

CONOCIMIENTO DEL MUNDO FÍSICO:
LAS TEORÍAS COMO GUÍA
DE LA OBSERVACIÓN

Videoteca de Ciencias y Humanidades

Colección
Aprender a Aprender
Serie
Ciencias de la materia: génesis y evolución
de sus conceptos fundamentales

COORDINADORES DE ÁREAS Y ESPECIALIDADES:

Luis de la Peña
CIENCIAS DE LA MATERIA
Pablo Rudomín
CIENCIAS DE LA VIDA
Pablo González Casanova
CIENCIAS HUMANAS
Rolando García
TEORÍA Y METODOLOGÍA
Beatriz Garza Cuarón
CIENCIAS DEL LENGUAJE
Raymundo Bautista
MATEMÁTICAS
Hugo Aréchiga
CIENCIAS DE LA SALUD
Felipe Lara Rosano
INGENIERÍAS Y TECNOLOGÍAS

CONOCIMIENTO DEL MUNDO FÍSICO:
LAS TEORÍAS COMO GUÍA
DE LA OBSERVACIÓN

Rolando García Boutique



Universidad Nacional Autónoma de México

Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades
Coordinación de Humanidades
México, 1998

Primera edición, 1998

Edición científica:

Rogelio López Torres

Diseño de portada:

Ángeles Alegre Schettino y Lorena Salcedo Bandala

D.R. © 1998

Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigaciones Interdisciplinarias
en Ciencias y Humanidades
Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.

Impreso en México/*Printed in Mexico*

ISBN: 968-36-7363-5

Obtuvo el grado de maestría y doctorado por la Universidad de California y es doctor Honoris Causa de la Universidad de Buenos Aires. Ha sido profesor invitado en diversas universidades del mundo. Investigador de la sección de Metodología y Teoría de la Ciencia del Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional; Investigador Nacional del Sistema Nacional de Investigadores nivel III; miembro de la Academia Mexicana de Ciencias y profesor emérito de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente es coordinador del Seminario sobre Sistemas Complejos organizado por la sección de Metodología y Teoría de la Ciencia del CINVESTAV y por el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, de la UNAM.

CONOCIMIENTO DEL MUNDO FÍSICO:
LAS TEORÍAS COMO GUÍA
DE LA OBSERVACIÓN

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA DEL SIGLO XVII

En el año 1642 murió Galileo y nació Newton. En el periodo que cubre la vida de estos dos gigantes de la historia de la ciencia, la concepción del mundo cambió profundamente en aquella parte restringida del planeta que correspondió a la civilización greco-romano-cristiana, de la cual somos herederos intelectuales. El proceso de cambio se suele denominar, abreviadamente, la Revolución Científica del siglo XVII, porque fue en la segunda mitad de dicho siglo cuando culminó —con Newton— ese proceso.

Pero ¿qué es lo que cambió?, ¿en qué consistió la tal “revolución”? La versión tradicional (que es la versión que mi generación y las generaciones anteriores aprendieron en los textos de historia y en las clases de colegios y universidades) nos dio una visión distorsionada del proceso. Sintéticamente se refería al desmoronamiento de las concepciones provenientes de los griegos, específicamente la concepción aristotélica del mundo, la cual era presentada como un conjunto de ideas absurdas, sin ningún sustento. Se sostenía, asimismo, que el cambio se debió a la intro-

ducción de **el método científico**, basado en la observación y la experimentación, que hizo posibles los grandes logros de dicha revolución.

Aquí es necesario responder a dos preguntas. En primer lugar ¿por qué se tardó veinte siglos en desechar esas ideas si es que eran tan absurdas? En segundo lugar, ¿fue realmente un cambio de *método* lo que permitió reemplazar esas “ideas absurdas” por otras “correctas”?

Comenzaré por la segunda pregunta. Con respecto al método, la historia de la ciencia y la historia de la filosofía suelen dar un lugar prominente a Francis Bacon, considerándolo como **el** filósofo de la nueva ciencia que estaba surgiendo.

Sin embargo, Francis Bacon nunca produjo un trabajo científico significativo y toda su producción escrita muestra claramente que poco entendía de lo que ocurría en la ciencia de su siglo y del siglo precedente. Rechazó las ideas de Copérnico y de Kepler e ignoró completamente a Galileo. Ocupó posiciones políticas importantes en su país. El gran historiador Alexandre Koyré solía decir que cuando Bacon se refería a la ciencia hablaba como un canciller (cargo que efectivamente desempeñó en Inglaterra).

Quizá su innmerceda fama se deba a que era un escritor brillante y cautivante, que tuvo una enorme influencia porque consiguió dar una visión optimista del progreso de la ciencia basado en la observación y la experimentación y en el uso paciente del “método correcto” que él formuló. Para Bacon, la base de la investigación científica consistía en recoger de manera sistemática observaciones concernientes al fenómeno que se desea estudiar disponiéndolas en tres listas. La primera lista (“tabla de la esencia y de la presencia”) debía contener los casos positivos, es decir, todos los ejemplos de cualquier género en los cuales ocurría el fenómeno. La segunda lista (“tabla de las desviaciones o de la ausencia en casos próximos”) debía contener ejemplos en los cuales el fenómeno no se presenta, si bien se había presentado en circunstancias aparentemente simila-

res. La tercera lista (“tabla de las diferencias de grado”) incluiría casos positivos en los que el fenómeno podía ser observado pero en grados diversos, según las circunstancias. Bacon sostenía que a partir de esas tablas se podrían establecer (inductivamente) leyes generales con un “primer grado de generalidad”. Luego, con cierto número de esas leyes se obtendrían otras con “un segundo grado de generalidad”, prosiguiendo de esta manera hasta obtener las leyes más generales que rigen los fenómenos naturales.

Las corrientes empiristas que han dominado en las ciencias de los siglos subsiguientes utilizaron métodos mucho más refinados, pero predominó la búsqueda de generalizaciones inductivas a partir de los resultados de experiencias en casos particulares. No cabe duda de que muchas *leyes empíricas* se obtuvieron de esa manera y jugaron un papel importante en el desarrollo de la ciencia como fue el caso cuando se dieron los pasos iniciales en la botánica y la zoología. Sin embargo, no es así como se elaboraron las teorías científicas.

