

# SOBRE LOS PROBLEMAS DE LA CONFRONTACION TEORIA-EXPERIMENTO

Rubén G. Barrera

Instituto de Física, UNAM

Apartado Postal 20-364. 01000 - México, D.F.

y

Aurora Gallardo

Sección Matemática Educativa. CINVESTAV del I.P.N.

(recibido agosto 18, 1981; aceptado marzo 8, 1982)

## RESUMEN

En el presente trabajo analizaremos cómo los problemas estrictamente metodológicos del método experimental están contenidos en la problemática de la metodología de las ciencias sociales. Esto se realiza mediante un examen cuidadoso del método científico, que muestra la necesidad de introducir el estudio de la historia social de la ciencia como herramienta de análisis. Los argumentos se ilustran con ejemplos tomados de la historia de la física.

## ABSTRACT

In the present paper we analyze how the strictly methodological problems of the experimental method are contained in the more extensive problems faced by the methodology of social sciences. This is done through a careful examination of the scientific method which enables us to introduce social history of science as an appropriate analytical tool. The arguments are illustrated with examples taken from history of Physics.

## INTRODUCCION

El poder de predicción que actualmente han logrado las ciencias experimentales, en especial la física, las ha dotado de tal prestigio metodológico que han llegado a ser consideradas como uno de los prototipos de cientificidad de nuestra época.

No es raro descubrir que un estudiante de la carrera de física se convezna de lo siguiente:

- Las clases impartidas por sus maestros representan la forma de conocimiento más objetiva y racional lograda hasta ahora por la humanidad.
- A diferencia de las ciencias sociales y de las ciencias del hombre, la física posee un método seguro y firme para distinguir, por medio del experimento, entre las teorías falsas y las teorías verdaderas.
- El criterio de verdad se encuentra sustentado en la factibilidad de realizar y reproducir experimentos bajo condiciones controladas y en la posibilidad de exigir una coherencia entre las teorías propuestas y los hechos experimentales.
- Los creadores de las teorías físicas, pueden estar fuertemente influenciados por diversas corrientes filosóficas o ideologías; sin embargo, sus teorías van a confrontarse, a fin de cuentas, con el hecho experimental que sí carece de ideología y de posición filosófica.
- Es precisamente esa confrontación la que ha hecho posible el establecimiento firme de las llamadas leyes físicas, las cuales, una vez especificada el área de su aplicabilidad, representan un conocimiento de validez universal. Bajo las mismas condiciones las leyes de Newton, por ejemplo, serán siempre válidas.

Muchos están convencidos, también, de que el conjunto de conocimientos en física, a diferencia del arte posee un carácter acumulativo, ya que las nuevas teorías deben incluir necesariamente, como caso particular, a las teorías anteriores de validez más restringida, siendo esto

último lo que define su mayor generalidad y un cierto sentido de progreso.

Esta concepción, tan deformada y extendida que se tiene de la física y de su metodología, es lo que nos ha llevado a escribir el presente artículo. En él, nos proponemos revisar críticamente los problemas metodológicos a los que se enfrentan las ciencias experimentales, en particular la física, con el fin de mostrar las graves dificultades que se presentan cuando se intenta concebir el proceso de adquisición de conocimientos como un proceso objetivo con una dinámica condicionada, esencialmente, por contradicciones internas. A nuestra manera de ver, el problema reside en encontrar una explicación causal de la génesis y evolución de las teorías físicas; es decir, llegar a comprender por qué ciertas teorías sobreviven a sus competidoras mientras otras son abandonadas.

A fin de exhibir la complejidad del problema hemos estructurado este trabajo en la siguiente forma:

En la primera sección hacemos una presentación esquemática de lo que hemos llamado la manera *tradicional* de formular el método experimental. Esta consiste en la aplicación sistemática de cuatro pasos metodológicos: la observación, la postulación de un modelo, la predicción y la verificación. El criterio de verificación reside en la concordancia entre las predicciones del modelo y el experimento. En las siguientes dos secciones analizamos los problemas a que conduce la aplicación del método así formulado ilustrando, con diversos ejemplos, sus contradicciones internas y su incapacidad para explicar la evolución y el éxito de diversas teorías físicas. Exploramos también aquí las distintas alternativas que han surgido para tratar de superar dichas dificultades pero que, sin embargo, respetan la rígida estructura del método en cuanto a su mecanismo metodológico interno. Así, mientras que en la segunda sección planteamos las dificultades del criterio de verificación y analizamos la alternativa de sustituirlo por el criterio contrario, la refutación, la tercera sección está dedicada a reconsiderar este criterio, pero, basados ahora en un análisis cuidadoso del llamado "hecho experimental". Concluimos esta sección con la idea de que un método, que consiste en la aplicación estricta de un conjunto definido de reglas y de criterios de verdad rígidos, para explicar el desarrollo de la física, se verá en serias dificultades al ser confrontado con el análisis histórico.

En la cuarta sección utilizamos el concepto de actividad científica como hilo conductor para conectar el marco conceptual de una teoría física con el entorno social donde ésta germina. La idea es mostrar que para conformar una explicación racional de la evolución conceptual de la física es necesario considerarla, no como una actividad intelectual aislada, sino como parte de un proceso social. Es en este sentido que creemos necesario incorporar el análisis socio-histórico al marco metodológico de las ciencias experimentales. En la última sección presentamos nuestras conclusiones finales.

## I. EL METODO EXPERIMENTAL

En esta sección describimos esquemáticamente la manera *tradicional* de presentar el método experimental en nuestros salones de clase. Lo anterior no representa el pensamiento de alguna escuela en particular, más bien se trata de una mezcla de distintas opiniones y corrientes filosóficas que se han infiltrado en nuestras aulas y que caracterizan al método experimental como un conjunto de reglas para distinguir las teorías falsas de las verdaderas.

Estas reglas las podemos resumir en cuatro, a saber:

- i) Observación
- ii) Elaboración de una teoría o modelo
- iii) Predicción
- iv) Verificación

La aplicación del método suele presentarse bajo la siguiente línea de argumentación:

Es la curiosidad innata del hombre la que lo conduce a observar el mundo físico que lo rodea y es su capacidad intelectual la que lo lleva a buscar una explicación causal de lo observado.

Los diversos tipos de explicaciones que el hombre ha encontrado al través de la historia representan la aplicación de distintos métodos para obtener el conocimiento, dichos métodos definen diferentes etapas en la evolución del pensamiento humano y así tenemos el pensamiento mágico, el religioso y el científico. Este último, es el único que realmente

puede ser considerado objetivo y más cuando se trata de las ciencias experimentales porque en este caso el método está diseñado de tal forma que deja a la misma naturaleza, a través del experimento, la toma de decisiones sobre la validez o falsedad del conocimiento.

La aplicación del método en cuestión parte de la observación de la naturaleza y es precisamente el hecho de observar aunado a la curiosidad del hombre lo que hace posible ser conscientes de la existencia de fenómenos naturales que requieren de una explicación. Dicha explicación se realiza utilizando un conjunto de conceptos (marco teórico) que se articulan con base a las reglas aceptadas de la lógica.

Para el caso de un problema físico, la formulación de una teoría o modelo comienza captando los aspectos más significativos del fenómeno para expresarlos después en términos de conceptos físicos los cuales se articulan a fin de lograr una explicación causal del fenómeno en estudio. Se busca además, que los conceptos físicos queden enmarcados dentro de algún tipo de estructura matemática para asegurar que la coherencia lógica quede respaldada por la validez de las teorías matemáticas utilizadas. A esta concatenación de conceptos físicos construida para explicar cierto tipo de fenómenos es lo que actualmente denominamos una teoría física.

Por otra parte, la creación de un modelo se realiza cuando se construye una *explicación* de las relaciones existentes entre los distintos conceptos físicos utilizados en términos de componentes más simples cuyo comportamiento físico es establecido con precisión.

Se les llama modelos debido a que la descripción que se realiza de los fenómenos físicos se basa en la atribución de un conjunto de supuestos acerca de su estructura interna o de una cierta composición o mecanismo que explique, al tomarlos como referencia, las diversas propiedades observables del fenómeno.

Y es precisamente la habilidad para formular dicho conjunto de supuestos, así como la selección y estructuración más adecuada de conceptos, lo que da a la física parte de su carácter creativo, no exento, por tanto, de un cierto placer estético. Por ejemplo, el modelo de bolas de billar para los gases se crea para explicar las relaciones existentes entre conceptos físicos tales como presión, volumen, temperatura, entropía, etc. En este modelo se supone al gas compuesto por pequeñas moléculas,

que no ejercen fuerzas las unas sobre las otras, salvo en el caso de impacto; es decir, que se mueven como bolas de billar siguiendo las leyes conocidas de la mecánica.

Sin embargo, el uso de un formalismo matemático junto con una selección apropiada de supuestos asegura la coherencia interna del modelo, mas no su validez como una interpretación correcta de la realidad. Para determinar esto último es necesario acudir al *experimento*.

Pero la posibilidad de corroborar la validez de un modelo es factible si posee un poder predictivo, es decir, si es capaz de predecir el comportamiento del sistema físico bajo una gran variedad de circunstancias, con la condición adicional de que se puedan reproducir, al menos en principio, dichas circunstancias en el laboratorio. De esta manera se pone a prueba el modelo debido a que el método experimental base su criterio de validez en la concordancia existente entre las predicciones del modelo y el experimento. Un modelo sin poder predictivo carece, por lo tanto, de valor científico. Obviamente las predicciones del modelo tampoco deben entrar en contradicción con hechos experimentales conocidos. Además el diseño de un experimento que ponga a prueba las partes más sensibles de uno o varios modelos requiere del ingenio y la capacidad creadora del experimentador.

Ahora bien, si las predicciones del modelo y el experimento concuerdan, se dice que el modelo ha sido *verificado* por el experimento. En caso contrario será necesario revisar el modelo en cuestión, complcarlo, enriquecerlo o, tal vez, sustituirlo por otro hasta lograr que sus predicciones estén en concordancia con los hechos experimentales. De esta manera se deja al experimento, que no es otra cosa que el comportamiento mismo de la naturaleza bajo condiciones controladas, el papel de árbitro en cuanto a la validez de cierto modelo. Y es precisamente el hecho de que sea la naturaleza misma la que decida sobre la interpretación que el hombre hace de ella, lo que diferencia a las ciencias experimentales de otras ramas del conocimiento científico. En el caso de las ciencias experimentales, la naturaleza juega un doble papel: como objeto de estudio y como árbitro en el criterio de verificación. Esto es lo que garantiza la objetividad del conocimiento adquirido ya que el comportamiento de la naturaleza es ajeno a las diversas motivaciones, prejuicios o emociones del investigador.

