque:

a) los hechos experimentales se pueden clasificar de formas muy diferentes;

b) dada una masa de datos experimentales, deben seleccionarse los hechos y variables que se consideren relevantes: tales hechos y variables sólo se pueden cualificar como lógicamente relevantes o irrelevantes por referencia a una hipótesis dada, y no por referencia a un problema dado.

Por otra parte, no se puede conocer jamás la totalidad de los hechos; tampoco hay reglas de inducción generalmente aplicables por medio de las cuales se puedan inferir mecánicamente hipótesis o teorías a partir de datos empíricos.

Por esto, se llega a la elaboración de una hipótesis por *inducción en sentido amplio*: se aceptan las hipótesis sobre la base de datos que no las hacen efectivamente concluyentes, sino que sólo les proporcionan un «apoyo inductivo» más o menos amplio. Las hipótesis o teorías no se derivan de los hechos observados, sino que se inventan para dar cuenta de ellos. Las hipótesis se inventan; las reglas de inducción son cánones de validación más que de descubrimiento<sup>5</sup>.

De dónde surge estrictamente una hipótesis es un misterio que, parafraseando a Kuhn, «puede nacer en la profundidad de la noche», y por ello estamos más interesados en el trabajo sobre las hipótesis ya elaboradas, su contrastación y validación.

*Práctica*: Las experiencias sencillas de cinemática sirven para ilustrar este punto. Tomemos, por ejemplo, el conocido experimento consistente en dejar caer verticalmente diversos objetos, que deberán atravesar, en su caída, dos sensores que registrarán los tiempos respectivos. Se puede modificar la distancia entre ambos sensores, y se dispone de objetos de diverso peso. Los alumnos conocen la teoría general y las ecuaciones correspondientes a MRU y MRUV. Se propone, entonces, que, experimentando libremente con esta práctica, los estudiantes elaboren hipótesis que permitan describir la caída de los cuerpos en el vacío.

Durante la puesta en común que seguirá a la realización de la práctica, se deberán resaltar entonces los siguientes aspectos:

a) Las diversas formas en que se han clasificado los datos experimentales. Por ejemplo, algunos grupos in-

tentarán directamente calcular la aceleración de la gravedad, asumiendo que la misma es independiente de la masa del objeto que cae; otros tratarán primero de establecer este hecho probando con masas distintas, etc. En otras palabras, debe enfatizarse que los estudiantes están trabajando y clasificando los hechos experimentales por referencia a determinadas hipótesis previas (la caída de los cuerpos como un MRUV, la independencia de la aceleración de la gravedad con la masa, etc.), y no (cuando menos esencialmente) por referencia a este problema particular.

b) Asimismo, se consultará a los grupos acerca de por qué no tomaron lecturas sobre la temperatura ambiente, presión atmosférica, etc.; nuevamente, esto permitirá trabajar sobre la determinación de la relevancia de los datos experimentales con referencia a las hipótesis previas. Se resaltarán el elemento de *decisión* presente siempre en la elección de los datos.

c) Finalmente, se discutirá si la experiencia realizada permite inferir una conclusión realmente general sobre el tema en cuestión, estableciéndose así los límites de las generalizaciones inductivas y la imposibilidad del conocimiento de la totalidad de los hechos concernientes a un fenómeno determinado.

## CONDICIONES PARA UNA HIPÓTESIS

¿Cualquier hipótesis puede ser calificada como una hipótesis científica? Ciertamente que no.

Siguiendo las ideas de Hempel<sup>6</sup> (1970), una hipótesis científica debe satisfacer dos requisitos básicos:

a) *La relevancia explicativa*: los hechos que se aducen en una hipótesis deben ser relevantes al objeto en cuestión.

b) *El requisito de contrastabilidad*: los enunciados que constituyen una explicación científica deben ser susceptibles de contrastación empírica.

No es necesario que las condiciones de contrastación estén dadas o sean tecnológicamente producibles en el momento en que la hipótesis es propuesta o examinada (por eso hablamos de *contrastabilidad en principio*). Por otra parte, siguiendo a Carnap, deberíamos incluir la llamada *condición de significatividad*: si bien nuestro veredicto sobre la verdad o falsedad de los enunciados se basa sobre la experiencia real, su significatividad (es decir, el que tengan o no algún significado) se basa sobre la experiencia *posible*. De ahí resulta el *principio de verificabilidad*, semejante a la contrastabilidad en principio: un enunciado tiene significado solamente si existe alguna experiencia concebible que pudiese tornarlo verdadero. Más tarde, Carnap modificó este principio sustituyéndolo por otro ligeramente distinto, denominado de *confirmabilidad*: los enunciados con significado son aquéllos que alguna experiencia concebible puede confirmar (en alguna medida).