En el siglo XVIII, el filósofo inglés Hume, nacido pocos años antes de que muriera Newton, se encargó de demoler la idea de que una generalización inductiva pudiera tener carácter explicativo.¹ Más aún, esa concepción del méto-

¹ El llamado “método inductivo” estuvo siempre asociado a la idea de “relaciones causales”. Cuando, en la experiencia pasada, dos eventos A y B aparecieron siempre en sucesión y no se han observado casos de A que no hayan sido seguidos por B, se suele inferir que A debe ser causa de B. El filósofo David Hume, nacido poco antes de la muerte de Newton, hizo una crítica profunda a tal tipo de inferencia. En sentido estricto, ningún objeto o evento implica la existencia de otro objeto o evento. No importa —afirma Hume— cuántas veces hemos observado la asociación de A con B. De allí no se puede deducir que A y B estarán asociados en el futuro. Esto no excluye el hecho de que, cuando se observa A, tengamos la expectativa de que ocurre B. Pero ésta es una actitud psicológica que no nos da razón para afirmar que haya una relación necesaria entre A y B.

do científico era muy pobre comparada con la manera en que los griegos construyeron sus teorías sobre el mundo. Porque los griegos también hicieron su revolución científica veinte siglos antes. Y esto es lo que me propongo analizar para poder comprender el resto de la historia.

Comenzaremos con Platón, aunque sus raíces son muy anteriores. No tengo el propósito de reproducir ni de intentar una síntesis de la filosofía platónica. Para el objetivo de esta introducción tomaré solamente un aspecto de sus concepciones astronómicas que pone en evidencia las características del aporte griego a la ciencia de su época.

EL SISTEMA DEL MUNDO

La palabra *mundo* (del latín *mundus*) se utilizó en el mismo sentido del término griego *cosmos*, que originariamente significaba orden y designaba al universo considerado como el conjunto que estaba compuesto por la Tierra, la Luna, el Sol y los demás astros. Ese conjunto se suponía bien ordenado por ser de origen divino. *El sistema del mundo* era, en su acepción primitiva, el sistema bien ordenado que forman la Tierra y los astros. La teoría de los movimientos planetarios que surgía de ese sistema se llamó *cosmología*.

Los griegos heredaron de civilizaciones anteriores —egipcios, asirios, caldeos, hindúes— los intentos (¿teorías?) de descifrar el orden subyacente en la apariencia visible de las complicadas trayectorias de los astros.

Las más importantes contribuciones científicas de los griegos fueron sin duda en el campo de las matemáticas y de la mecánica, donde sobresalen los nombres de Euclides y de Arquímedes con aportes que perduraron a través de los siglos. Pero ya antes de ellos, con los pitagóricos y con Platón, la geometría había sido entronizada como la ciencia que permitía interpretar el mundo. No puede sorprender,

por consiguiente, que la cosmología se plantee como un problema geométrico. Y ese planteo dio lugar a la *primera teoría física formulada con precisión* (aunque con premisas que nadie pudo demostrar, durante siglos, que eran falsas). Veamos cómo la formuló Platón.

El tema está tratado extensamente, aunque de manera muy intrincada, en varios de los famosos diálogos de Platón, particularmente el *Timeo*, pero está más claramente expuesto por Simplicio, uno de los grandes comentaristas de las obras de Platón y de Aristóteles, de la siguiente manera: Platón admitía como principio que los cuerpos celestes se mueven con un movimiento circular uniforme y propuso a los matemáticos este problema: ¿cuáles movimientos circulares y perfectamente regulares conviene adoptar como hipótesis a fin de que se puedan “salvar las apariencias” presentadas por los astros errantes? (En adelante me referiré a esta propuesta como *el problema de Platón*.)

Para entender el problema de Platón debemos tener en cuenta algunos antecedentes. Los griegos habían observado que el Sol, la Luna y los cinco planetas conocidos entonces, describían trayectorias muy complicadas, por lo cual se les llamaba “astros errantes”, sobre un fondo de estrellas fijas. Platón concibe, siguiendo la tradición pitagórica, que esos movimientos son “apariencias” de una realidad que debe ser necesariamente perfecta por ser obra divina. Como la única figura perfecta es el círculo, debe suponerse que esos movimientos en apariencia erráticos resultan de la composición de un cierto número de movimientos circulares y uniformes. El hecho extraordinario es que esta suposición, *adoptada como principio*, está en la base de todas las cosmologías durante los 2 mil años que van de Platón a Kepler.

El problema de Platón se completa con otra suposición. Esos movimientos circulares uniformes cuya composición debería ser hecha de tal manera que finalmente representara adecuadamente las trayectorias aparentes de los astros,

según las observaciones astronómicas (a ello se le llamó “salvar las apariencias”), deberían ser homocéntricos y tener como centro común a la Tierra.

El primer astrónomo que acometió la empresa de responder al desafío de Platón fue Eudoxio. La escrupulosidad de Eudoxio queda de manifiesto en el hecho de que viaja a Egipto para obtener los mejores datos observacionales disponibles. Eudoxio encuentra en Heliópolis y en Menphis observaciones más precisas que las que tenían los griegos y con registros que cubrían periodos más extensos. De allí sacó las trayectorias “aparentes” de los astros. Luego, con una extraordinaria ingeniosidad construye un modelo de esferas concéntricas que respondían, en primera aproximación, al problema de Platón. El modelo sufrió modificaciones y perfeccionamientos. El tema es retomado por Aristóteles quien, aun cuando tenía una concepción epistemológica muy diferente a la de Platón, compartía las premisas básicas y por consiguiente continuó desarrollando esa misma cosmología.

En su *Tratado del cielo* (*De Caelo*), Aristóteles enuncia lo que podemos considerar como los axiomas o “primeros principios” en los que basa su cosmología y que dominarían toda la astronomía antigua: la esfera celeste es eterna, incapaz de alteración o de corrupción y por consiguiente el único movimiento que puede tener, el único que puede seguir indefinidamente permaneciendo siempre idéntico a sí mismo, es el movimiento de rotación uniforme. Sin embargo, todo cuerpo animado de un movimiento de rotación gira necesariamente alrededor de un punto fijo. Pero lo que es inmóvil no es un simple punto geométrico sino que debe ser una porción de materia de cierta extensión, es decir, un cuerpo. Por otra parte, un razonamiento puramente metafísico lleva a Aristóteles a la afirmación de que ese cuerpo no puede ser de la sustancia incorruptible de los cielos. De aquí concluye, dando un salto audaz en su razonamiento: “Es necesario que la Tierra exista”.