Sin embargo, también se puede dar el caso de que las predicciones de dos o más modelos distintos concuerden con un mismo conjunto de resultados experimentales haciendo imposible decidir, cuál de los modelos es el correcto.

En este caso, será necesario buscar las condiciones experimentales bajo las cuales las predicciones de los modelos en competencia resulten distintas, ya que sólo así se podrá diseñar un experimento, el llamado experimento crucial, que hará posible la decisión a favor de uno de los modelos. La circunstancia de que los nuevos modelos construidos estén exentos de contradicción con los resultados experimentales conocidos garantiza un claro sentido de progreso. Tal progreso está basado en la acumulación continua de conocimientos, producto de una estrecha vinculación entre teoría y experimento. Así, el diseño de nuevos experimentos para probar uno o varios modelos y la construcción de nuevos modelos para interpretar resultados experimentales no explicados hasta entonces, constituyen los factores dinámicos primordiales en el avance de las ciencias experimentales.

Esta es, a grandes rasgos, la presentación que suele hacerse del método experimental y a la que hemos denominado "tradicional". Esta será también la presentación que tomaremos como base para realizar, en las secciones subsecuentes, un análisis crítico tanto de las distintas fases del método así presentado como de su dinámica real dentro de un contexto socio-histórico.

## II. VERIFICACION VERSUS REFUTACION

En esta sección analizamos el criterio de validez del método experimental, basado en la verificación de los modelos teóricos por medio del experimento y expuesto en la sección anterior bajo lo que hemos denominado la presentación "tradicional".

Iniciamos la presente discusión preguntándonos si en caso de que exista concordancia entre teoría y experimento, ¿es realmente posible decir que el modelo fue verificado? ¿No es acaso posible que en otro arreglo experimental las predicciones del modelo puedan entrar en conflicto con los resultados experimentales así obtenidos? Y aunque hubiere un gran número de predicciones ya verificadas por el experimento, ¿se podría

acaso asegurar que ninguna de las predicciones aún no verificadas jamás entrará en desacuerdo con el experimento?

Creemos que es fácil convencerse que, para verificar experimentalmente *todas* las predicciones posibles de modelos suficientemente ambiciosos, sería necesario realizar un número tan grande de experimentos que llegaríamos forzosamente a concluir que es materialmente imposible el llevarlos a cabo.

Pero, aun suponiendo que todas las predicciones de un determinado modelo han concordado con la experiencia, ¿cómo podríamos estar absolutamente seguros de que éste es el modelo verdadero y que no existe algún otro del cual se deduzcan también las mismas predicciones?

Sabemos bien que desde el punto de vista de la lógica formal es posible deducir un juicio verdadero partiendo de premisas falsas. Por ejemplo, si yo digo:

el cristal es combustible,  
 las páginas de este artículo son de cristal,  
 por tanto, las páginas de este artículo son combustibles,

resulta muy claro que la veracidad del juicio no implica necesariamente la veracidad de las premisas.

De la misma manera, la concordancia entre las predicciones de un modelo y la experiencia no implica la veracidad del modelo ya que siempre existirá la duda de que puedan existir otros modelos diferentes con el mismo tipo de predicciones.

Aunque para salvar esta situación podríamos definir como modelos equivalentes a todos aquellos modelos que tuvieran exactamente las mismas predicciones. Es claro que lo que no podemos hacer es inferir la validez objetiva de modelos equivalentes a partir de su concordancia con un conjunto *limitado* de experiencias que no agotan el conjunto de todas las predicciones posibles.

-A este respecto se ha argumentado<sup>(1)</sup> que lo que se busca en las ciencias experimentales no es la verificación absoluta de un determinado modelo, sino más bien el determinar su verificación con un alto grado de probabilidad. Sin embargo, esto nos conduce al problema de la cuantificación de esa probabilidad y aún más, al problema del significado mismo

del concepto de probabilidad.

Dado que no ha sido posible<sup>(1)</sup> resolver estos problemas, se recurre<sup>(2)</sup> a lo que suele llamarse "la refutación del modelo". Por lo tanto, si en vez de tratar de verificar un modelo lo que intentamos es refutarlo, vemos que las dificultades mencionadas desaparecen, ya que para refutar un modelo es necesario sólo un experimento. Es decir que la no concordancia entre las predicciones del modelo y un solo hecho experimental es suficiente para refutar el modelo teórico y obligarnos a revisarlo críticamente, ya sea para modificarlo o para sustituirlo por otro modelo distinto.

En este sentido, el verdadero propósito de los experimentos no debe ser verificar los modelos sino, por el contrario, refutarlos<sup>(2)</sup>; y dado que la refutación es la única que nos obliga a revisarlos y mejorarlos, es la refutación el factor dinámico más importante para el avance de las ciencias experimentales.

Uno de los ejemplos más ilustrativos que nos muestra claramente la esencia del criterio de refutación lo ofrece una de las leyes de la teoría electromagnética de Maxwell sobre el comportamiento del campo magnético  $\vec{B}$ , y que, expresada en lenguaje matemático toma la siguiente forma:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

Esta ley es interpretada, a nivel macroscópico, diciendo que las líneas del campo magnético son siempre líneas cerradas. Esta misma ley se puede interpretar a nivel microscópico, diciendo que no existen monopolos magnéticos, o sea, partículas con una sola carga magnética definida.

En este caso bastaría con diseñar sólo un experimento que mostrara la existencia de monopolos magnéticos para que la ley fuera refutada. Esto dio origen a lo que suele llamarse "la caza del monopolito", término bajo el cual se incluyen todos los esfuerzos encaminados a evidenciar la existencia de tales partículas<sup>(3)</sup>. Hasta ahora todos esos esfuerzos han sido vanos, llevándonos simplemente a afirmar que la ley no ha sido refutada. Sin embargo, el investigador, con una actitud correcta, intentará refutar dicha ley ya que sólo a partir de la refutación se establecerán nuevas leyes con el objetivo de que, a su vez, sean refutadas,

generando así una dinámica en el avance del conocimiento.

Por otra parte, la refutación nos lleva también a plantear criterios de científicidad con respecto a la estructura de los modelos teóricos. Por ejemplo, es obvio que bajo este criterio sólo aquellos modelos que tengan la posibilidad de ser refutados poseen verdadero carácter científico<sup>(2)</sup> y este carácter es más firme mientras más posibilidades existan.

Lo que da fuerza a un modelo es precisamente su resistencia a una amplia variedad de circunstancias de poder ser refutado. A este respecto, un modelo se considera débil, científicamente hablando, cuando puede ser refutado sólo en condiciones muy especiales. Por ejemplo, existen diversas teorías<sup>(4)</sup> sobre el comportamiento electrodinámico de los supuestos monopolos magnéticos. Para que esas teorías puedan ser refutadas es necesario que, primero, se encuentren los monopolos, y, segundo, que éstos se examinen bajo condiciones controladas. Dado que hasta ahora no ha sido posible detectar monopolos, estas teorías se consideran científicamente más débiles que cualquier otra que pueda ser refutada hoy en día.

En conclusión, podemos decir que desde el punto de vista del criterio de refutación, el verdadero objetivo de la física no es construir un modelo correcto de la naturaleza, sino más bien su objetivo es destruir o refutar cualquier edificio teórico que pretenda haber comprendido el comportamiento de la naturaleza.

Por ejemplo, la teoría de los vórtices de Descartes<sup>(5)</sup> fue refutada y eliminada por el hecho de que los planetas se mueven en elipses y no en los círculos previstos por Descartes. La teoría de la gravitación de Newton<sup>(6)</sup> explicó con éxito los hechos disponibles en aquel entonces, tanto los que habían sido explicados por la teoría de Descartes como aquellos que refutaban dicha teoría. Por lo tanto, la teoría de Newton sustituyó a la de Descartes. De manera análoga la teoría de Newton fue a su vez refutada por el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio, hecho que fue explicado por la teoría general de relatividad de Einstein<sup>(7)</sup>.

En este contexto, la honestidad científica consiste en especificar de antemano un experimento tal que si el resultado contradice la teoría, ésta debe ser abandonada<sup>(2)</sup>. Es importante señalar que para el

criterio de refutación la existencia de experimentos cruciales es fundamental, porque una teoría es refutada por un experimento que sirve de base lógica a una nueva teoría.

Tal es el caso del experimento de Michelson-Morley<sup>(8)</sup> del que se dice<sup>(9)</sup> refutó las teorías del éter y condujo a la teoría especial de la relatividad<sup>(10)</sup>. Muchos físicos y filósofos le dieron al experimento de Michelson-Morley un carácter crucial, significando el rechazo de la estructura newtoniana del espacio y del tiempo.

### III. EXPERIMENTO VERSUS TEORIA

En el desarrollo de la sección anterior sobre el criterio de refutación, hemos supuesto implícitamente que es posible comparar la teoría con el experimento. Esta suposición nos llevó a concluir que la discordancia entre las predicciones de la teoría y un hecho experimental implicaba necesariamente la refutación de la teoría. En esta sección analizamos en qué sentido dicha suposición es realmente adecuada.

Nuestra duda aparece cuando nos preguntamos si existe realmente un criterio metodológico que nos indique si los resultados experimentales han sido interpretados correctamente.

Todo experimento, por sencillo que parezca, requiere de un proceso de interpretación. Dicho proceso se encuentra sustentado, primero, sobre un conjunto de teorías que respaldan, por ejemplo, la validez de las lecturas de los aparatos de medición, y segundo, sobre la suposición de haber podido controlar *todos los factores significativos* del fenómeno en cuestión. Por ejemplo, el simple hecho de asomarse por un telescopio para medir la posición de una estrella en el firmamento requiere de haber aceptado, anticipadamente, un modelo teórico sobre el comportamiento de la luz en el espacio interestelar y en su viaje a través de la atmósfera terrestre y, otro, sobre las leyes de refracción y reflexión de la luz en su interacción con las lentes y espejos que componen el telescopio; no se diga ahora de todo el bagaje teórico que debemos aceptar como no cuestionable al interpretar lo que aparece en una fotografía tomada por un moderno microscopio electrónico. Esto nos indica, simplemente, que la observación directa de la naturaleza es algo que, en realidad, no existe y que toda observación por más directa que pueda parecernos lleva en sí

una fuerte carga interpretativa basada en modelos teóricos preconcebidos.