El requisito de contrastabilidad es muy importante. De no cumplirse, la hipótesis propuesta carecería de *alcance empírico*, y sólo sería una *pseudohipótesis*. Sin embargo, cuándo estamos frente a una hipótesis verdadera y cuándo frente a una pseudohipótesis es un problema muy difícil de resolver.

El requisito de contrastabilidad tiene como consecuencia que toda verdadera hipótesis científica dará siempre lugar a una o más *implicaciones contrastadoras* o *consecuencias observacionales*, es decir, razonamientos de la forma: «si la hipótesis es verdadera, entonces, debe ocurrir tal o cual cosa». Por ejemplo, supongamos que mi hipótesis es que los cuerpos se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa; entonces, si tengo dos cuerpos de masas conocidas, separados por una distancia también conocida, mi hipótesis implicará que éstos deberán atraerse con una fuerza de determinado valor: esta implicación será contrastada experimentalmente y el resultado favorable o desfavorable de la contrastación tendrá sobre la hipótesis original las consecuencias que veremos más adelante.

*Práctica:* Hemos referido lo siguiente a la experiencia mencionada en el punto anterior, pero, en realidad, podría ser aplicable a hipótesis elaboradas con motivo de la realización de otras experiencias.

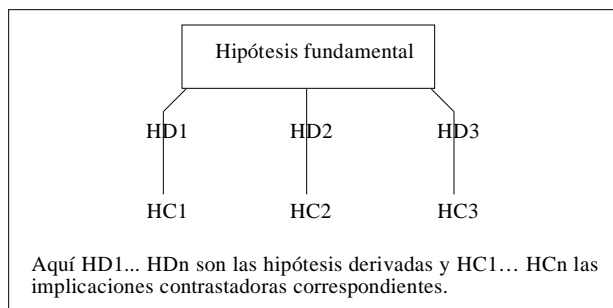
Se deberá tomar nota cuidadosa de las hipótesis con que trabajaron los diversos grupos. A continuación, para cada una de las mismas, se discutirán estas dos preguntas:

- a) ¿Son los hechos aducidos en la explicación relevantes al objeto de la misma? (*relevancia explicativa*).
- b) ¿Es posible una contrastación empírica de la hipótesis aducida? (*requisito de contrastabilidad*).

A partir de la discusión realizada, deberá ser posible clasificar las propuestas de los estudiantes en hipótesis y pseudohipótesis, si bien se expresará con claridad la dificultad inherente a una distinción estricta entre las mismas.

Cuadro I

De las hipótesis fundamentales a las implicaciones contrastadoras.



Por otra parte, algunas propuestas pueden dar ocasión para tratar con mayor detalle el requisito de contrastabilidad. Por ejemplo, es probable que algunos grupos formulen aseveraciones acerca de qué pasaría con la experiencia si la misma se realizase en un planeta con gravedad distinta a la terrestre: tales aseveraciones quizás no sean, en las condiciones de nuestros laboratorios, contrastables empíricamente; sin embargo, de todos modos satisfacen el requisito de *contrastabilidad en principio*. De ahí podrá seguirse lógicamente a la condición de *significatividad* y al principio de *verificabilidad*; el carácter relativo y parcial de toda verificación se expresará a través del principio de *confirabilidad*.

### DISTINTOS TIPOS DE HIPÓTESIS

En forma muy sencilla, podemos clasificar las hipótesis en: *fundamentales, auxiliares y ad hoc*.

*Hipótesis fundamentales:* Son aquéllas elaboradas para dar respuesta a un problema determinado. Conducen necesariamente a una o varias implicaciones contrastadoras. El paso de las hipótesis fundamentales a estas últimas suele estar mediado por las hipótesis derivadas, obtenidas a partir de las primeras por deducción.

*Hipótesis auxiliares:* Constituyen el conjunto de supuestos que acompañan necesariamente a una hipótesis fundamental y particularmente a sus formas de contrastación: si, por ejemplo, queremos contrastar la ley de gravedad con algún cálculo relativo al movimiento planetario, todos los supuestos vinculados a la estructura del sistema solar, el número y dimensiones de los planetas, etc., y aun las consideraciones relativas al funcionamiento de nuestros telescopios y otros aparatos de medición, se contarán entre las hipótesis auxiliares.

*Hipótesis ad hoc:* Son introducidas con el único propósito de salvar una hipótesis seriamente amenazada por un testimonio adverso; no resultan exigidas específicamente por otros datos y, en general, no conducen a nuevas implicaciones contrastadoras<sup>7</sup>. Un ejemplo clásico de hipótesis *ad hoc* es la introducida por Tolomeo para explicar por qué Venus se encuentra siempre en las proximidades del Sol: con la Tierra en el centro del sistema, supone que el centro del epiciclo de Venus se halla siempre sobre la línea Tierra-Sol. No existe ninguna otra razón para esta suposición. En el sistema copernicano, por el contrario, con el Sol en el centro, la posición de Venus resulta naturalmente de su carácter de planeta interior. Algunos autores, como Popper (1973), consideran que las hipótesis *ad hoc* carecen de valor en la investigación científica; otros, como Klimovsky (1995), reconocen que tales hipótesis pueden jugar un cierto papel en la misma.