Pero Aristóteles no se queda, como Platón, en el mundo de las ideas. Su posición filosófica le obliga a buscar “evidencias empíricas” para sostener sus “principios”, ¡y las encuentra!

Su principal argumento fue que si la Tierra no permaneciera en el centro del universo y se desplazara como los cuerpos celestes (el Sol, la Luna y los planetas), entonces se producirían cambios de posición de las estrellas fijas, lo cual no ocurre. Una misma estrella se levanta siempre en el mismo lugar, y se acuesta siempre en el mismo lugar. La ausencia de lo que hoy llamamos paralaje² de las estrellas fue el argumento más poderoso que se opuso (hasta el siglo XVI) a toda cosmología que concibiera a la Tierra desplazándose fuera del centro del mundo.

Además de ese argumento en contra del *desplazamiento* de la Tierra, había también “evidencias empíricas” contra la idea de un movimiento de *rotación*. Los griegos tenían bien claro que es mucho más simple un modelo en el cual la Tierra gire sobre su eje, que un modelo con la Tierra inmóvil. De hecho, Heráclido del Ponto, contemporáneo de Aristóteles, y Aristarco de Samos, un siglo más tarde, consideraban la Tierra como un planeta dotado de los mismos movimientos que los demás e imaginaron un sistema planetario heliocéntrico, pero no pudieron refutar las objeciones de Aristóteles.

El mismo Ptolomeo, cuando formuló en detalle su sistema geocéntrico, señaló que era igualmente posible explicar el movimiento diurno del cielo mediante una rotación de

² El término “paralaje” designa el desplazamiento aparente de un objeto causado por el cambio de posición del punto desde el cual es observado. Así, la revolución anual de la Tierra en torno al Sol origina que la observación de una estrella desde un punto fijo en la superficie terrestre debe hacer aparecer la estrella como describiendo una órbita cerrada. La medida del paralaje de una estrella está dada por el ángulo que forman dos visuales a dicho astro tomadas con seis meses de diferencia. Dada la enorme distancia a la que se encuentran las estrellas (aun la más cercana), tal ángulo requiere, para ser detectable, observaciones con un potente telescopio.

la Tierra en torno a su eje, o bien mediante una rotación de las estrellas fijas en torno a la Tierra. Sin embargo, rechazó la primera alternativa con dos argumentos que fueron considerados definitivos en los siglos siguientes:

a) Si la Tierra rotase realmente hacia el oriente, lo cual sería necesario para explicar el movimiento de la esfera celeste hacia occidente, una piedra lanzada verticalmente hacia arriba debía caer al occidente del punto de partida, puesto que en el intervalo entre el ascenso y el descenso la Tierra habría rotado hacia el oriente.

b) Por otra parte, deberíamos ver las nubes y los pájaros desplazándose a gran velocidad hacia el occidente, puesto que no podrían compensar la velocidad de rotación de la Tierra.

No es sorprendente que tanto los griegos como la ciencia del Medioevo³ y del Renacimiento adoptaran firmemente

la teoría geocéntrica primero formulada con precisión por Platón y Aristóteles, y luego por Ptolomeo.⁴ Esa teoría *tenía una base empírica*, es decir, era fruto de observaciones muy minuciosas, y no podía ser refutada con más observaciones, ni con observaciones más precisas. Efectivamente *no fue por la vía empírica que la teoría geocéntrica fue refutada*.

Es cierto que el invento del telescopio proveyó elementos para esa refutación cuando se determinó por primera vez el paralaje de la estrella más cercana, confirmando así *empíricamente* el desplazamiento de la Tierra, pero eso ocurrió a comienzos del siglo XIX, más de un siglo después que la teoría geocéntrica había sido definitivamente abandonada.

Si no fue por la vía de la observación y la experimentación, ¿en qué consistió el cambio que se produce en los

³ La Edad Media, que inicia con la caída del Imperio Romano, suele dividirse en periodos variables. Para nuestro propósito, hay hechos significativos que nos dan puntos de referencia para marcar periodos en el desarrollo de la ciencia y la filosofía.

El primero de esos hechos fue la clausura de la Academia Platónica por el Emperador Justiniano en el año 529. Ya San Agustín había declarado que "no se puede ser cristiano y filósofo a un mismo tiempo", porque es vana la pretensión de los filósofos de alcanzar verdad alguna con especulaciones de la mente: "a la verdad sólo se llega por la revelación, a través de la fe".

El periodo que cubren los seis siglos subsiguientes suele llamarse "La Edad de la Fe". En ese intervalo, en la Europa occidental no habrá más filosofía que aquella que se subordinaba a los dictados de la teología. El centro de la actividad intelectual se desplazó a Oriente: primero a Jundishapur (Persia) y luego a Bagdad, fundada en el año 762, que se convertirá en "la gran metrópolis de la ciencia" hasta su destrucción por los mongoles en 1258.

La reintroducción de la filosofía y de la actividad científica en Europa occidental es iniciada por los árabes en España en un proceso que culmina en los siglos XII y XIII. Aristóteles, en traducción al latín, vuelve a ser el centro de las discusiones filosóficas. Este proceso tiene lugar en un periodo de grandes transformaciones sociales, económicas y políticas. La proliferación de las ciudades y el desarrollo de la vida urbana, así como la expansión del comercio y, en gran medida, la creación de las universidades,

proveen un nuevo contexto para la actividad intelectual, la cual adquirió su máximo nivel en el Merton College de Oxford y en la Universidad de París. La Iglesia deberá entonces admitir que hay "verdades de este mundo" a las cuales tiene acceso la mente humana a través de la observación y la experimentación. La clara visión de Tomás de Aquino (quien luego será Santo Tomás) impulsa la doctrina de la doble verdad que abrió nuevamente la posibilidad de discusiones científicas y filosóficas sin los dictados de la teología. La filosofía empirista (y, más aun, nominalista) de Guillermo de Ocam, que domina el siglo XIV, se hizo posible a partir de la aceptación de esa doctrina.

⁴ Ptolomeo vivió en el siglo II y fue uno de los grandes científicos de todas las épocas. Su obra magna, *Composición matemática* (o *Sintaxis matemática*) es más conocida por el nombre que le dieron sus traductores árabes: *Almagesto*. Está dividida en trece libros, de muy difícil lectura, que incorporan y amplían la información astronómica acumulada por los griegos e incluye un catálogo de más de mil estrellas. Durante catorce siglos fue el más importante tratado de referencia en astronomía.