Por otra parte, el método experimental, tal como fue presentado en la primera sección, no ofrece criterio alguno para decidir si al interpretar un experimento se han tomado en consideración todos los factores *relevantes* del comportamiento de un sistema físico dado, o cómo llegar a determinar la existencia de posibles elementos perturbadores ocultos. Ahora bien, dado que es posible convencerse de que el hecho experimental puro no existe, dudamos de la validez misma del criterio de refutación. Esto se debe a que las predicciones de un modelo no se comparan con el comportamiento de la naturaleza como tal, sino, más bien, con una interpretación que se tiene de dicho comportamiento. Por consiguiente, las predicciones de un modelo no sólo se están confrontando con hechos generados por la realidad, sino también con toda una serie de predicciones de otros modelos que sustentan la interpretación de los hechos y a la que llamaremos *la teoría del experimento*.

Esto nos lleva a pensar que cuando los resultados experimentales no concuerden con las predicciones de un modelo dado, el método experimental no nos provee de un criterio para concluir que el modelo ha sido refutado, ya que cabe la posibilidad de que lo equivocado no sea el modelo sino la teoría del experimento, o partes de ella.

Esta falta de criterio para decidir si realmente un modelo ha sido refutado nos explica la actitud de muchos físicos ante la falta de concordancia entre teoría y experimento. Recordemos simplemente lo que sucedió hace algunos años cuando fue reportado en la literatura científica<sup>(11)</sup> un experimento llevado a cabo en un globo en las regiones altas de la atmósfera, donde se daba evidencia sobre la existencia de monopolos magnéticos. Ante este hecho, la actitud de muchos físicos fue no considerar refutada una de las leyes de la electrodinámica de Maxwell ( $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ ), sino, por el contrario, *suponer* que por alguna u otra razón el experimento había estado mal interpretado. Pero esta suposición no sólo genera una actitud, sino también una línea de investigación y de trabajo encaminada al análisis exhaustivo y crítico de la teoría del experimento.

Otro ejemplo ilustrativo fue también la actitud de los científicos cuando se reportó que los movimientos planetarios de Urano<sup>(12)</sup> y de Mercurio<sup>(13)</sup> no concordaban con las predicciones de la teoría de la gra-

vitación de Newton<sup>(6)</sup>. Ante la evidencia de los resultados experimentales, la mayoría de los físicos no consideraron refutada la teoría newtoniana, sino, más bien, *dudaron* de la correcta interpretación de las observaciones.

Estas dudas generaron una nueva dirección en las investigaciones y se llegó al extremo de suponer<sup>(14,15)</sup> la existencia de los planetas ocultos, Neptuno y Vulcano, que por alguna razón no habían sido observados y perturbaban los movimientos de Urano y Mercurio en forma tal que las observaciones pudieran entrar en concordancia con la teoría newtoniana. En cierta manera se estaban "forzando" los hechos experimentales a concordar con la teoría al calcular las órbitas que deberían tener los planetas ocultos para explicar las observaciones en base a la teoría de Newton.

Estos ejemplos muestran que aunque el método experimental no ofrece un criterio para decidir si la discordancia entre modelo y experiencia se debe a fallas del modelo o a errores en la teoría del experimento, en la práctica existe forma de indicar en qué dirección se debe proseguir el trabajo de investigación, por ejemplo, refutar al modelo para después intentar mejorarlo, o también, considerar correcto al modelo para, después, buscar fallas en la interpretación de la experiencia.

Llegados a este punto nos preguntamos ¿qué criterio sigue el investigador para hacer tal decisión? Podríamos pensar que la pregunta no tiene sentido porque, independientemente de la decisión que tome el investigador, ésta puede considerarse simplemente como la selección indispensable de una hipótesis de trabajo que hace posible la continuación del trabajo de investigación, indistintamente, en cualquiera de las dos direcciones mencionadas. Los resultados mismos de las investigaciones son los que prueban si la hipótesis seleccionada fue efectivamente correcta, porque la forma en que se desarrolla la actividad científica no es fundamental; lo importante son los resultados.

Los éxitos obtenidos por esta forma de trabajo se ilustran por medio de la interpretación fallida sobre la existencia de monopolos magnéticos. En su interpretación original los experimentadores reportaron<sup>(11)</sup> el descubrimiento de un monopolo magnético; sin embargo, en investigaciones posteriores no hubo duda sobre la validez de la electrodinámica clásica en la que se prohíbe la existencia de monopolos, más bien se dudó

sobre la correcta interpretación del experimento. Por lo tanto, tomando como hipótesis de trabajo la validez de la electrodinámica clásica, las investigaciones señalaron inconsistencias<sup>(16)</sup> en la interpretación del experimento, mostrando así que la partícula detectada no correspondía a un monopolio. De esta manera se corroboró la hipótesis seleccionada.

Otro ejemplo, tal vez más espectacular, es suponer que la discordancia entre las predicciones de la teoría de la gravitación de Newton y el movimiento planetario de Urano se debía a una interpretación errónea de las observaciones. Como hemos mencionado anteriormente, esto llevó a suponer la existencia de un planeta oculto, Neptuno, que perturbaba la órbita de Urano. Ahora bien, cuando los astrónomos apuntaron sus telescopios hacia el lugar del firmamento donde el supuesto planeta debería estar, de acuerdo a los cálculos realizados, encontraron efectivamente un nuevo planeta<sup>(17)</sup>. Así se confirmó la suposición original que dió lugar a uno de los descubrimientos astronómicos más sorprendentes de la época.

Asimismo, los telescopios se apuntaron hacia las cercanías del Sol en busca de Vulcano. Este nunca apareció<sup>(18)</sup>. Sin embargo, hay que tomar en consideración que, debido a la brillantez del Sol y a que las observaciones en su cercanía son difíciles de realizar, es posible pensar que el supuesto planeta ha permanecido oculto a todos los intentos de observación realizados hasta la fecha. En consecuencia, la discordancia entre el movimiento planetario de Mercurio y las predicciones de la teoría newtoniana de la gravitación aún existen<sup>(6)</sup>. Lo anterior no condujo a que la teoría newtoniana se considerara refutada y, por más de un siglo, muchos astrónomos pensaron que el movimiento planetario de Mercurio era una simple anomalía que surgía de una interpretación incorrecta de las observaciones. Aun no existiendo Vulcano, pueden presentarse otros elementos perturbadores no tomados en cuenta en el proceso de interpretación. Por ejemplo, dejar de considerar la no-esfericidad del Sol, en los cálculos de la órbita de Mercurio, pudo ser la causa de la no-concordancia entre la teoría y el experimento. Sin embargo, al realizar los cálculos de la influencia del momento cuadrupolar del tensor de inercia del Sol en la órbita de Mercurio se concluyó<sup>(19)</sup> que esta influencia no es suficiente para subsanar las diferencias entre teoría y experimento. Es más, no se han encontrado fallas en la interpretación de las observaciones del movimiento planetario de Mercurio que lo expliquen en base a la teoría new-

toniana de gravitación. Sin embargo, ¿es esto suficiente para considerar refutada la teoría newtoniana?, ¿no es acaso posible pensar que sencillamente no se ha dedicado el esfuerzo suficiente o que se ha carecido del ingenio necesario para imaginar un mecanismo que haga posible interpretar las observaciones de acuerdo a la teoría de Newton?, o ¿bajo qué bases se puede asegurar que han sido exploradas todas las posibilidades de error en la interpretación de la experiencia? Y aun en el caso de que se lograra construir otra teoría cuyas predicciones hicieran desaparecer las discrepancias con la interpretación que se tiene de la experiencia, ¿puede asegurarse entonces que la teoría newtoniana ha sido refutada?

Obviamente, para refutar una teoría o modelo es necesario suponer correcta la interpretación de la experiencia con la cual entra en desacuerdo y el problema que entonces surge es que el método experimental, así como se presenta tradicionalmente, no provee de criterio alguno para asegurar la validez de dicha suposición.

Esto nos lleva a enfrentar, desde un punto de vista estrictamente metodológico, un grave problema porque, como se ha concluido antes, las teorías no pueden ser ni verificadas, ni refutadas.

Ahora bien, se sabe que para tener la posibilidad de refutar una teoría o modelo es indispensable suponer, sin cuestionamiento, la validez de la teoría del experimento. El problema radica ahora en la dificultad que presenta la justificación de la suposición y, obviamente, se vuelve muy complejo porque, ante esta situación, el criterio de verificación debe replantearse.

Llegados a este punto vemos que es imposible verificar la validez de la teoría del experimento pues caeríamos entonces en un círculo vicioso porque, para verificarla, llegaríamos a los problemas involucrados en el criterio de verificación, mismos que han dado origen a la presente discusión. Vemos entonces que es necesario partir de algo que tendríamos que aceptar como no cuestionable, pues de otra manera, si queremos partir de lo que podamos considerar como objetivamente correcto, caemos en la discusión del viejo problema filosófico sobre la existencia de la verdad absoluta<sup>(20)</sup>.

Por otra parte, hemos visto que en la práctica se da una dirección al trabajo de investigación cuando se acepta un conjunto de hipótesis que no han sido verificadas. Por tanto, si queremos evitar abordar

el problema de la verdad absoluta tomando en consideración la práctica del trabajo científico, una de las posibles soluciones al problema de verificación consiste en considerar al conjunto de hipótesis no verificadas como parte de una decisión metodológica, es decir, incorporar al método experimental la decisión sobre qué teorías y qué reglas de interpretación de la experiencia son conocimiento no cuestionable; a esto lo llamaremos el núcleo irrefutable. El núcleo irrefutable sirve entonces como una especie de visión aceptada del mundo. Contiene las teorías o modelos fundamentales de la naturaleza y las reglas para la interpretación de la experiencia; asimismo, permite comparar las predicciones de la teoría con las interpretaciones aceptadas de la experiencia. El problema se reduce entonces a decidir sobre la validez del conocimiento construido sobre el citado núcleo irrefutable.