*Práctica:* Puede trabajarse nuevamente sobre las hipótesis elaboradas por los estudiantes en la experiencia anterior. En tal sentido, primeramente se hará un análisis de todas las hipótesis auxiliares empleadas en la práctica.

ca. Seguidamente, se mostrará como todas las auténticas hipótesis fundamentales ideadas por los distintos grupos conducen necesariamente, por la vía de las hipótesis derivadas, a una o varias implicaciones contrastadoras. Para ello, se construirá el cuadro I, que hemos adaptado a partir de Klimovsky (1995).

Finalmente, en caso de haberlas, se señalarán las hipótesis *ad hoc* y sus características específicas.

### LA CONTRASTACIÓN DE UNA HIPÓTESIS

Una vez elaborada, toda hipótesis deberá ser contrastada experimentalmente, para establecer su grado de verdad o falsedad.

El esquema lógico de una contrastación responde a la estructura conocida como *modus tollens* y puede resumirse en la forma indicada en el cuadro II, en el que *V* significa que la hipótesis es verdadera, *F* que es falsa.

Cuadro II  
Estructura lógica de la contrastación (*modus tollens*).

<p>Sean:</p> <p><i>H</i>: una hipótesis. <i>I</i>: una consecuencia que se derive necesariamente de la hipótesis. <i>I</i> será una implicación contrastadora de <i>H</i>.</p> <p>1) Si <i>H</i> es <i>V</i> <math>\Rightarrow</math> también lo es <i>I</i>. 2) Pero (como se muestra empíricamente) <i>I</i> es <i>F</i>. 3) <math>\Rightarrow</math> <i>H</i> es <i>F</i>.</p> <p>1 y 2 son las premisas del razonamiento; 3 la conclusión. <i>Falacia de afirmación consecuyente</i>: Si <i>I</i> es <i>V</i>, entonces, no necesariamente <i>H</i> es <i>V</i>. La falacia es decir que si <i>I</i> es <i>V</i>, entonces, <i>H</i> es <i>V</i>. Puede haber muchas implicaciones contrastadoras <i>I1</i>, <i>I2</i>, etc. Aunque todas sean <i>V</i>, <i>H</i> no tiene por qué ser <i>V</i>.</p>
--

Las implicaciones contrastadoras, por lo tanto, suelen ser de carácter condicional: dicen que, bajo condiciones de contrastación experimental, se producirá un resultado de un determinado tipo. Pueden ser sometidas a *contrastación experimental provocada* (en muchos casos de índole cuantitativa) o de otro tipo (Hempel da el ejemplo de las estrellas denominadas Cefeidas, caracterizadas por ciertas fluctuaciones periódicas en su luminosidad, y cuya aparición en el cielo hay que esperar antes de poder efectuar una contrastación).

En ausencia de un testimonio desfavorable, se considerará normalmente que la confirmación de una hipótesis aumenta con el número de resultados favorables de la contrastación. Pero éste no es el único criterio: también es muy importante la *variedad* de las contrastaciones realizadas (*fuerza del apoyo empírico diversificado*). De todos modos, algunas formas de diversificar el apoyo

empírico son importantes y otras insubstanciales (qué es cada cosa se basa en los supuestos de fondo que tengamos).

Por otra parte, es altamente deseable que una hipótesis científica sea confirmada mediante testimonios «nuevos» (hechos que no eran conocidos o no se tomaban en consideración cuando se formuló la hipótesis). Lo que es notable de una hipótesis es, precisamente, que se acomode a casos nuevos.

Finalmente, digamos que el apoyo de una hipótesis no tiene por qué ser absolutamente empírico: también puede provenir de hipótesis o teorías más amplias que implican la hipótesis dada y tengan un apoyo empírico independiente. A la vez, la credibilidad de una hipótesis se verá negativamente afectada si entra en conflicto con teorías o hipótesis que en la época se aceptan como bien establecidas. Pero esto no debe exagerarse: en tal caso no serían posibles las revoluciones científicas.

A partir del *modus tollens*, muchas veces se afirma que una contrastación desfavorable sirve para refutar y descartar definitivamente una hipótesis. Sin embargo, esto no es estrictamente cierto, pues aun cuando se encuentren «defectos» en una teoría, aun cuando diversas contrastaciones hayan dado resultado negativo, se la puede seguir usando bajo ciertas condiciones: en la actualidad, por ejemplo, para velocidades pequeñas frente a la velocidad de la luz, continuamos empleando la teoría de Newton, aunque sabemos que ha sido superada conceptualmente por la teoría de la relatividad.