El sistema geocéntrico de Ptolomeo eclipsó por completo las antiguas cosmologías y sólo fue sustituido en el siglo XVI por el sistema heliocéntrico de Copérnico.

Ptolomeo estudió minuciosamente las esferas homocéntricas de Eudoxio y de Aristóteles con las cuales se intentaba responder al

siglos XVI y XVII? Aquí entró en juego un nuevo factor que llevó a la reorganización del conocimiento: *un cambio en la concepción del mundo* que obligó a redimensionar el Universo, relativizar el movimiento e introducir en *la teoría del movimiento* nuevos conceptos que permitieran explicar su *dinámica*. Pero eso requirió siglos. Veamos cuál fue el proceso.

Recién en el siglo XVI se abre paso el sistema heliocéntrico, con Copérnico. Pero curiosamente no es Copérnico quien logra fundamentar su sistema. Es Giordano Bruno, el más importante filósofo del Renacimiento, quien se encargó de ello.

Antes de que la Santa Inquisición lo pusiera en la hoguera, con la piadosa intención de purificar con el fuego su alma herética, Bruno dejó claras muestras de su capacidad teórica al dar cuenta de las dos poderosas objeciones, arriba mencionadas, contra las ideas de desplazamiento y de rotación de la Tierra.

En primer lugar, razona con admirable lucidez acerca de los astros y sus trayectorias, y cobra clara conciencia de la relatividad del movimiento. El movimiento no es concebido por Bruno si no es con relación a algún punto que se

problema de Platón y analizó en particular las anomalías, es decir, aquellas trayectorias de los astros con respecto a las cuales las esferas no lograban “salvar las apariencias”. La solución que propuso consistió en su célebre sistema de epiciclos con los cuales podía compensar las diferencias.

Un *epiciclo* es un círculo que tiene su centro en la circunferencia de un círculo mayor. Los planetas, en la concepción de Ptolomeo, recorrerían la circunferencia de un epiciclo con cierta periodicidad, mientras el centro imaginario del epiciclo recorrería la circunferencia de un gran círculo cuyo centro era la Tierra.

Los cálculos de Ptolomeo y las figuras que lo acompañan son de una gran complejidad. A partir del siglo XIII, el *Almagesto* se difundió en Europa occidental y fue adoptado como texto en varias universidades. Sin embargo, las dificultades del texto parecían excesivas para los alumnos. Surgieron varios manuales con las explicaciones muy simplificadas. El más famoso, de autor anónimo, se titulaba *La teoría de los planetas* y sirvió de texto durante tres siglos.

considere fijo. Por eso puede afirmar que el mismo movimiento debe aparecer como diferente cuando se lo considera con respecto a la Tierra, o con respecto al Sol, o con respecto a otro planeta. “El lugar donde yo me coloque para observar —afirma— parecerá siempre para mí un punto inmóvil”. Y una vez más se adelanta a su tiempo cuando insiste en que no puede haber certeza alguna de que algo esté en reposo o en movimiento, considerado en forma absoluta.

Bruno hizo, además, dos contribuciones importantes. Por una parte, *agrandó el Universo*. En su texto *Sobre el infinito universo y los mundos*, si bien hace el gran elogio de Copérnico, demuestra que no tiene sentido poner fronteras absolutas al Universo, ni mantener que hay “esferas fijas”. Al hacer “retroceder” a las estrellas en la inmensidad del espacio, desaparecía la objeción sostenida desde los griegos con respecto al movimiento de traslación de la Tierra, por cuanto a tales enormes distancias el paralaje de las estrellas tenía que ser imperceptible. Y fue efectivamente así: la primera determinación del paralaje de una estrella, mencionada más arriba, fue hecha en 1838 y dio por resultado ¡un segundo de arco!

Por otra parte, Bruno da una respuesta contra la objeción a la rotación, con la cual se anticipa a Galileo y a Newton en la concepción, todavía rudimentaria, de la inercia de la materia. En efecto, rechaza la idea de que objetos que caen a la Tierra, si ésta rotara, deberían apartarse de la vertical del lugar, aduciendo que una piedra arrojada desde lo alto de un mástil caerá al pie de ese mástil, porque la piedra tendrá una fuerza *impresa* (*virtus impressa*) que le hace participar del movimiento de la Tierra.⁵

⁵ Es altamente probable que Galileo haya conocido las obras de Giordano Bruno, pero nunca hizo referencia a ellas. No hay que olvidar que Bruno fue condenado a muerte por la Iglesia y que era peligroso citarlo, sobre todo por parte de Galileo, quien ya tenía bastantes problemas con la Inquisición.

Quiero insistir, a riesgo de ser repetitivo, que al despejar las objeciones hechas durante siglos en contra del movimiento de la Tierra, Bruno logra afianzar sólidamente la teoría copernicana. Pero no obtuvo ese logro porque contara con nuevos datos empíricos o experimentales, o nuevos instrumentos de observación, sino a partir de nuevas concepciones (teorías) que permitieron *reinterpretar los viejos datos empíricos*, los cuales pasaron así, automáticamente, a *validar* las nuevas teorías.

Aclaremos esta última observación. La ausencia de paralaje en las estrellas había sido tomada como *prueba de que la Tierra no se desplazaba*. En la nueva concepción, el hecho de que el paralaje *no fuera perceptible* era considerada *prueba* de la inmensidad del Universo.

Saltemos ahora a la segunda mitad del siglo XVII. Con Newton, la construcción de la teoría física adquiere una nueva dimensión y ahí culmina la Revolución Científica.

El material empírico sobre el cual trabaja Newton no son los datos observacionales. Ese material había pasado por etapas previas. La teoría heliocéntrica de Copérnico estaba suficientemente asentada, aunque no tuviera aceptación general y faltara mucho para considerarla como una teoría bien fundada. En particular, Copérnico mantenía como absolutamente indiscutible el *axioma* de las órbitas circulares de los astros (también Galileo lo aceptaba sin cuestionarlo).

La siguiente etapa es de trabajo empírico, que en cosmología es observacional. Tycho Brahe, astrónomo danés establecido en Praga, acumula un impresionante número de observaciones muy precisas, especialmente sobre uno de los planetas: Marte. Brahe no tiene capacidad teórica, pero el mismo año que ejecutaron a Bruno (1600) invita a Kepler a trabajar en su observatorio. Muere un año después y deja a Kepler con todo ese rico material. Viene aquí otra etapa del proceso. Kepler se dedica a la tarea de *organizar* esas observaciones y verifica que las observaciones sobre Marte no se podían ajustar a

una órbita circular. Le lleva años mostrar que esas observaciones sí se acomodaban bien sobre una elipse, y ésta es una de las rupturas epistemológicas más espectaculares de la historia, porque derrumbó la utilización, en las ciencias de la naturaleza, de preconceptos basados en dogmas como el de la perfección de la obra divina, que implicaba la *necesidad* de los movimientos circulares de los astros.