Por otra parte, es necesario reconocer también que los modelos o teorías no se encuentran aislados unos de otros, sino que existen entre ellos conexiones que forman una estructura más amplia con capacidad de extenderse a otras áreas de la física, permitiendo así comprender la naturaleza en una forma más coherente. En consecuencia, el hecho de que no exista concordancia entre las predicciones de un modelo con la interpretación aceptada de la experiencia no se toma como refutación del modelo; más bien, como cierta dificultad que debe superarse para preservar la consistencia interna de toda la estructura.

Desde este punto de vista, el trabajo del físico no consiste en la construcción de modelos aislados de la naturaleza pensando en que algún día tengan validez universal; más bien consiste en el diseño de proyectos o programas de investigación<sup>(21)</sup>. Estos programas forman un conjunto de teorías y de modelos estructurados en torno a un principio de búsqueda o heurística, construido sobre otra estructura de conocimientos no problemáticos, ya antes llamada núcleo irrefutable.

En el presente trabajo, llamaremos heurística<sup>(21)</sup> al conjunto de hipótesis y modelos que definen tanto el programa de investigación como sus limitaciones propias, así como también la definición de los problemas que serán considerados importantes dentro del programa.

Ahora bien, cuando existan programas de investigación diferentes, diseñados para resolver un mismo tipo de problemas, hablaremos de programas rivales o competitivos; tomemos, por ejemplo, la teoría de elec-

trones de Lorentz<sup>(22)</sup>. Con dicho programa, Lorentz trataba de explicar todas las propiedades electromagnéticas de los cuerpos materiales fundamentado en la teoría del éter electromagnético de Maxwell, y bajo el supuesto de que la materia está compuesta de una multitud de pequeñas partículas cargadas que se rigen por las leyes dinámicas de la mecánica de Newton. Bajo la aceptación, además, de los conceptos clásicos sobre la estructura del espacio y del tiempo, Lorentz extiende su programa para entender la gravitación como un fenómeno transmitido a través del éter<sup>(23)</sup>.

Para este caso el núcleo irrefutable de la teoría de electrones podría estructurarse de la siguiente forma:

- (i) Las ecuaciones de Maxwell.
- (ii) La fuerza de Lorentz.
- (iii) La mecánica de Newton con sus conceptos clásicos de espacio y tiempo.
- (iv) La estructura atómica de la materia.
- (v) La relación entre variables microscópicas y observables macroscópicas a través de promedios estadísticos.

Por otra parte, la heurística estaría definida por lo siguiente:

Los fenómenos físicos están determinados por acciones que se transmiten a través del éter.

Ahora bien, como el programa de investigación es dinámico los criterios de verificación no pueden formularse en términos de la veracidad o falsedad del programa; más bien, sobre su estado de progreso. Es decir, tales criterios deben caracterizar tanto el estado presente del programa como sus prospecciones futuras.

En este sentido, el hecho de que alguna de las predicciones del programa carezca de concordancia con el experimento no se toma como una refutación; más bien, como una dificultad a superar en el programa. Si se respeta el núcleo irrefutable, se tienen que buscar nuevas posibilidades de explicación a la discordancia entre teoría y experimento, dentro de la heurística del programa. Esto se hace introduciendo hipótesis auxiliares o nuevos conceptos físicos o reformulando la estructura de algunos de los modelos del programa o sustituyéndolo por otros diferentes, o

tomando en cuenta variables que no habían sido consideradas significativas.

En consecuencia, tomando en consideración la estructura dinámica de un programa de investigación, se dice<sup>(21)</sup> que éste permanece en estado progresivo si la mayoría de sus predicciones se ven confirmadas por el experimento; o si ha demostrado poseer la suficiente flexibilidad para superar las distintas dificultades que le ha presentado la discordancia entre teoría y experimento; o si las nuevas predicciones que han surgido de la superación de dichas dificultades han sido, a su vez, confirmadas por el experimento; o si es capaz de extender continuamente su campo de acción a otras áreas de la física. En este caso el investigador tiene una justificación racional de seguir comprometido con dicho programa.

Por otra parte, se dice<sup>(21)</sup> que un programa de investigación se encuentra estancado o en estado regresivo si la mayoría de sus nuevas predicciones han entrado en conflicto con el experimento; o si se encuentra continuamente a la defensiva ideando nuevas hipótesis o modificando modelos cuyas predicciones vuelven a presentar dificultades al compararse con la experiencia; o si se ve en la necesidad de echar mano de los descubrimientos de programas rivales; o si su área de aplicación se va reduciendo día con día. En este caso el investigador debe abandonar su compromiso con dicho programa.

Por ejemplo, de acuerdo a Zahar<sup>(24,25)</sup>, el programa de Lorentz se mantuvo en estado progresivo hasta 1905, y hasta entonces no hubo razón alguna para abandonar dicho programa en favor del programa rival de Einstein sobre la nueva teoría de la relatividad. Sin embargo, a partir de 1905, el programa de Lorentz entra en un estado regresivo, mientras que, en la década siguiente, el programa de Einstein progresa hasta culminar en la teoría general de relatividad<sup>(7)</sup>, así como en su verificación experimental<sup>(26)</sup>.

Por tanto, durante el período comprendido entre 1905 y 1915, los investigadores tuvieron razones suficientes para abandonar la teoría de electrones de Lorentz e incorporarse al programa einsteiniano. La decisión final, a favor del programa de Einstein, ocurre en 1919 con su explicación de las observaciones sobre la deflexión de la luz<sup>(27)</sup> y el corrimiento anómalo del perihelio de Mercurio<sup>(13)</sup>.

Aunque el análisis de Zahar es demasiado simplista y tiene gra-

ves errores (por ejemplo, las observaciones astronómicas nunca fueron lo suficientemente precisas como para refutar la teoría newtoniana), lo interesante de él es el uso de un concepto dinámico para el proceso de verificación. Sin embargo, como vemos, esta nueva versión dinámica del criterio de verificación preserva la esencia de la presentación tradicional, sabiendo que, con el experimento, a fin de cuentas, se decide sobre el estado de progreso de un cierto programa de investigación. Como se dijo, es la naturaleza, o más precisamente, la interpretación aceptada que se tiene de hechos generados por ella, la encargada de decidir sobre la acción de abandonar un programa o continuar con él.

Sin embargo, podríamos preguntarnos: ¿es acaso posible eliminar objetivamente un programa que pasó por fuertes reveses iniciales por el hecho de que la mayoría de los investigadores lo abandonan para incorporarse al programa rival donde los éxitos son más fáciles?, ¿no es acaso posible que un programa estancado y aparentemente derrotado pueda recuperarse y entrar nuevamente, después de algún tiempo y con una heurística mejor articulada, en un estado progresivo?, y para que dicho programa vuelva a entrar a un estado progresivo, ¿no es necesario que existan algunos investigadores dedicados a desarrollar su heurística?; entonces, ¿hasta qué punto tiene sentido para un investigador continuar esforzándose en desarrollar la heurística de un programa estancado?

Por otra parte, existen problemas relacionados con la selección del núcleo irrefutable; por ejemplo, podríamos preguntarnos ¿cómo es posible saber si el estado regresivo de un programa no se debe a su heurística sino a fallas en los modelos considerados dentro del núcleo irrefutable?, ¿bajo qué condiciones es permitido al investigador reconsiderar la selección del núcleo irrefutable de un programa estancado sin abandonar los esfuerzos por seguir articulando su heurística?, o ¿hasta qué punto es posible comparar dos programas que tengan en común cierto tipo de problemas, pero que se encuentren contruidos sobre núcleos irrefutables diferentes?

Para contestar estas preguntas es indispensable precisar, con nitidez y objetividad, las condiciones bajo las cuales se considera que un programa ha sido derrotado en definitiva. El abandono por parte de muchos de sus seguidores o la aparición de dificultades aparentemente insuperables, no son razones suficientes para inferir que el programa jamás

podrá recuperarse; podría ser que se encontrara simplemente en un período de hibernación o que requiriera de modificaciones en la estructura o constitución de su núcleo irrefutable.

Con el fin de ilustrar la complejidad de esta problemática tomemos como ejemplo el caso del programa de Lorentz sobre la teoría de electrones, mencionado anteriormente, y que, de acuerdo a Zahar<sup>(23)</sup>, entra en estado regresivo a partir de 1905. Su heurística supone la existencia de un medio denominado éter, transmisor de las acciones de todos los sistemas físicos. Supuestamente, dicho programa fue derrotado por el programa rival de la nueva teoría de la relatividad de Einstein. El programa einsteiniano negaba por completo la existencia del éter e introducía una estructura nueva al espacio y al tiempo que entraba en franca contradicción con los conceptos clásicos, tal y como eran considerados por Lorentz dentro del núcleo irrefutable de su programa.

Ambos programas tenían en común problemas relacionados con la electrodinámica de cuerpos en movimiento, pero partían de núcleos irrefutables distintos; mientras que Einstein consideraba dentro del núcleo irrefutable de su programa:

- (i) Las ecuaciones de Maxwell,
- (ii) la propagación de la luz en el vacío sin necesidad de un medio transmisor, y
- (iii) el hecho de que la velocidad de la luz en el vacío es la misma en todos los sistemas inerciales,

el programa de Lorentz incluía, como ya habíamos visto, además de las ecuaciones de Maxwell, la fuerza de Lorentz, los conceptos clásicos de espacio y tiempo de la mecánica de Newton, el atomismo y conceptos estadísticos utilizados para promediar. Por su parte, la heurística del programa einsteiniano es la siguiente:

La dinámica de la materia se encuentra gobernada por la estructura geométrica del espacio-tiempo y, a su vez, la estructura geométrica del espacio-tiempo es gobernada por la dinámica de la materia.

La extensión del programa einsteiniano al campo de la gravita-

ción culmina con la llamada teoría general de la relatividad, donde la acción de la fuerza de gravedad se interpreta como una propiedad geométrica del espacio-tiempo. Como ya habíamos mencionado, sus predicciones sobre el corrimiento del perihelio de Mercurio y la deflexión gravitatoria de la luz estuvieron en concordancia con las observaciones, hechos que, según Zahar<sup>(24)</sup>, significaron la derrota definitiva del programa de Lorentz. Esto indica que, implícitamente, se está suponiendo que el programa lorentziano no podría explicar estos hechos experimentales y lo razonable era abandonar el programa e incorporarse al programa triunfador.