Además, si tenemos en cuenta la existencia de hipótesis auxiliares, la estructura lógica de una contrastación se complica ligeramente, en la forma señalada en el cuadro III.

Por lo tanto, si un modo concreto de contrastar una hipótesis *H* presupone unos supuestos auxiliares *A1*... *An*, entonces, una implicación contrastadora negativa nos dice que o bien *H* es falsa o que se debe introducir una modificación en el conjunto *A* o en *H* si se quiere reajustar el resultado de la contrastación. Por ejemplo, supongamos que el sistema solar termina en el planeta

Cuadro III  
Estructura lógica de la contrastación (*modus tollens*) modificada con la consideración de las hipótesis auxiliares.

<p>Sean:</p> <p><i>H</i>: una hipótesis. <i>A</i>: un conjunto de hipótesis auxiliares. <i>I</i>: una implicación contrastadora de <i>H</i>.</p> <p>1) Si <i>H</i> es <i>V</i> <math>\Rightarrow</math> también lo es <i>I</i>. 2) Pero (como se muestra empíricamente) <i>I</i> es <i>F</i>. 3) <math>\Rightarrow</math> <i>H</i> y <i>A</i> no son ambas <i>V</i> (al menos una es <i>F</i>).</p>
---

Urano, y queremos contrastar la ley de gravitación de Newton. Realizamos las mediciones y vemos que la órbita de Urano no coincide con las predicciones de

la teoría. ¿Hemos refutado la ley de Newton? No, sino la conjunción de esta ley con la hipótesis auxiliar de que el sistema solar tiene sólo siete planetas.

Precisamente, este ejemplo constituyó en realidad una brillante corroboración de la mecánica newtoniana, que culminó con la predicción teórica y el posterior hallazgo astronómico del planeta Neptuno. Por lo tanto, contrariamente a una opinión muy difundida, no necesariamente una contrastación negativa «refuta» definitivamente una hipótesis. Como consecuencia de esto, debemos ser muy prudentes con las denominadas *contrastaciones cruciales*, es decir, aquéllas que permiten decidir entre dos hipótesis rivales. Nuevamente, las contrastaciones desfavorables no necesariamente refutan las teorías, sino que indican que debe hacerse alguna modificación en las mismas.

Y, en realidad, la situación es todavía más compleja. Klimovsky (1995), al discutir la versión compleja del método hipotético-deductivo, enumera toda una serie de factores cuya presencia complica substancialmente la corroboración o refutación de una hipótesis, y Hempel, englobándolos en la categoría general de hipótesis auxiliares, no discrimina. Estos factores son:

a) Las hipótesis y teorías presupuestas, que constituyen el marco teórico en el que se inserta la hipótesis a contrastar.

b) Las hipótesis colaterales, relativas a los instrumentos y el material de trabajo empleados en la investigación. Éstas, a su vez, se clasifican en: a) subsidiarias (hipótesis suficientemente corroboradas, que expresan el conocimiento ya obtenido por el investigador acerca del material con que trabaja); y b) auxiliares (en sentido mucho más restringido que el que propone Hempel, son hipótesis que se aceptan en forma transitoria para poder seguir desarrollando la investigación).

c) datos observacionales, que constituyen el material empírico básico que interviene en la corroboración.

Por consiguiente, nuestro esquema podría configurarse según mostramos en el cuadro IV.

Cuadro IV

Estructura lógica de la contrastación (*modus tollens*) modificada con la consideración de los distintos factores que intervienen de acuerdo con la versión compleja del método hipotético-deductivo.

<p>Sean:</p> <p><i>H</i>: una hipótesis.  <i>P</i>: un conjunto de hipótesis y teorías presupuestas.  <i>C</i>: un conjunto de hipótesis colaterales, constituido por los subconjuntos <i>CS</i> (hipótesis subsidiarias) y <i>CA</i> (hipótesis auxiliares).  <i>D</i>: un conjunto de datos observacionales.  <i>I</i>: una implicación contrastadora de <i>H</i>.</p> <p>1) Si <i>H</i> es <i>V</i> ⇒ también lo es <i>I</i>.                  2) Pero (como se muestra empíricamente) <i>I</i> es <i>F</i>.                  3) ⇒ <i>H</i>, <i>P</i>, <i>C</i> y <i>D</i> no son simultáneamente <i>V</i> (al menos una es <i>F</i>).</p>
---

*Práctica*: Se propone como hipótesis la relación dada por la 2a. ley de Newton, para masas constantes; es decir:  $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ . Los distintos grupos deberán elaborar, con el material disponible en el laboratorio, implicaciones contrastadoras de esta hipótesis. Previamente a la realización de la práctica, el docente aclarará que, en tales condiciones, se estará trabajando en una situación de *contrastación experimental provocada*.