Esta etapa termina en la formulación de lo que hoy llamamos *las tres leyes de Kepler*⁶ sobre las órbitas planetarias. Newton comienza su trabajo a partir de allí. Nótese bien que su *material empírico* no son ahora observaciones, sino una curva (una elipse) que representa la trayectoria de un planeta.

La historia detallada de cómo llegó Newton a demostrar las leyes de Kepler es muy extensa para ser referida aquí, pero en líneas generales puede resumirse de la siguiente manera. Si bien el dato empírico, ya muy elaborado, es la elipse a la cual se refiere la primera ley de Kepler, el punto de partida de Newton para el análisis es su *teoría del movimiento* que ya había formulado, y en particular, el *principio de inercia*, de lo cual nos ocuparemos en la sección siguiente. En forma muy simplificada, su razonamiento es el siguiente.

Supongamos el planeta en un punto cualquiera de su trayectoria que llamaremos *P*, a cierta distancia del Sol, que llamaremos *r*. Si ninguna fuerza actuara en *P*, el planeta seguiría una trayectoria rectilínea (ley de inercia). Para

⁶ La palabra "ley" no fue usada por Kepler, como tampoco por Copérnico o Galileo. Desde la remota antigüedad hasta el siglo XVII, el término "ley" se utilizaba solamente con sentido normativo referido a la moral o al orden jurídico. La *ley natural* referida a regularidades en los fenómenos naturales aparece por primera vez en la época de Newton y se empieza a usar regularmente en los trabajos científicos publicados por la Royal Society (Sociedad Real de Londres). Lo que hoy llamamos *la tercera ley de Kepler* fue llamada por él "teorema".

que su trayectoria se curve, con una concavidad hacia el Sol, debe existir una fuerza que lo desvíe de la línea recta. Puede suponerse que es una fuerza que ejerce el Sol sobre los planetas y, en tal caso, la inferencia más simple es hacerla depender de las masas del Sol y de cada planeta. También la más simple hipótesis es considerar que esa fuerza se ejerce igualmente en todas direcciones, y que a distancias $r_1, r_2, r_3, \dots$ se distribuye en superficies esféricas con áreas $4\pi r_1^2, 4\pi r_2^2, 4\pi r_3^2$, con lo cual en cada punto de esas superficies su magnitud *decrecerá* en forma inversamente proporcional al aumento de r^2 . De estas consideraciones, Newton *infirió* la famosa ley de gravitación, según la cual la fuerza que actúa entre el Sol y un planeta es proporcional al producto de las masas de ambos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Sin embargo, esa ley por sí misma *no explica la órbita elíptica* de los planetas. Nuevamente, Newton deberá basarse en su *teoría del movimiento*, específicamente en lo que hoy llamamos “la segunda ley de Newton”, *en conjunción con la ley de gravitación*, para demostrar, *matemáticamente*, que la trayectoria del planeta es efectivamente una elipse.

El proceso que va de las precisas observaciones de Tycho Brahe a las leyes de Kepler, y de allí a la explicación de las órbitas planetarias por Newton constituye —utilizando un término que está de moda— el *paradigma* erigido por la Revolución Científica del siglo XVII de cómo tendría que ser, en adelante, una explicación científica. Esto está, obviamente, muy lejos del inductivismo de Francis Bacon y sus seguidores.

EL VACÍO

El problema más escabroso que debió enfrentar toda cosmología ha sido responder a la pregunta: ¿qué es lo que hay *entre* los astros? No fue sólo un problema de “los

antiguos”. Es un problema que reapareció periódicamente y que está presente aún en nuestros días.

Las respuestas que se han dado a lo largo de la historia han sido dictadas *en todos los casos* por las teorías que imperaban en esos momentos, las que alternativamente requerían la hipótesis del vacío, o bien postulaban la existencia de un medio *invisible* y con propiedades que establecía la misma teoría.

Esto se ve claramente en Aristóteles. La teoría del movimiento de Aristóteles se basa en el principio según el cual todo cuerpo en movimiento está sometido a dos fuerzas: la *potencia* o *motor* y la *resistencia*. Si no hubiera una potencia que se ejerce sobre él, el cuerpo no se movería; si su movimiento no encontrara resistencia el movimiento sería instantáneo. La velocidad con la cual debería moverse dependería, entonces, de la relación entre la potencia y la resistencia, y la única relación que maneja Aristóteles es la proporcionalidad. Pasemos por alto la contradicción en que cae la teoría cuando al aumentar la resistencia, se hace igual a la potencia y el cuerpo se detiene, puesto que allí dejaría de haber proporcionalidad.

Lo que importa para nuestro tema es la consecuencia que Aristóteles se ve obligado a aceptar a partir de esa teoría del movimiento. En sus propias palabras: “nada se podría mover si existiera el vacío”. En efecto, dice Aristóteles, “el vacío, en tanto es vacío, no presenta ninguna diferencia”, y no habría razón para que un cuerpo se moviera en una dirección y no en otra.

Las discusiones sobre la existencia o inexistencia del vacío ocupan un lugar importante en la filosofía griega. Los estoicos aceptan la posibilidad del vacío y en particular Filopon refuta los argumentos de Aristóteles sobre la base de que un cuerpo pesado que cae (una piedra), o un cuerpo liviano que sube (el aire o el fuego), lo hacen en virtud de una propiedad que es inherente a ellos y no por acción de algún agente externo. Por consiguiente, caerán, o subirán también si hay vacío.

En todas estas discusiones entran, de manera difusa, las ideas sobre el espacio cuya concepción se va diseñando lentamente y de manera muy compleja.

Si saltamos de la antigua Grecia al siglo XVII, al momento del apogeo mismo de la Revolución Científica, la discusión se repite en términos similares. Sus protagonistas son ahora Descartes y Newton. El primero niega el vacío, el segundo lo afirma. En ambos casos, la aceptación o el rechazo del vacío se debe a exigencias de la teoría del movimiento que cada uno de ellos mantiene.