Sin embargo, Lorentz pensaba precisamente lo contrario<sup>(28)</sup>; es decir, que las predicciones de la teoría general de relatividad se podían obtener como una extensión apropiada de la teoría de electrones. Así, en 1900, en sus *Considérations sur la Pesature*<sup>(23)</sup>, discute el papel del éter como el medio portador de las ondas gravitacionales, siendo ésta otra de las predicciones importantes de la teoría general aún no confirmadas por el experimento. Discute también<sup>(28)</sup> esfuerzos infructuosos sobre la construcción de un modelo de atracción gravitatoria, concebido como una especie de interacción dipolar de origen electromagnético transmitida a través del éter. Su idea es aplicarlo, precisamente, al movimiento anómalo del perihelio de Mercurio.

Esto nos indica que para un programa tan ambicioso como la teoría de electrones de Lorentz, las predicciones de la teoría general de relatividad no eran conflictivas; más bien, representaban las dificultades propias de cualquier programa cuando extiende su campo de acción a otras ramas de la física.

Por otra parte, incorporarse al programa rival no indica aceptar la derrota final. El mismo Lorentz realiza contribuciones importantes<sup>(29)</sup> a la teoría general de la relatividad sin que signifique el abandono de sus convicciones sobre la existencia del éter y los conceptos clásicos del espacio y del tiempo. Al contrario, comenta<sup>(30)</sup> que tal vez fue más positivo para el desarrollo de la física que Einstein haya abandonado, temporalmente, el concepto de éter, para estructurar con mayor libertad el formalismo complejo de la teoría general sin arrastrar el lastre metafísico de los conceptos clásicos.

Resulta interesante hacer notar que las embestidas más fuertes al programa no vinieron del programa einsteiniano; más bien, de la multi-

tud de inconsistencias que surgieron al construir una teoría atómica de la materia. Hay que recordar que dichas inconsistencias comenzaron a resolverse cuando se admitió que la mecánica newtoniana era incapaz de describir la dinámica de las partículas atómicas y se inició la construcción de una nueva mecánica: la mecánica cuántica. Sin embargo, como el atomismo y la mecánica newtoniana se encontraban dentro del núcleo irrefutable del programa lorentziano, éste sufrió también los embates del programa cuántico que no atacaba directamente su heurística; más bien partes muy sensibles de su núcleo irrefutable. Y no hay que olvidar que cuando el programa einsteiniano trató de extender su campo de acción a la dinámica de las partículas atómicas, tropezó con dificultades tan graves que hasta la fecha no han sido resueltas satisfactoriamente.

Ante este panorama, ¿podemos decir, con absoluta certeza, que la idea de un éter ha sido derrotada en forma definitiva como resultado de los hechos experimentales? A este respecto resulta interesante citar las palabras de Sir Edmund Whittaker que aparecen en el prefacio de su monumental obra sobre la historia de las teorías del éter y la electricidad<sup>(31)</sup>:

"Se podrían decir algunas palabras sobre el título Eter y Electricidad. Como todos sabemos el éter jugó un papel muy importante en la física del siglo diecinueve; pero en la primera década del siglo veinte, debido fundamentalmente a los intentos fallidos de medir el movimiento relativo de la tierra con respecto al éter y la aceptación del principio de que todos esos intentos siempre fallarían, la palabra "éter" cayó de gracia y se hizo costumbre referirse a los espacios interplanetarios como "vacíos"; concibiendo al vacío como mera vacuidad, sin ninguna otra propiedad que la de propagar ondas electromagnéticas. Sin embargo, con el desarrollo de la electrodinámica cuántica, el vacío ha llegado a ser considerado el asiento de las oscilaciones del "punto cero" del campo electromagnético, de las fluctuaciones del "punto cero" de la carga y corriente eléctricas y de una "polarización" correspondiente a una constante dieléctrica distinta de la unidad. Parece absurdo seguir llamando "vacío" a una entidad tan rica en propiedades físicas y la histórica pa-

labra "éter" podría, con toda propiedad, ser retenida".

Además, resulta pertinente añadir que con la nueva concepción del éter, se realizan hoy en día intentos<sup>(32)</sup> para fundamentar los principios mismos de la mecánica cuántica en base al acoplamiento electromagnético entre las partículas cargadas y el éter.

En conclusión, con estos ejemplos creemos haber ilustrado, primero, los graves problemas que surgen en la selección y estructuración de un núcleo irrefutable y, segundo, el tipo de dificultades metodológicas que se presentan cuando se quiere decidir sobre la derrota final de un programa de investigación.

De lo anterior, se concluye que resulta difícil establecer la metodología adecuada para comparar teoría y experimento sin caer en decisiones metodológicas de carácter arbitrario.

Sin embargo, somos también conscientes de que las ciencias experimentales son una actividad que se ha venido desarrollando en forma sistemática desde hace varios siglos y ha tenido fuerte impacto sobre la tecnología y, en general, sobre la cultura del mundo occidental. Resulta difícil, por tanto, pensar que dicho impacto haya sido el resultado de una actividad caótica carente por completo de bases metodológicas firmes.

Ante esta disyuntiva, mostramos en la siguiente sección que es indispensable ampliar nuestro concepto de ciencia y considerarla ya no como una actividad intelectual encaminada a la búsqueda de un conocimiento objetivo del mundo, sino como una actividad social practicada por un determinado sector de la sociedad comprometido a resolver cierto tipo de problemas. De esta manera, podemos basarnos en el análisis de la praxis de la actividad científica a través de la historia para descubrir cuáles han sido los fundamentos metodológicos que han guiado a los físicos a establecer y a aceptar diversos modelos sobre la estructura y comportamiento de la naturaleza.

#### IV. LA ACTIVIDAD CIENTIFICA

En esta sección exploraremos la posibilidad de encontrar criterios metodológicos que se utilizan para aceptar, rechazar o abandonar cierto programa de investigación en base al análisis de la actividad cien-

tífica.

En primer término, es necesario reconocer que la actividad científica no es una tarea aislada sino una actividad social realizada por determinado sector, al que llamaremos la comunidad científica. Ha sido la propia comunidad científica la que ha determinado en la práctica la aceptación o el rechazo de una teoría o de un programa de investigación. Con esto queremos decir que es el grado de intensidad de la actividad científica en el desarrollo y en la aplicación de una teoría o en la extensión de un programa de investigación lo que define el grado de aceptación o de rechazo que la comunidad científica otorga.

No podemos negar, por ejemplo, en este sentido, que el programa de investigación de Einstein sobre la estructura del espacio-tiempo fue ampliamente aceptado, mientras que, el programa de Lorentz sobre la existencia del éter fue prácticamente abandonado. Sin embargo, como vimos en la sección anterior, no podemos decir que esta decisión de la comunidad científica fue una decisión incontrovertible, determinada exclusivamente por la evidencia de los llamados "hechos experimentales", pues puede pensarse que con mayor actividad científica en el programa lorentziano se pudieran explicar los mismos hechos. Consecuentemente, si la decisión de aceptación o de rechazo del programa no se basa sólo en lo que ha dado por llamarse la "evidencia experimental", entonces nos podemos preguntar si la comunidad científica utiliza criterios metodológicos bien definidos para tomar dicha decisión, o si el desarrollo de la actividad científica es un proceso anárquico, carente de tales criterios.

Trataremos ahora de esclarecer esta situación recurriendo a hechos de historia de la ciencia.

A primera vista, es posible reconocer que en la historia de la física, al igual que en la historia política, han existido épocas de tranquilidad y etapas revolucionarias<sup>(33)</sup>. En los períodos de tranquilidad, la mayor parte de la actividad de la comunidad científica se encuentra concentrada en el desarrollo de un determinado conjunto de programas de investigación no competitivos entre sí. Es entonces cuando los objetivos de la actividad científica consisten en el fortalecimiento y aplicación de dichos programas a fin de lograr una mejor articulación entre programas distintos para, así, ir conformando una estructura teórica coherente capaz de explicar el comportamiento de la naturaleza como un todo.

A esta estructura de programa de investigación, considerados por la mayoría de los miembros de la comunidad científica como un conjunto de conocimientos no cuestionables y articulados a lo largo de directrices aceptadas también por ellos, es a lo que llamaremos paradigma. Aclaramos que se preserva el espíritu con que Kuhn<sup>(33)</sup> introdujo el término.

Es importante destacar que un paradigma no es una estructura estática; más bien, una estructura dinámica que puede construirse a partir de un programa de investigación impulsado por un sector de la comunidad científica, el cual lo extiende a otras áreas del conocimiento incorporando a otros sectores de la comunidad a participar en dicha actividad. Ahora bien, cuando la mayor parte de la comunidad activa ha aceptado desarrollar el mismo conjunto de programas y seguir las mismas directrices de evolución, se dice que un paradigma ha sido establecido.

Por lo tanto, la amplitud y solidez de un paradigma depende del grado de su desarrollo. De esta manera podemos hablar del paradigma newtoniano para referirnos a la aceptación de las leyes que, sobre el movimiento de los cuerpos, propone Newton en los Principia<sup>(34)</sup>, así como las reformulaciones subsecuentes, por ejemplo las de Lagrange y Hamilton<sup>(35)</sup>; asimismo, a sus múltiples aplicaciones; también, a la descripción del movimiento de las partículas puntuales, de cuerpos rígidos y cuerpos deformables; igualmente, a su articulación con diversos programas de investigación en mecánica celeste, elasticidad, hidrodinámica, óptica, electricidad, magnetismo, teoría del calor, teoría atómica de la materia. De esta manera se constituye una estructura de conocimientos conocida con el nombre de visión mecánica del mundo físico.

La construcción de este paradigma consumió la actividad de la comunidad científica por más de dos siglos y definió una de las épocas clásicas en la historia de la física: el florecimiento de la física newtoniana.

Es conveniente observar que dentro de la evolución estructural de un paradigma no todos los programas adquieren la misma relevancia debido a que es fácil mostrar que la actividad científica se concentra más intensamente en el desarrollo de algunos programas específicos. Durante el siglo XVIII, dentro del paradigma newtoniano, el desarrollo de los programas de mecánica celeste, elasticidad, hidrodinámica y óptica consumieron mayor actividad científica que los programas de electricidad y magne-

tismo, pero aún menor fue la actividad dedicada a los programas de teoría atómica, los cuales adquirieron importancia hasta finales del siglo XIX.