Cuadro V

Esquema lógico de una explicación nomológico-deductiva.

<p><i>Fenómeno explanandum</i>: fenómeno a ser explicado.  <i>Enunciado explanandum</i>: enunciado que lo describe.  <i>Enunciados explanantes</i>: enunciados que especifican la información explicativa (se refieren a leyes generales o a hechos concretos).  <i>Explanans</i>: conjunto de los enunciados explanantes.                  Los enunciados <i>explanantes</i> implican el enunciado <i>explanandum</i>.  <i>Leyes abarcadoras</i>: leyes invocadas en una explicación científica.</p>
---

Una vez concluidos los experimentos, se discutirán y aclararán debidamente el marco teórico y las hipótesis presupuestas en que aquéllas deben encuadrarse. Seguidamente, se confeccionará una tabla donde se detallarán las hipótesis colaterales (subsidiarias y auxiliares) y la base empírica constituida por los datos observacionales utilizados. A continuación, se realizará otra tabla, en dos columnas, una con las contrastaciones exitosas y otra con las desfavorables, si las hubiera. Con relación a las primeras, se resaltarán el grado de diversificación que se haya obtenido con el apoyo empírico propuesto. En caso de que, en el transcurso de la experiencia, hubiesen aparecido testimonios de apoyo nuevos, no previstos, los mismos serán discutidos y analizados.

Como, en realidad, no se está corroborando la 2a. ley de Newton en su forma original, sino sólo un caso particular de la misma (masa constante), se resaltarán que el apoyo empírico que posee la ley original refuerza la corroboración de la hipótesis específica trabajada.

Con respecto a las contrastaciones negativas, se explicarán los efectos de la resistencia del aire, (y otros posibles), debiendo quedar en claro que un resultado desfavorable no implica necesariamente la refutación de una hipótesis. En cada caso, se señalará en qué tipo de hipótesis (subsidiaria, auxiliar, etc.), se produjo la falla en la contrastación.

**LAS LEYES**

Las leyes que se requieren para una explicación científica son enunciados que satisfacen, en general, los dos requisitos siguientes:

a) *Requisito de universalidad*: Las leyes dicen que cuandoquiera y dondequiera que se den unas condiciones de tipo especificado  $P$ , entonces, se darán también, siempre y sin excepción, ciertas condiciones de otro tipo  $Q$ .

b) *Requisito de condicionalidad*: Una ley debe servir para enunciar *condicionales* de la forma *si fuera A, entonces sería B*, que pueden ser *contrafácticos* (si A no ocurrió realmente) o *subjuntivos* (si se deja en suspenso si A ocurrió o no).

Las explicaciones científicas que se apoyan en leyes de la naturaleza se conocen como *explicaciones nomológico-deductivas* (nomos = ley). El esquema lógico en que se apoyan tales explicaciones, conocido como *el modelo de Carl Hempel*, es el que exponemos en el cuadro V.

En otras palabras, la idea es deducir el enunciado que describe el hecho (el *explanandum*) a partir de un conjunto de otros enunciados (el *explanans*), en los que se incluyen las leyes naturales (Gaeta et al., 1996). Esto se expone en forma gráfica en el cuadro VI, mientras que hemos adaptado de Hempel el siguiente ejemplo:

1) Sea el siguiente *fenómeno explanandum*: la disminución de la longitud de la columna de mercurio del barómetro de Torricelli cuando el mismo se traslada a una altura sobre el nivel del mar mayor que la que ocupaba originalmente.

2) El *explanans* se compondrá de los siguientes *enunciados explanantes*:

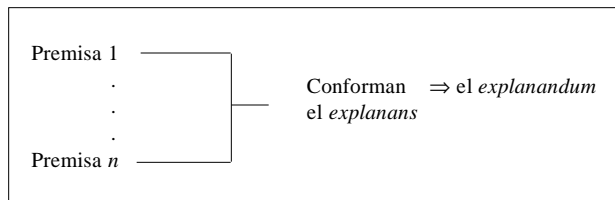
a) La presión que la columna de mercurio que está en la parte cerrada del aparato de Torricelli ejerce sobre el mercurio de la parte inferior es igual a la presión ejercida sobre la superficie del mercurio que está en el recipiente abierto por la columna de aire que se halla sobre él.

b) Las presiones ejercidas por las columnas de mercurio y de aire son proporcionales a sus pesos y, cuanto más cortas son las columnas, tanto menores son sus pesos.

c) A medida que se aumenta la altura sobre el nivel del mar, la columna de aire sobre el recipiente abierto se va haciendo más corta.

3) Y el *explanans* implicará, entonces, el siguiente *enunciado explanandum*: (por lo tanto) la columna de mercurio debe hacerse más corta al aumentar la altura.