La concepción de Descartes requiere la aplicación directa, por contacto, de una fuerza que produzca o modifique el movimiento. Por eso el universo que describe Descartes está lleno de una materia sutil, pero en perpetuo movimiento en la forma de torbellinos que ejercen presión, se complementan o se neutralizan. Esta célebre teoría turbillonaria desarrollada con gran ingeniosidad, daba explicaciones de todos los fenómenos relativos a los movimientos de los planetas y cometas, a las mareas y aun a la forma de la Tierra. De hecho, Descartes es considerado el iniciador de la filosofía moderna, porque crea el primer sistema filosófico completo que sustituirá al sistema aristotélico.

La teoría de Newton, que hemos referido en la sección precedente, estaba basada en una fuerza de atracción que ejercerían los cuerpos entre sí, en proporción de sus masas, sin intermediario alguno entre ellos. De ahí surge la postulación del vacío interplanetario, pero queda el preocupante problema de las acciones a distancia.

LA FUERZA Y EL MOVIMIENTO

En las secciones precedentes hemos procurado poner de manifiesto que los cambios de concepción acerca del *sistema del mundo* y de la existencia o no existencia del vacío,

fueron debidos a cambios en las teorías sustentadas acerca del movimiento y de las fuerzas que lo generan.

En los veinte siglos que van desde Aristóteles hasta Descartes, el movimiento era concebido, según hemos visto, como producido por la acción de una fuerza (que Aristóteles llama potencia), lo cual requería el contacto directo entre el agente que genera la fuerza y el cuerpo que se mueve por su acción. El cambio de concepción que se produce con la Revolución Científica del siglo XVII está centrado en este punto. En un proceso al cual contribuyen Galileo y Descartes, pero que culmina con Newton, tiene lugar una completa reconceptualización de las nociones de fuerza y de movimiento.

En la teoría aristotélica, la fuerza *produce* el movimiento y *determina su velocidad*. En la nueva concepción, la fuerza *modifica* el movimiento y *determina la aceleración* (aumento o disminución de la velocidad o cambio de dirección). En esto consistió la idea revolucionaria de *la ley de inercia* según la cual el movimiento rectilíneo con velocidad constante es un *estado equivalente al reposo*, que no requiere la acción de ninguna fuerza para continuar indefinidamente. Nótese bien el grado de abstracción necesario para llegar a esta *ley*, en aparente contradicción con la experiencia cotidiana que había sido la base sobre la cual apoyó Aristóteles su teoría. Ningún tipo de generalización inductiva pudo conducir a dicha ley, que Newton llamó también *axioma*, con una clara referencia a la geometría de Euclides en quien se había inspirado para construir su mecánica.

Aquí debemos detenernos un poco para reflexionar sobre lo que acabamos de decir: “contradicción con la experiencia cotidiana”. La ley de inercia y la ley de gravitación (con su acción a distancia) constituyen el gran salto conceptual, verdaderamente revolucionario que se da en el siglo XVII. Y no fue fácil asimilar ese proceso ni aun por los grandes pensadores de la época. La teoría del movimiento de

Aristóteles, así como la teoría de los torbellinos de Descartes eran *intuitivas*, es decir, uno podía imaginar, podía representarse las acciones directas entre los cuerpos o entre los torbellinos. Por eso los dos científicos que junto con Newton son quizás los más importantes de la época —Huygens y Leibniz— se siguen aferrando al sistema de Descartes aun después de la publicación del *Principia* de Newton, no obstante la fuerte impresión que causó dicho libro. No podían aceptar esa “fuerza de gravedad” ejercida a distancia. Los franceses, entre ellos los miembros de la Academia de Ciencias, se adhirieron a la teoría de Descartes, a pesar de sus complicaciones y dificultades, porque esa atracción gravitatoria ejercida a distancia parecía absolutamente inexplicable y fantástica... y en realidad lo era. Pero las objeciones que hizo Newton contra la teoría cartesiana, mostrando de manera convincente que sus explicaciones eran erróneas, mientras que las predicciones realizadas con su teoría de la gravitación universal y sus leyes del movimiento se corroboraban en los más diversos dominios, terminó por convencer a los más recalcitrantes cartesianos. Sin embargo, el proceso fue largo. El *Principia* de Newton tardó treinta años en ser traducido al francés, y la traducción fue impulsada por un filósofo —Voltaire— quien en su viaje a Londres se había convertido, según su propia expresión, en “el más firme newtoniano del mundo”, pero que en sus famosas *Cartas de Inglaterra* ironizó la situación con su ácido humor:

Un francés que llega a Londres encuentra las cosas bien cambiadas en filosofía y en todo lo demás. Él ha dejado un mundo pleno, y lo encuentra aquí vacío. En París, uno ve el Universo compuesto de torbellinos de materia sutil; en Londres, no se ve nada semejante. Entre nosotros (los franceses) es la presión de la Luna la causa del flujo del mar; entre los ingleses es el mar que gravita hacia la Luna... Entre ustedes los cartesianos todo sucede por la impul-

sión, que nadie comprende; en lo de Mister Newton todo sucede por la atracción, que tampoco se entiende. En París ustedes se figuran la Tierra como un melón, en Londres está aplastada de los dos lados.

Ironías aparte, la teoría de Newton triunfó plenamente y se aceptó (sin explicación) que la atracción de la gravedad es una fuerza que se ejerce a distancia sin ninguna intermediación.

Newton tenía muy claro, y así lo dijo en su correspondencia con otros científicos de su época, que él no podía explicar *la causa* de esa fuerza. Él sólo podía afirmar que el movimiento tenía lugar “como si hubiera una fuerza” que actuaba sobre la materia. Fue necesario llegar hasta nuestro siglo para que Einstein, con su teoría de la relatividad, pudiera dar una explicación que significaba la eliminación de acciones a distancia y de la supuesta “fuerza de gravedad”.

Mientras tanto se aceptó la existencia del vacío, al que pronto sería necesario volver a “poblar” aunque por razones diferentes.

En el siglo XVIII el centro de la ciencia pasa a Francia, y son los franceses —Clairaut, D’Alembert, Laplace— quienes, conjuntamente con Euler (suizo) y Lagrange (italo-francés) dan la forma final y extienden considerablemente la mecánica newtoniana. Es importante señalar que la adopción de la teoría física y matemática se realiza en Francia dentro de un contexto social, económico y político completamente diferente del inglés.