Otro ejemplo de paradigma es el paradigma cuántico, relacionado con la aceptación de las leyes de la mecánica ondulatoria<sup>(36)</sup> que describen el movimiento del mundo microscópico, y con sus reformulaciones matemáticas; también se relaciona con su articulación a programas de investigación de electrodinámica, química, física atómica y molecular, física del estado sólido, astrofísica, física nuclear, física de altas energías, teoría de muchos cuerpos, biología molecular, etcétera. A esta estructura de conocimientos se le conoce como visión cuántica del mundo microscópico y fue construida por la comunidad científica dentro de los últimos cincuenta años. Respecto a la importancia relativa en el desarrollo de los distintos programas del paradigma cuántico, señalamos que los programas de física nuclear y física del estado sólido adquieren importancia singular después de la Segunda Guerra Mundial.

Ahora bien, durante las épocas de florecimiento de un paradigma, la aparición de discordancias entre teoría y experimento se consideran "anomalías" que, obviamente, no cuestionan ni los fundamentos ni la estructura del paradigma. El objetivo de la actividad científica se reduce, entonces, a mostrar que las anomalías representan discordancias aparentes porque, de acuerdo al paradigma, siempre se encontrará explicación causal de los resultados experimentales utilizando sólo los elementos conceptuales y metodológicos que brinda el propio paradigma. Estos elementos consisten en la introducción de hipótesis auxiliares y de conceptos nuevos en la inclusión de factores no considerados relevantes, o en una reinterpretación adecuada de los datos experimentales; todo esto sin afectar las bases fundamentales del paradigma. A la actividad científica desarrollada en estas condiciones se le llama ciencia normal<sup>(33)</sup> y su propósito es solucionar los enigmas originados por la aparición de anomalías.

Un ejemplo actual de ciencia normal es la actividad realizada dentro del programa de investigación en física del estado sólido que forma parte del paradigma cuántico y del paradigma maxwelliano. Del primero ya hemos hecho referencia. Sobre el segundo, señalamos que se fundamenta en reconocer que la dinámica del llamado campo electromagnético se describe por las ecuaciones de Maxwell<sup>(37)</sup>. Entre los principios estructurales que guían al programa podemos citar al atomismo, que concibe a los sólidos

dos como sistemas compuestos por multitud de partículas microscópicas.

Ahora bien, dado que la ciencia normal está incluida en la articulación de uno o varios paradigmas, los frutos de la investigación científica normal sirven para fortalecer y estructurar los fundamentos y principios en que se sustentan los paradigmas, pero no podrán originar descubrimientos que signifiquen cambios radicales en la visión que se tiene del mundo físico.

Así, el descubrimiento experimental de la superconductividad realizado a principios del presente siglo<sup>(38)</sup> representó una de las anomalías más espectaculares en el comportamiento eléctrico de materiales conductores y uno de los enigmas más intrigantes que, por más de cincuenta años, tuvo que arrastrar el programa de investigación en física del estado sólido. Sin embargo, casi la totalidad de la comunidad científica dedicada a solucionar este enigma no se apartó de los lineamientos del programa de física de sólidos y mantuvo la confianza en poder resolverlo sin dudar de los fundamentos de los paradigmas que enmarcan al programa. Finalmente, en 1957 aparece en la literatura científica una solución apropiada al enigma en cuestión, basada, esencialmente, en el manejo adecuado de un nuevo concepto, el apareamiento de electrones<sup>(39)</sup>. Así, la formulación de una teoría, en este caso la teoría de la superconductividad, es una actividad que cae dentro de lo que llamamos ciencia normal, término que utilizaremos para contraponerlo, posteriormente, al de ciencia revolucionaria.

Es un hecho que los grandes avances de la física no se realizaron dentro del marco de la ciencia normal porque éstos significaron transformaciones profundas en los fundamentos de la visión que tenía la comunidad científica sobre algún aspecto del mundo físico. En otras palabras, estos avances representaron el derrumbamiento de un paradigma y la articulación de otro que lo reemplazase. Esta actividad está fuera del alcance de la ciencia normal.

Pero esto nos conduce ahora a preguntarnos, ¿cómo es posible que se derrumbe un paradigma cuando la comunidad científica dedicó grandes esfuerzos para fortalecerlo y estructurarlo? Para contestar esta pregunta seguiremos el desarrollo de la analogía que establecimos con la historia política y nos daremos cuenta que, aún en las épocas de tranquilidad, los sistemas políticos no constituyen una estructura monolítica;

asimismo, el control ideológico del Estado no es un control absoluto. Existen sectores sociales descontentos que, para satisfacer sus demandas, requieren de un cambio radical en la estructura del poder político. Estos sectores manifiestan su inconformidad con diversos actos de rebeldía ante el orden establecido. Puede ser que en su etapa inicial sean fuertemente reprimidos y, finalmente, sofocados. Es hasta que los sectores disidentes comienzan a organizarse combativamente y a presentar una cohesión ideológica que infunda confianza a otros grupos sociales cuando se desencadena la crisis en otros sectores considerados claves para la estabilidad del sistema. Estas circunstancias, aunadas a una situación favorable en el panorama internacional, son los indicadores de la llamada etapa revolucionaria.

El objetivo fundamental de la revolución es la transformación radical de las estructuras de poder y el establecimiento de un nuevo orden social.

De la misma manera, aun en épocas de auge en el desarrollo de un paradigma, y a pesar de la intensa actividad en la ciencia normal, no se logra consenso absoluto. No sólo existe actividad en programas de investigación que impulsan la evolución del paradigma en direcciones distintas, sino también la aparición continua de resultados experimentales anómalos, de enigmas no resueltos, de hipótesis auxiliares no justificadas, o de contradicciones internas no explicadas que pueden provocar crisis en el desarrollo de algunos programas de investigación. Ahora bien, si la crisis se presenta en programas que la comunidad considera de mayor relevancia, entonces se les presta atención particular. El surgimiento de crisis es capaz de generar, en pequeños sectores de la comunidad, un sentimiento profundo de insatisfacción que los puede llevar al extremo de cuestionar los conceptos y principios que sustentan al propio paradigma. Al comienzo, estos pequeños sectores, trabajando fuera del paradigma establecido, comienzan a construir teorías para interpretar resultados anómalos aislados. La reacción de la comunidad científica ante este tipo de teorías es, en general, o de rechazo, o, simplemente, de olvido. Baste recordar el fuerte rechazo inicial a las hipótesis que, sobre la estructura atómica, enuncia Bohr<sup>(40)</sup> en los comienzos de la mecánica cuántica. Bohr supone, sin justificación y en contra de los principios fundamentales de la mecánica newtoniana, que los electrones se pueden mover alrede-

dor del núcleo atómico sólo en cierto número de órbitas cuantizadas y que, durante su movimiento orbital, no radían energía electromagnética. Esta es otra hipótesis que se opone a la teoría de la radiación del paradigma maxwelliano; sin embargo, con la suposición de que los electrones radían sólo cuando pasan de una órbita a otra, se explica el enigma de las líneas espectrales en los espectros de radiación atómica. La simplicidad de tal explicación, aunada a la circunstancia de que el modelo aparece en una época en que la comunidad científica otorga singular atención a la crisis en que se encontraba la teoría atómica, hace que el modelo atómico de Bohr atraiga el interés de algunos sectores de la comunidad.

La etapa revolucionaria propiamente dicha, se inicia cuando las teorías construidas por los grupos disidentes comienzan a inspirar confianza a sectores más amplios de la comunidad. Esto se debe a que esas teorías, además de ofrecer una interpretación coherente a un conjunto de resultados considerados anómalos, brindan un marco teórico promisorio para la superación de la crisis de algún programa considerado importante.

Pero la adopción de conceptos y principios ajenos al paradigma establecido genera un tipo de problema completamente nuevo y diferente. Por otra parte, muchos de los problemas y programas de investigación articulados en el paradigma establecido, carecen de sentido cuando se analizan en términos de nuevos principios. En otras palabras, el programa revolucionario, en su desarrollo, va generando sus propios problemas, sus propias contradicciones, sus propias aplicaciones, sus propias anomalías y sus propias prioridades. El verdadero propósito de una revolución científica no es generar una explicación alternativa a los problemas y contradicciones del paradigma establecido, ni resolver todos sus enigmas, ni comprender todas sus anomalías; más bien, generar una visión diferente del mundo físico con su problemática propia.

Así, el modelo atómico de Bohr, además de proponer una posible solución al enigma de las líneas espectrales, plantea un problema completamente nuevo: la justificación de los postulados de cuantización. Lo anterior, aunado a las complicaciones requeridas por el modelo de Bohr para explicar cuantitativamente los espectros de átomos complejos, dió lugar al desarrollo de teorías más sofisticadas como la mecánica matricial<sup>(41)</sup> y la mecánica ondulatoria<sup>(36)</sup>. A su vez, estas teorías generan problemas conceptuales propios cuya discusión se concentró en el de-

bate sobre origen físico de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg<sup>(42)</sup>; esto fue lo que se llamó el problema de la dualidad onda-corpúsculo<sup>(43)</sup>. Las discusiones se prolongaron por varios años adentrándose en el terreno filosófico y ocupando la actividad de mentes brillantes de la época.

Por otra parte, uno de los problemas más importantes en los programas de la estructura atómica, enclavados en el paradigma newtoniano y en el paradigma maxwelliano, fue el problema de la estabilidad atómica. De acuerdo a la teoría de la radiación, basada en las ecuaciones de Maxwell, cualquier partícula cargada en movimiento orbital radiaba energía electromagnética. Si se considera al átomo como un pequeño sistema planetario cuyo núcleo juega el papel del Sol y a los electrones el papel de los planetas, estos últimos, eventualmente, perderían por radiación toda su energía de movimiento y terminarían en reposo junto al núcleo. Esta predicción entra en desacuerdo con la misma existencia de átomos estables. Dentro del esquema propuesto por el programa cuántico, tal problema carece de sentido porque, de acuerdo con él, además de no poder asociar a los electrones trayectoria alguna, se supone, sin justificación, que en su estado base su comportamiento obedece a una distribución estática de carga, incapaz de radiar energía electromagnética.

Resulta entonces que problemas fundamentales para un cierto programa de investigación ni siquiera son problemas cuando se les examina bajo la luz de principios distintos.