Cuadro VI  
De las premisas al *explanandum*.



*Práctica*: Se planteará a los alumnos el siguiente *fenómeno explanandum*: la constancia del plano de rotación de la Tierra alrededor del Sol (caso particular de la conservación del plano de rotación de una partícula sometida a una fuerza central). Se pedirá a los estudiantes que expliquen el fenómeno exponiendo detalladamente las leyes empleadas en tal explicación. El docente sistematizará las mismas, apuntando a la construcción lógica del *explanans*. Por ejemplo, éste podría componerse de los siguientes *enunciados explanantes*:

a) La fuerza de atracción gravitatoria que el Sol ejerce sobre la Tierra se encuentra siempre sobre la recta que une ambos cuerpos (lo cual remite a la ley universal de gravitación).

b) El torque de esta fuerza con respecto al origen de coordenadas (elegido en el Sol) es, por consiguiente, igual a cero.

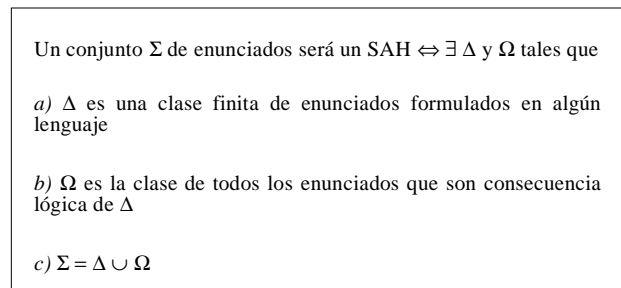
c) Entonces, el momento angular del sistema se mantiene constante (a partir de la ley de conservación del momento angular).

d) El vector momento angular es perpendicular al plano de rotación de la Tierra.

e) La conservación del momento angular implica, entonces, la conservación de dicho plano.

Por lo tanto (*enunciado explanandum*), el plano de rotación de la Tierra alrededor del Sol se mantiene constante.

Cuadro VII  
Sistemas axiomáticos hillbertianos (SAH).



**LAS TEORÍAS**

La descripción que sigue corresponde a la denominada *concepción clásica de las teorías*, basada en la metamatemática y el logicismo, y recoge esencialmente conceptos de Carnap (este esquema se conoce, precisamente, como enfoque de Carnap o enfoque formal).

La idea de esta concepción es describir las teorías como *sistemas axiomáticos hillbertianos*, regidos por los principios de la lógica elemental, como podemos ver en el cuadro VII.

De acuerdo con el mismo, un SAH es un conjunto de enunciados cerrado bajo la deducción, en el cual  $\Delta$  corresponde a los axiomas. Cuando  $\Delta$  se expresa en lenguaje corriente decimos que se trata de un sistema *informal*; será *formal* cuando se lo formule en algún lenguaje formalizado, lenguaje cuyo paradigma es el lenguaje matemático.

La concepción clásica de las teorías dice que éstas son SAH formales en las cuales el lenguaje empleado es la lógica elemental. Según esto, las teorías científicas deberían poder reconstruirse bajo la forma de un sistema que consta de:

a) un sistema formal específico, del cual el fundamento es la lógica de primer orden;

b) un sistema de reglas semánticas para su interpretación.

Por lo tanto, una dada teoría podría interpretarse como un sistema dual de cálculo, consistente en:

a) el *cálculo lógico*;

b) un *cálculo específico* para la teoría concreta bajo consideración.

En otras palabras, desde el punto de vista del vocabulario, una teoría se compone de:

a) un *vocabulario lógico*;

b) un *vocabulario descriptivo*, expresado en lenguaje cotidiano.

Este último, a su vez, consta de *términos teóricos*, *hechos empíricos* y *reglas de correspondencia* o *principios puente*. Los primeros, también denominados *principios internos*, han sido objeto de innumerables controversias, particularmente en lo concerniente a su estatus como objetos reales. En forma muy elemental, podemos caracterizar los principios internos y los principios puente

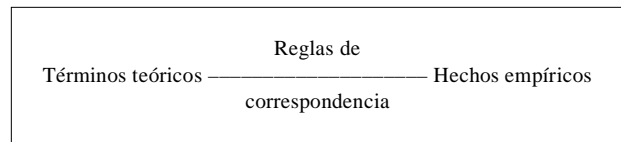
en esta forma:

*Principios internos*: Establecen las entidades y procesos básicos invocados por la teoría y las leyes a las que se supone que se ajustan.

*Principios puente*: Indican cómo se relacionan los procesos internos considerados por la teoría con fenómenos empíricos con los que ya estamos familiarizados.

Podríamos, entonces, esquematizar el mecanismo explicativo de una teoría en el cuadro VIII.