No podemos entrar al análisis, ni aun somero, de ese rico periodo de la historia de Francia y de Europa. Señalemos solamente que en Francia —a diferencia de Inglaterra y de cualquier otro país— la ciencia se difunde en diversos niveles de la sociedad y se la asocia con problemas generales de la sociedad. En ningún otro país se da un grupo como Voltaire, Buffon, D’Alembert y Condorcet, entre

otros, que son científicos y filósofos, excelentes escritores y ponen las ideas de Newton o Leibniz al alcance de un amplio público. La famosa Enciclopedia de Diderot y D'Alembert jugó un importante papel en ese proceso. Sin embargo, no todo fue estimulante y positivo para la ciencia. La interpretación mecanicista de los fenómenos naturales condujo también a extrapolaciones extravagantes (cuyos ejemplos más extremos fueron *El hombre máquina* de La Mettrie y *El sistema de la naturaleza* del Barón d'Holbach) que pretenden reducir toda la biología, y aun la moral, a interacciones newtonianas entre partículas.

En líneas generales, la concepción newtoniana del mundo que domina en el periodo final del siglo XVII y gran parte del siglo XVIII está referida a un universo regido por leyes inmutables, establecidas por Dios, *que el hombre podía descubrir y analizar*, poniendo en evidencia el orden y la armonía de la naturaleza. Lejos de condenarlo, la iglesia anglicana proclamó los hallazgos de Newton desde los púlpitos, y los protestantes ingleses extrapolaron sus conclusiones más allá de los fenómenos físicos: ese orden natural debía reflejarse también en la sociedad. Los newtonianos, particularmente Boyle (quien dio el nombre a la ley de compresibilidad de los gases) y los miembros de la *Sociedad Boyle* que se creó después de su muerte (entre los cuales figuraban numerosos clérigos de la iglesia anglicana) contribuyeron directa e indirectamente a la teoría de *laissez-faire* que caracterizó la política socio-económica inglesa de la época.

LA ENERGÍA

El siglo XIX es un periodo de cambios profundos en la concepción del mundo, generados por transformaciones sociales, económicas y políticas, en fuerte interacción con espectaculares avances en la ciencia y en la tecnología. Estos cambios se producen bajo la fuerte influencia de dos

revoluciones que marcaron el final del siglo XVIII: la Revolución Francesa y la Revolución Industrial en Inglaterra.

Hay una reacción contra el racionalismo, contra Newton, contra la explicación mecánica y matemática de los fenómenos naturales. Goethe es la figura dominante en esa reacción que tomó mucha fuerza, particularmente en Alemania, y generó el movimiento romántico que se extendió por toda Europa con influencia preponderante en literatura. En el dominio de la filosofía y de la ciencia, se centró fundamentalmente en Alemania en una escuela de pensamiento que se llamó *Naturphilosophie* (Filosofía de la naturaleza) cuyo líder fue Schelling.

Para la *Naturphilosophie*, la realidad, es decir, lo que genera y está "detrás" de nuestras percepciones, no es *materia* sino *fuerza*. Por ejemplo, cuando presionamos con nuestra mano la mesa no estamos tocando elementos materiales sólidos sino que sentimos una fuerza que se opone a nuestra presión. Los científicos que participaban en esta concepción consideraban que todos los fenómenos naturales eran sólo manifestaciones diversas de una fuerza universal, indestructible, que se presenta como calor, electricidad, magnetismo, luz, afinidad química.

Una serie de experiencias y descubrimientos realizados con esa concepción parecía que ofrecían una sólida corroboración a dicha teoría. Oersted descubre que una corriente eléctrica que pasa por un cable hace desviar un imán colocado en su cercanía. Herschel muestra el calentamiento que provoca la región infrarroja del espectro de la luz solar. Ritter descubre la radiación ultravioleta en el otro extremo del espectro, mostrando su capacidad para inducir reacciones químicas. Por otra parte, la teoría de la fuerza universal que se manifiesta de tan diversas maneras parecía explicar tanto las experiencias de Galvani mostrando la relación de la electricidad con el movimiento muscular, como también la producción de electricidad, con la pila de Volta, a partir de reacciones químicas. Todo hacía

pensar que difícilmente se podría encontrar un ejemplo más claro de *verificación* empírica de una teoría. Pero ¿cuál era la explicación de esos fenómenos? ¿Qué era esa fuerza única, misteriosa? ¿En qué consistía la *manifestación* de esa fuerza en calor, en electricidad, en afinidad química?

La clarificación de esas preguntas se fue realizando a lo largo del siglo XIX y significó la introducción de nuevos marcos conceptuales. En este sentido la innovación más importante fue la introducción del concepto de *energía*, como un nuevo invariante que se agregaba a los principios de conservación de masa y de cantidad de movimiento y permitía explicar las transformaciones que el romanticismo atribuía a una *fuerza universal*. Fue necesario entonces delimitar y redefinir el elusivo concepto de fuerza, así como analizar por separado procesos que correspondían a diferentes dominios de fenómenos. De allí surgieron nuevas teorías y nuevas disciplinas. La física se expande con el desarrollo de la termodinámica y la teoría electromagnética. La química pasa a primer plano y el laboratorio de Liebig en la pequeña ciudad de Giessen se convierte en modelo (llamado *modelo de Giessen*) de laboratorio científico y será imitado por las otras universidades alemanas.

En todo este mundo de nuevas disciplinas, la interacción entre la teoría y el trabajo experimental se torna cada vez más compleja. La historia de este periodo es de una gran riqueza en episodios que constituyen una fuente valiosa para analizar cómo se va construyendo la ciencia y para fundamentar una teoría del conocimiento. No podemos extendernos aquí en esta temática. Sólo voy a hacer referencia a dos disciplinas que, en el campo de la investigación empírica de la naturaleza, obligaron a *redimensionar el mundo*: la geología y la biología.

Esta vez no fue el redimensionamiento espacial al cual había obligado la cosmología. Ahora se trataba de la *escala temporal*.

Los especialistas en la Biblia estaban de acuerdo en que “la creación” había tenido lugar unos seis mil años antes. Geólogos y biólogos sólo pudieron explicar la distribución de las capas geológicas, así como de las especies animales y vegetales dentro de ellas, haciendo retroceder su origen... millones de años. La misma palabra “origen” perdía sentido: no había trazas de un momento de creación.