De igual manera, todos los problemas del programa lorentziano acerca de la estructura del éter, de su descripción dinámica alrededor de cuerpos en movimiento, de su relevancia en los fenómenos gravitatorios y del comportamiento de partículas atómicas, carecen de sentido cuando se les considera desde el punto de vista del programa einsteiniano, pues éste se basa en la suposición de que el éter no existe.

Es importante hacer notar que el programa revolucionario genera nuevos tipos de aplicaciones que se integran en nuevos programas de investigación no contemplados en el viejo paradigma; por ejemplo, el programa cuántico genera una intensa actividad científica en programas de física molecular, física nuclear y física del estado sólido. La articulación de estos programas, bajo las leyes de la mecánica cuántica, conduce a la estructuración del nuevo paradigma.

Aunque se asegure<sup>(44)</sup> que las leyes de la mecánica newtoniana se pueden "deducir" como límite apropiado de las leyes de la mecánica cuántica, no implica que el paradigma cuántico sea una extensión del paradigma newtoniano porque, como hemos visto, cada paradigma posee su propia problemática. Esto significa que aquellos programas del paradigma newtoniano relacionados con el comportamiento de cuerpos macroscópicos no fueron afectados gravemente por el programa revolucionario y, aunque su incorporación al paradigma cuántico no altere la formulación matemática de sus problemas, ésta requiere de un proceso de reinterpretación. Es decir, el paradigma cuántico y el paradigma newtoniano representan dos visiones incompatibles del mundo físico y, por consiguiente, la adopción de un nuevo paradigma no representa un proceso acumulativo de conocimientos.

Hasta ahora hemos descrito, primeramente, cómo dentro de un paradigma una serie de anomalías o contradicciones internas da lugar a una crisis; después, cómo una crisis, a su vez, genera la formulación de un programa de investigación revolucionario y, finalmente, cómo este programa se convierte en un nuevo paradigma. Además, hemos ilustrado este proceso con ejemplos tomados de la historia de la física.

Lo que no hemos preguntado es, ¿por qué ciertas anomalías son juzgadas más importantes que otras hasta provocar situaciones críticas?, ¿por qué en determinada época la actividad científica se encuentra concentrada en el desarrollo de ciertos programas de investigación? y, ¿por qué en otras épocas la comunidad dirige sus intereses al desarrollo de otros programas?

Creemos que la respuesta a estas preguntas es indispensable si queremos pasar de un nivel puramente descriptivo al del análisis del proceso de formación y destrucción del consenso, es decir, al análisis de las razones por las que la comunidad científica abandona determinado conjunto de programas y principios rectores para adoptar otro radicalmente distinto.

Uno de los factores importantes en el proceso de formación de un consenso, es el impacto causado por los primeros éxitos logrados por las nuevas teorías al explicar ciertos resultados anómalos. Sin embargo, este impacto depende en gran parte de la importancia que la comunidad científica le otorga al programa entorpecido por la aparición de los re-

sultados anómalos. Por ejemplo, en el siglo XVIII no existía algún modelo que explicara cuantitativamente la mayor parte de las propiedades del comportamiento de los gases. En este sentido, podríamos decir que los gases respondían a un comportamiento anómalo. No obstante, en 1738 Daniel Bernoulli<sup>(45)</sup> deduce la ley de Boyle suponiendo que los gases estaban compuestos por pequeñas partículas esféricas que chocaban elásticamente unas con otras y también con las paredes del recipiente. Estas ideas, que fueron retomadas con éxito cien años más tarde, no tuvieron ningún impacto en una época en que la comunidad científica consideraba que otros programas de investigación eran más relevantes. Esto indica que aquellos programas considerados importantes son los que tienen mayores posibilidades de desarrollo y donde las crisis reciben más atención y mejor vigilancia.

Ahora bien, la importancia que la comunidad científica le confiere a los distintos programas de investigación depende de la combinación de muchos factores que pueden frenar el desarrollo de un determinado programa, haciendo que la comunidad pierda interés en él o, por el contrario, estimular su progreso atrayendo la atención de otros sectores de la comunidad. Aun cuando es difícil separar estos factores, creemos que es posible distinguir algunos de ellos. Primeramente, mencionaremos el factor tecnológico porque, muchas veces, la realización de experimentos considerados significativos para el desarrollo de un programa se ve frenada por la carencia de una tecnología adecuada. Baste mencionar el experimento requerido por las predicciones opuestas de la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria sobre la magnitud relativa de la velocidad de la luz en el agua y en el aire, hechas a principios del siglo XVII. Como es bien sabido, el experimento no fue realizado sino hasta 1850 por Fizeau<sup>(46)</sup> y Foucault<sup>(47)</sup> debido, esencialmente, a problemas de carácter tecnológico.

Por otra parte, los avances tecnológicos actuales que han hecho posible la construcción de los grandes radiotelescopios, así como el lanzamiento de satélites artificiales y laboratorios espaciales, han dado, en astronomía, un nuevo impulso al desarrollo de diversos programas de investigación.

Otro factor que influye en la importancia dada por la comunidad a los programas de investigación es la aplicación de la ciencia, porque

el objetivo que busca la comunidad científica al construir una estructura de conocimientos para comprender el mundo físico no sólo satisface curiosidades, sino que, además, es útil para resolver múltiples problemas. Muchos de esos problemas son generados por la aparición de contradicciones internas o de resultados anómalos y otros provienen de necesidades inherentes a la estructura social donde la comunidad científica está inmersa. Por ejemplo, el problema de la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz aparece en el siglo XVII debido a las contradicciones internas de ambos modelos, cuando, con éstos, se intentan explicar todos los fenómenos ópticos conocidos hasta entonces; en cambio, en ese mismo siglo los problemas sobre el comportamiento de la luz a través de lentes adquiere una importancia particular, debido a sus aplicaciones en la construcción de instrumentos ópticos.

Sin embargo, cuando las relaciones entre la comunidad científica y los sectores que trabajan en la aplicación de la ciencia se realizan dentro de sistemas sociales con alto grado de organización, resulta difícil descubrir las causas que originaron determinado problema. Por ejemplo, la naturaleza cuántica de la luz, que se manifiesta al tratar de explicar el espectro de radiación del cuerpo negro, no se puede desligar de la importancia que tenía el estudio sobre los espectros de radiación para la industria química europea del siglo XIX<sup>(48)</sup>.

Creemos también importante considerar el factor cultural donde incluimos las influencias que, sobre la comunidad científica, ejercen las diversas corrientes filosóficas, religiosas o políticas para la selección y elaboración de un programa de investigación. Por ejemplo, se suele justificar la inclinación de la comunidad a favor de alguna teoría utilizando argumentos de simplicidad, de generalidad o de belleza<sup>(49)</sup>.

También es posible incluir el llamado factor psicológico, si creemos que la comunidad se ha enfrentado, en el curso de su actividad científica, a diversos obstáculos de carácter epistemológico que han impedido el progreso de ciertos programas de investigación. Por ejemplo, se ha pensado<sup>(50)</sup> que estos obstáculos están presentes en el proceso mismo del conocimiento y que sólo la búsqueda de la abstracción hace posible que el espíritu científico logre superarlos.

El problema reside ahora en analizar cuidadosamente cuál es la influencia que estos factores han ejercido sobre la comunidad científica

para que ésta intensifique su actividad en el desarrollo de ciertos programas de investigación. El objeto de este análisis es determinar el proceso por el que la compleja combinación de los factores mencionados hace posible la instauración del consenso conceptual y metodológico dentro de la comunidad científica.

Es evidente que tales factores son generados por el sistema social donde la comunidad científica se encuentra. En consecuencia, si un análisis no considera a la comunidad científica como un grupo social estructurado dentro de un sistema social más amplio, entonces puede no encontrarse racionalidad en el comportamiento de la comunidad científica al enfrentarse ésta al ejercicio de su actividad<sup>(51)</sup>.

Por otra parte, no es posible efectuar el análisis de las relaciones en la comunidad científica con la estructura social que la contiene, sin echar mano de una teoría social. Además, para analizar las relaciones estructurales entre diversos grupos sociales se requiere de una teoría sobre la estructura de los sistemas sociales que brinde un marco conceptual y metodológico que sustente la elaboración del análisis.

Lo anterior nos conduce a la necesidad de seleccionar una teoría sobre la estructura de los sistemas sociales a fin de realizar el análisis; asimismo, esto nos lleva al problema metodológico de encontrar criterios que indiquen qué teoría social es la más adecuada y el tipo de validez que tendría el análisis así realizado.

Es importante señalar que no ser conscientes de este problema puede originar que se exagere la validez de los análisis fundamentados en alguna teoría social que ha sido seleccionada en base a una decisión no justificada desde un punto de vista metodológico. Lo mismo puede decirse de los análisis sobre la evolución psíquica de la mentalidad científica, hechos fundamentados en alguna teoría psicoanalítica.

Como vemos, nos encontramos ante un problema metodológico más complicado que el problema inicial del presente trabajo. Esto es, comenzamos analizando someramente los problemas metodológicos de la física, cuyo objeto de estudio es el mundo inanimado, y concluimos que para resolver tales problemas necesitamos analizar los problemas metodológicos de las ciencias sociales, cuyo objeto de estudio es la sociedad en su conjunto. En consecuencia, *la separación que usualmente se hace de la metodología de las ciencias experimentales, en contraposición a la metodología de*

*las ciencias sociales, es una separación artificiosa porque los problemas metodológicos de ambas forman parte de una misma problemática.*

## V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo analizamos los problemas metodológicos del método experimental, ejemplificando su aplicación en la física.

Comúnmente se cree que la objetividad del conocimiento en la física recae en la posibilidad de confrontar teoría con experimento. Esto lleva a que la naturaleza misma, a través del experimento, sea quien decida sobre la validez de las teorías.

Sin embargo, hemos mostrado que la confrontación teoría-experimento no es suficiente para refutar una teoría porque, para esto, es indispensable aceptar ciertos conocimientos como no problemáticos. No obstante, dado que esta aceptación se realiza sin certidumbre absoluta, concluimos que es imposible decidir si una teoría ha sido, finalmente, refutada por el experimento. La conclusión fue, en esencia, la misma, aun ampliando el concepto de teoría al concepto dinámico de programa de investigación.

Con lo último mostramos lo difícil que es rechazar un programa de investigación basándonos sólo en la confrontación teoría-experimento. Afirmamos que es necesario recurrir al análisis histórico para examinar los criterios que la comunidad científica ha utilizado para decidir sobre el rechazo o aceptación de cierto programa de investigación. Nuestra conclusión es que dichos criterios son, esencialmente, los de consenso. Entonces nos abocamos a examinar los factores que determinan la formación y la destrucción del consenso.