Cuadro VIII  
De los hechos empíricos a los términos teóricos.



En la literatura epistemológica, los ejemplos en este sentido son abundantes. Hemos elegido los tres que se muestran en el cuadro IX, tomados de Hempel.

Como se ve en el último ejemplo, los principios puente no siempre conectan inobservables teóricos con observables experimentales, pues los fenómenos empíricos no tienen por qué ser directamente observables o medibles: pueden caracterizarse en términos de teorías previamente establecidas, y su observación o medición puede suponer los principios de esas teorías.

Ahora bien, más allá de las consideraciones lógicas, ¿existe alguna necesidad real para la existencia de términos teóricos? La respuesta a esta pregunta es definitivamente afirmativa, pues las teorías se introducen normalmente cuando estudios anteriormente realizados de una cierta clase de fenómenos han revelado un sistema de uniformidades que se pueden expresar en forma de leyes

Cuadro IX  
Ejemplos de términos teóricos y principios puente.

Hecho empírico	Término teórico	Principio puente
V de difusión de un gas, dada por la ley de Graham	Velocidad media de las moléculas	La V de difusión es prop. a la V media de las moléculas.
Presión de un gas	Lo mismo	La presión es resultado de los choques de las moléculas sobre las paredes del recipiente.
Líneas espectrales	Electrón, núcleo, etc.	Teoría de Bohr



empíricas: las teorías intentan, entonces, explicar y comprender estas regularidades, recurriendo a principios teóricos que subyacen a las mismas. Para ello, la teoría interpreta los fenómenos como manifestaciones de entidades y procesos que están por detrás o por debajo de ellos, entidades gobernadas por medio de leyes o principios teóricos característicos, por medio de los cuales se explican las regularidades empíricas y se predicen otras nuevas.

Cuadro X  
La MCP como un SAH.

La MCP es un conjunto de enunciados  $\Delta$  y  $\Omega$ , tales que:

a)  $\Delta$  son los enunciados de las tres leyes de Newton + la ley universal de gravitación.

b)  $\Omega$  es la clase de todos los enunciados que son consecuencia lógica de  $\Delta$ , de los cuales son un ejemplo las leyes de conservación.

Por otra parte, las entidades y procesos básicos afirmados por una teoría, y las leyes que se presume que los gobiernan, se deben especificar con claridad y precisión; de otro modo, la teoría no podría cumplir su misión científica. Y finalmente, así como son necesarios los términos teóricos, así también son necesarios los principios puente: sin ellos una teoría no tendría poder explicativo ni podría ser susceptible de contrastación.

En un campo de investigación en el que se ha alcanzado ya un cierto grado de comprensión mediante el establecimiento de leyes empíricas, una teoría hará esta conexión más profunda y más amplia. Ofrece una versión sistemáticamente unificada de fenómenos completamente diversos. Asimismo, permite generalmente ver las limitaciones y el campo de aplicación de las leyes empíricas. Finalmente, también predice fenómenos que no se conocían cuando la teoría fue formulada (Hempel, 1970).

*Práctica:* Se trabajará con la mecánica clásica de partículas (MCP). Aun cuando, probablemente, ya habían sido mencionadas en clases anteriores, el docente volverá a presentar con claridad las tres leyes de Newton de la dinámica. Se pedirá a los alumnos que, tomando la 2a. ley, realicen las integrales correspondientes, tanto en posición como en tiempo, a los efectos de deducir las leyes de conservación.

Una vez cumplida esta actividad, se presentará el cuadro completo, con los axiomas más las leyes deducidas por integración, caracterizándolo en la forma que se muestra en el cuadro X.

Es decir, la MCP es un conjunto constituido por cuatro enunciados (las tres leyes de Newton más la ley de gravitación universal), cerrado para todas las deducciones lógicas que resultan de las mismas.

A continuación, (se escribirá en dos formas diferentes: en lenguaje coloquial (*sistema informal*) y en lenguaje matemático (*sistema formal*). Se resaltaré el valor de este último en la realización de las deducciones lógicas y la conformación de  $\Omega$ , redondeándose así la presentación de la MCP como SAHF. Se pedirá a los estudiantes que identifiquen los dos tipos de cálculo (lógico y específico) y de vocabulario (lógico y descriptivo), empleados en la formulación.

A continuación, se trabajará con los diversos términos del vocabulario descriptivo (centro de masa, energía, momento, etc.). A tal efecto, se propondrá a los estudiantes una serie de experiencias para trabajar con el centro de masa de un sistema de partículas. Al respecto, se podrá trabajar con la experiencia de la *haltera*, mencionada por Ingard y Kraushaar<sup>8</sup> (1972), o las experiencias citadas en Alonso y Finn<sup>9</sup> (1992), siendo aconsejable que cada grupo realice un experimento diferente. Una vez realizadas las prácticas, los alumnos deberán identificar los términos teóricos (en general, los conceptos de centro de masa, cantidad de movimiento angular, etc.), los hechos empíricos (aquellas magnitudes que fueron efectivamente medidas) y las reglas de correspondencia o principios puente (los teoremas de conservación) involucrados en cada una.