La eclosión de las disciplinas científicas en el siglo XIX tiene un denominador común que es *el concepto de transformación*, lo cual exigió una reorganización profunda de las ideas básicas. Fue un biólogo y extraordinario historiador de la ciencia, Joseph Needham, quien sintetizó en una frase el cambio fundamental que tuvo lugar en la ciencia: se trató de “la transición de los conceptos de forma y materia, a los conceptos de organización y energía”.

¿QUÉ ES EL “MUNDO FÍSICO”?

La concepción ingenua de la ciencia lleva a pensar que el mundo físico es, en primera instancia, el conjunto de fenómenos que están allí, frente a nosotros, por así decir “al alcance de la mano”; sólo habría que “asomarse” para detectar el mundo físico.

Un segundo paso en la reflexión pone de manifiesto que lo que obtenemos son imágenes visuales (formas, colores) y sensaciones sonoras o táctiles, a las cuales el más importante filósofo norteamericano contemporáneo, Willard Quine, llamó (¡sin ironía!) “irritaciones de nuestras terminaciones nerviosas”, con las cuales construimos nuestras percepciones. De esta reflexión surge que todas las evidencias empíricas que obtenemos en nuestras interacciones con el mundo externo consisten, en último análisis, en percepciones. Esto implicaría que lo que la ciencia afirma como descripciones y explicaciones sobre los objetos y los fenómenos del mundo físico son inferencias realizadas a

partir de las informaciones obtenidas sobre la base de nuestras percepciones.

Esta formulación plantea de inmediato dos serios problemas:

a) La descripción (y la explicación) que nos ofrece la ciencia y, en particular, la física, acerca de los objetos del mundo físico, difiere fundamentalmente de la descripción que puede hacer “el sentido común”. El físico y astrónomo inglés Sir Arthur Eddington (el primero que dio pruebas empíricas de la Teoría de la Relatividad) expuso esa diferencia en un libro que fue famoso en la década de los años cuarenta: *La naturaleza del mundo físico*. “La mesa donde trabajo —decía Eddington— es para mí un objeto sólido, duro, impenetrable. Sin embargo —continúa— debo admitir, como físico, que la mesa está construida con materiales en cuya composición última entran moléculas en continuo movimiento, las cuales están constituidas por átomos formados por un núcleo y electrones que giran a su alrededor. Si imaginamos —concluye— que pudiéramos suprimir los espacios intraatómicos e interatómicos, así como los espacios intermoleculares, la totalidad de lo que podemos llamar *materia* cabría en la punta de un alfiler.” Dicho de otra manera: la mesa del físico es... ¡casi todo espacio! ¿Cómo podemos reconciliar las dos mesas de Eddington?

b) El segundo problema, estrechamente conectado con el anterior, se refiere a las teorías físicas que llevaron a la concepción de “la mesa del físico”. ¿Cuál es el camino que conduce de las sensaciones (de forma, color, sonido, tacto) a la Teoría de la Relatividad y a la física nuclear?

Sobre este problema, la filosofía, puesta en jaque por la ciencia del siglo XX, ha tenido que dar dramáticas respuestas. Quien ha hecho el más claro diagnóstico de la situación ha sido W.V. Quine, filósofo y uno de los grandes lógicos del siglo. Después de señalar que fue Bertrand Russell quien formuló el programa de “dar cuenta del mundo externo

como una construcción a partir de los datos de los sentidos”, y que Rudolf Carnap fue “quien llegó más cerca de la ejecución” de dicho programa, agrega esta rotunda sentencia: “Fue necesario aceptar que había que perder la esperanza de fundar la ciencia natural en la experiencia inmediata”. Y luego concluye con una melancólica reflexión: “Fue triste para los epistemólogos tener que aceptar la imposibilidad de derivar la ciencia del mundo externo a partir de la evidencia sensorial”.

A partir de aquí, los dos problemas que hemos planteado quedan en el campo de la epistemología. Los problemas de fundamentación y validación del conocimiento han sido considerados tradicionalmente como parte de la filosofía especulativa. En los comienzos del siglo XX, la llamada “crisis de los fundamentos” obligó a replantear los problemas del conocimiento científico. El gran desarrollo que tuvieron la lógica y la matemática, aunado a las nuevas teorías revolucionarias de la física (la relatividad en primer término, seguida luego por la física cuántica) invalidaron veinticinco siglos de especulación filosófica sobre el conocimiento científico. A partir de allí se empezó a utilizar sistemáticamente el término epistemología, con referencia a la teoría del conocimiento planteada desde la ciencia. La exploración de estos nuevos desarrollos exceden en mucho los límites de este capítulo.

LECTURAS RECOMENDADAS

Una historia de la ciencia breve y elemental que toma en cuenta su contexto histórico y filosófico (aunque desde una perspectiva epistemológica que tiene diferencias con la nuestra) se encuentra en: L.W.H. Hull. 1981. *Historia y filosofía de la ciencia*. Barcelona: Ariel.

El pequeño, pero bien documentado librito de Jacques Le Goff. 1994. *Los intelectuales en la Edad Media*. Barcelona: Gedisa. Tiene una idea clara del gran cambio de actitud hacia la ciencia y en filosofía que comienza a producirse hacia fines de la Edad Media.

El más completo análisis de las grandes revoluciones que ocurrieron en la ciencia en los últimos cuatro siglos, así como del concepto mismo de "revolución científica", se encuentra en la importante obra de I. Bernard Cohen. 1995. *Revolución en ciencia*. Barcelona: Gedisa.

La problemática epistemológica esbozada en la sección final (¿Qué es el mundo físico?) se trata abreviadamente en Rolando García (coord.). 1997. "Análisis constructivista de los conceptos básicos de la ciencia", capítulo 2 de *La epistemología genética y la ciencia contemporánea*. Barcelona: Gedisa. Para un análisis más detallado véase: J. Piaget y R. García. 1982. *Psicogénesis e historia de la ciencia*. México: Siglo XXI.

Conocimiento del mundo físico: las teorías como guía de la observación, de Rolando García Boutique, terminó de formarse e imprimirse en la ciudad de México, durante el mes de diciembre de 1998, en los talleres de Signum Editores, S.A. de C.V., Calzada del Hueso 140, Col. Exhacienda de Coapa. Se tiraron mil ejemplares sobre papel bond de 90 grs. y en su composición se utilizaron tipos Optima de 12, 10, 9 y 8 puntos. La corrección de estilo estuvo a cargo de Rogelio López Torres; la lectura de pruebas de Juana Xóchitl Escamilla Barranco.