Finalmente, señalamos que no es posible analizar la influencia de factores generados por la estructura social en que se encuentra la comunidad científica, sin tener, a la vez, una teoría sobre dicha estructura social. Además, la selección de la teoría representa, nuevamente, un problema metodológico. Consideramos que con esto hemos mostrado el sentido en que los problemas metodológicos de las ciencias experimentales forman parte del problema metodológico de las ciencias sociales y, más generalmente, de las ciencias del hombre. También señalamos los peligros que se presentan por no reconocer la magnitud de este problema.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores manifestamos que el presente trabajo se originó a partir de discusiones sostenidas con Marco A. Martínez, José Marquina, Ignacio Campos y Leonardo Sánchez, a quienes agradecemos sus orientaciones. Asimismo, agradecemos los comentarios y sugerencias de Elaine Reynoso, Tomás Brody, Fernando Hitt, Carlos Imaz y Luis Moreno; igualmente al árbitro por su informe detallado y a Vicente Carrión Miranda por colaborar en la revisión de estilo.

## REFERENCIAS

1. R. Blanché, El Método Experimental y la Filosofía de la Física, Fondo de Cultura Económica (Breviarios) México (1972) Libro VI; H. Poincaré, Science and Hypothesis, Dover Publications, N.Y. (1952), Caps. 9 y 11.
2. K.R. Popper, Conjectures and Refutations, Totledge (1963); K.R. Popper, The Logic of Scientific Discovery, Harper (1965).
3. "On Dirac Magnetic Poles" en Old and New Problems in Elementary Particles, ed. G. Puppi, Academic Press, N.Y. (1968); P.G.H. Sandars, Contemporary Physics 7 (1966) 419; R.H. Carrigan, Nuovo Cimento 38 (1965) 638; R.L. Fleischer, H.R. Hart, I.S. Jacobs, P.B. Price, W.M. Schwarz y F. Aumento, Phys. Rev., 184 (1969) 1398.
4. P.A.M. Dirac, Proc. Roy Soc. A133 (1931) 60; Phys. Rev., 74 (1948) 817; J. Schwinger, Science 165 (1969) 757; A.S. Goldhaber, Phys. Rev., 140 (1965) B 1407.
5. R. Descartes, Dioptrique, publicada en 1637; Météores, en 1638 y Principia Philosophiae, en 1644; E. Whittaker, A History of the Theories of Aether and Electricity, Harper and Brothers, N.Y. (1960) Vol. I, pp. 4-12.
6. I. Newton, Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and his System of the World, University of California Press, Berkeley (1974).
7. A. Einstein y M. Growssmann, Zeitschrift für Math. y Phys., 62 (1964) 215; A. Einstein, Berlin Sitzungsberichte (1915) págs. 778, 779, 831, 844.
8. A.A. Michelson y E.W. Morley, American Journal of Science 32 (1887) 333; Phil. Mag., 24 (1887) 449. Ver también The Michelson-Morley experiment, de R.S. Shankland, American Journal of Physics, 32 (1964) 16.
9. A.S. Kompaneyets, Theoretical Physics, Gordon and Breach, N.Y. (1962) pág. 191; Einstein, Michelson and the crucial experiment de G. Holton, Isis, 60 (1969) pp. 133-197, en especial pág. 160.
10. A. Einstein, Annalen der Physik, 17 (1905) 891; J.M. Levy-Lebond, American Journal of Physics, 44 (1976) 271; L.C. Baird, American Journal of Physics, 44 (1976) 167.
11. P.B. Price, E.K. Shick, W.Z. Osborne y L.S. Pinsky, Phys. Rev. Lett., 35 (1975) 487.
12. A.F. Alexander, The Planet Uranus, Faber and Faber, London (1965).

13. U.J. Leverrier, *Ann. Obs., París (1859) Vol. V, pág. 109.*
14. R.L. Waterfield, *A Hundred Years of Astronomy*, The McMillan Co. (1938) pág. 30.
15. U.J. Leverrier, *Ann. Obs., París (1859) Vol. V, pág. 109*; F. Hoyle, *Astronomy and Cosmology*, W.H. Freeman and Co. (1975) pág. 476.
16. P.B. Price, E.F. Shirk, W.Z. Osborne y L.S. Pinsky, *Phys. Rev.*, D18 (1978) 1382; M.W. Friedlander, *Phys. Rev. Lett.*, 35 (1975) 1167; L. Alvarez, L B L Report No. 4260 (1975) (no publicado); P.H. Flower, *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Cosmic Rays Munich (1975)* Ed. Klans Pinakau, Max-Planck-Institute, München (1975) Vol. XII, pág. 4049; R.L. Fleischer y R.M. Walker, *Phys. Rev. Lett.*, 35 (1975) 1412.
17. F. Hoyle, *Astronomy and Cosmology*, W.H. Freeman and Co. (1975) pág. 440; M. Grosser, *The Discovery of Neptune*, Dover, N.Y. (1979).
18. B.C. Murray y E. Burgess, *Flight to Mercury*, Columbia University Press (1976).
19. S. Newcomb, *Suppl. Amer. Ephem. Naut. Alm.* (1897); J.C. Brandt, P.W. Hodge, *Solar System Astrophysics*, McGraw-Hill, Col., N.Y. (1964); A.J. Meadows, *Early Solar Physics*, Pergamon Press, Oxford (1970).
20. B. Russell, *An Outline of Philosophy*, The World Publishing Co. (1960) Cap. 24.
21. I. Lakatos, A. Musgrave, *Criticism and the Growth of Knowledge*, Cambridge (1970), *Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes*, I. Lakatos, *Proceeding of the Aristotelian Society* (1968) Vol. 69.
22. H.A. Lorentz, *The Theory of Electrons*, B.G. Teubner, Leipzig (1909).
23. H.A. Lorentz, *Proc. Amst. Acad.* 2 (1900) 559. Traducción francesa aparece en *Arch. Néerl.*, 7 (1902) 325.
24. E. Zahar, *Brit. J. Philos. Sci.*, 24 (1973) 95, 233.
25. K. Feyerabend, *Brit. J. Philos. Sci.*, 25 (1974) 25.
26. A. Einstein, *Berlin Sitzungsberichte* (1915) 831.
27. J. Soldner, *Berliner Astr. Jahrb.* (1804) pág. 161; reimpresso en *Ann. de Phys.*, 65 (1921) 593; G. Van Biesbroek, *Ast. S.*, 60 (1950) 49; E. Finaly-Freundlich y W. Ledermann, *Mon. Not. R.A.S.*, 104 (1944) 40.
28. M. Brouwer, *Am. J. Phys.*, 48 (1980) 425.
29. H.A. Lorentz, *Versl. Kon. Akad. Wet.*, Amsterdam, 24 (1916) 1759; J. Menhara, *The Physicist's Conception of Nature*, Reidel, Boston (1973) págs. 135, 133.
30. H.A. Lorentz, *Collected Works*, Vol. IX, Nyhoff, Amsterdam (1934) págs. 274, 275.
31. E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Harper and Bros., N.Y. (1960) Vol. I.
32. T.A. Brody, A.M. Cetto y L. de la Peña, *Rev. Mex. Fis.*, 26 (1979) 59.
33. T.S. Kuhn, *La estructura de las revoluciones científicas*, Fondo de Cultura Económica, México (1971); T.S. Kuhn, *The Copernican Revolution*, Modern Library (1959).
34. I. Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, presentado ante la Real Sociedad en tres partes, entre 1686 y 1687.
35. H. Goldstein, *Classical Mechanics*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading (1959) Cap. 2.
36. E. Schrödinger, *Annalen der Physik*, 79 (1926) 361, 489, 734; L. de Broglie, *Le Journal de Physique et le Radium*, 7 (1926) 321.
37. L.D. Landau y E.M. Lifshitz, *Teoría Clásica de Campos*, Ed. Reverté, Barcelona (1967) Cap. 4.

38. H.K. Onnes, *Leiden Comm.* 124c (1911).
39. J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R., Schrieffer, *Phys. Rev.*, 108 (1957) 1175.
40. N. Bohr, *Nature*, 121 (1928) 580; *Phys. Rev.* 48 (1935) 696; M. Bohr, *Atomic Physics*, Blackie and Son Ltd., London (1962) Cap. 4.
41. W. Heisenberg, *Zeitschrift für Physik*, 35 (1925) 557; E. Schrödinger, *Annalen der Physik*, 79 (1926) 734; C. Eckart, *Phys. Rev.*, 28 (1926) 711.
42. W. Heisenberg, *Zeitschrift für Physik*, 43 (1927) 172; J.W.M. Du Mond y E.R. Cohen, *Rev. Mod. Phys.*, 25 (1953) 691.
43. L. de la Peña, *Introducción a la Mecánica Cuántica*, C.E.C.S.A., México (1979) pág. 62.
44. E. Merzbacker, *Quantum Mechanics*, John Wiley and Sons, N.Y. (1961) pág. 42.
45. D. Bernoulli, *Hydrodynamic*, Strasbourg (1738) Sec. 10; R. Hooke, *De potentia restitutiva*, London (1678). Véase Ref. 31.
46. H.L. Fizeau, *Comptes Rendus*, 30 (1850) 569. Véase Ref. 31.
47. L. Foucault, *Comptes Rendus*, 30 (1859) 551. Véase Ref. 31.
48. H. Ross y S. Ross, *Economía Política de la Ciencia*, Ed. Nueva Imagen, México (1979); *La Radicalización de la Ciencia*, Ed. Nueva Imagen, México (1979); J.N. Levy-Leblond, *Autocrítica de la Ciencia*, Ed. Nueva Imagen, México (1980); G. Ciccotti, M. Cinni, M.A. de Moria, G. Jonasino, *L'apre e L'architetto Paradigmi Cientifici e Materialismo Storico*, Feltrinelli Economica S.T.A., Milano (1977).
49. B. Easlea, *La Liberación Social y los Objetivos de la Ciencia*, Siglo XXI, España (1973).
50. G. Bachelard, *La Formación del Espíritu Científico*, Siglo XXI, México (1979); *El Compromiso Racionalista*, Siglo XXI, México (1980).
51. P. Feyerabend, *Against Method*, Verso, London (1978).