El docente deberá resaltar la importancia de haber explicado diversos hechos empíricos empleando la misma teoría, con la unificación acerca de la concepción de la naturaleza que resulta de ello. El corolario de esta actividad debe consistir, entonces, en la construcción de la idea de que las teorías físicas (en este caso, la MCP), a través de los términos teóricos y las reglas de correspondencia, permiten la obtención de una visión unificada de los fenómenos.

## SÍNTESIS

La exposición precedente ha apuntado a la construcción de los conceptos elementales vinculados a la estructura lógica de la física, a partir de las actividades regulares de un curso básico de mecánica elemental. Nuestro propósito ha sido unificar tales conceptos con el quehacer normal del trabajo en física, a los efectos de combatir la construcción de una epistemología *excathedra*, separada de lo que los científicos (o, en este caso, los estudiantes de ciencia) hacen realmente. Consideramos que aún resta agilizar y completar la propuesta, tornándola viable en el sentido de cubrir el curso completo de la materia y no sólo la realización de algunas experiencias aisladas.

### NOTAS

<sup>1</sup>Nos referimos aquí sólo al primer Wittgenstein, sin considerar sus doctrinas más tardías.

<sup>2</sup> En realidad, la relación exacta entre Kuhn y el positivismo lógico es todavía motivo de controversia. La expuesta en este trabajo es la opinión más difundida, pero, especialmente en lo relativo a la relación Carnap-Kuhn, existen algunas visiones alternativas. Al respecto, pueden consultarse Reisch (1991) y Irzik y Grünberg (1995).

<sup>3</sup> Debemos aclarar que Hempel no perteneció al Círculo de Viena, sino que conformó, con Reichenbach y otros, el denominado Grupo de Berlín.

<sup>4</sup> Al respecto, el autor de este trabajo se encuentra realizando actualmente una encuesta para pulsar estadísticamente los conocimientos epistemológicos de los docentes de física en general y de los físicos en particular. Los resultados de esta encuesta serán evaluados en un trabajo futuro.

<sup>5</sup> Este concepto, que hemos tomado de Hempel (1970), ha motivado que aquel autor sea calificado como «inductivista en el contexto de justificación».

<sup>6</sup> Estrictamente, Hempel plantea estos requisitos para el esquema completo de una explicación científica, el cual es, naturalmente, más complejo que una simple hipótesis. Sin embargo, nosotros hemos considerado que ambas condiciones son también válidas para cada hipótesis individual.

<sup>7</sup> Ésta es la postura de Hempel. Otros autores, por ejemplo, Flichman y otros (1998), opinan que también las hipótesis *ad hoc* conducen a consecuencias observacionales.

<sup>8</sup> Para el experimento de la *halter*, ver la página 282.

<sup>9</sup> Ver la página 261, ejemplo 13.4.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, M. y FINN, E.J. (1992). *Física*. México: Addison-Wesley Iberoamericana.

CARNAP, R. (1985). *Fundamentación lógica de la física*. Barcelona: Hyspamérica.

FLICHMAN, E., MIGUEL, H., PARUELO, J., PISSINIS, G., ABELEDO, H., CARSOLIO, S., ALDANONDO, M. DE y ONNA, A. (1998). *Las raíces y los frutos, temas de filosofía de la ciencia*. Buenos Aires: EUDEBA.

GAETA, R., GENTILE, N., LUCERO, S. y ROBLES, N. (1996). *Modelos de explicación científica*. Buenos Aires: EUDEBA.

HEMPEL, C.G. (1970). *Filosofía de la ciencia natural*. Madrid: Alianza Editorial.

INGARD, U. y KRAUSHAARD, W. (1972). *Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas*. Buenos Aires: Reverté.

IRZIK, G. y GRÜNBERG, T. (1995). Carnap and Kuhn: Arch Enemies or Close Allies? *Brit. J. Phil. Sci.*, 46, pp. 285-307.

KLIMOVSKY, G. (1995). *Las desventuras del conocimiento científico*. Buenos Aires: A-Z Editora.

KUHN, T.S. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de Cultura Económica.

POPPER, K. (1973). *La lógica de la investigación científica*. Madrid: Tecnos.

REISCH, G.A. (1991). Did Kuhn do Logical Empiricism? *Philosophy of Science*, 58, pp. 264-277.

WITTGENSTEIN, L. (1989). *Tractatus logico-philosophicus*. Madrid: Alianza Editorial.

[Artículo recibido en noviembre de 1998 y aceptado en mayo de 1999.]