

## LOS EXPERIMENTOS IMAGINARIOS DE OCCAM A GALILEO

*Jesús Sánchez Navarro*  
Universidad de La Laguna

La experimentación se considera una característica fundamental de la ciencia moderna, al menos en el campo de las ‘ciencias duras’. Incluso cuando nos referimos al método científico solemos llamarlo indistintamente ‘método experimental’. Suponemos en todos los casos que la experimentación, es decir, la simulación controlada de los fenómenos de la naturaleza y su manipulación en las condiciones ideales de laboratorio, es la forma más adecuada y propiamente científica de recoger información fáctica y comprobar la validez del conocimiento científico. Otros principios básicos de la ciencia, como los de parsimonia, economía, repetibilidad o naturalización, sólo son corolarios de ese supuesto fundamental. En este sentido, la experimentación no es más que la máxima expresión del empirismo, del principio según el cual todo nuestro conocimiento del mundo que nos rodea proviene de la experiencia y la única manera de decidir objetiva e intersubjetivamente la validez, la verdad o la falsedad, de ese conocimiento es la comparación con la experiencia. Si la observación de los fenómenos de la naturaleza es tan importante para el conocimiento, parece lógico que la posibilidad de reproducirlos en condiciones ideales y controladas, repetirlos a voluntad, manipularlos y modificarlos intencionadamente redunde inexorablemente en el aumento y perfeccionamiento del conocimiento. Por eso no es extraño que la capacidad experimental se utilice frecuentemente como una forma de distinguir las ciencias ‘duras’ de las ‘blandas’ o como un indicador de progreso científico. En este sentido, un experimento cumple una serie de funciones fundamentales en la ciencia:



- Recoger y, si se quiere, descubrir nueva información fáctica.
- Comprobar empíricamente las predicciones derivadas de las teorías y a través de ellas la validez de las teorías mismas.
- Controlar las variables intervinientes en los fenómenos y su influencia
- Cuantificar y medir con precisión (y, como consecuencia, establecer correlaciones matemáticas).
- Detectar nuevas entidades o producir fenómenos nuevos, etc.

En todos los casos es una condición fundamental que el experimento sea real, es decir, que se haya llevado a cabo. Dada su estrecha conexión con el empirismo, el experimento mismo debe ser un hecho.

Sin embargo, a lo largo de la historia de la ciencia se puede encontrar un amplio grupo de 'experimentos' que no satisfacen esta condición y que no cumplen esas funciones, pero que gozan de gran reconocimiento. A este grupo pertenecen el experimento de los gemelos; el de Einstein-Podolski-Rosen; los del rayo de luz y el ascensor de Einstein; el gato de Schrödinger; el diablillo de Maxwell; la bala de cañón de Hooke y Newton; el cubo de Newton; el de las bolas que chocan y el de la *vis viva* de Leibniz; la cadena sin fin de Stevin, etc, y varios de Galileo, como el de la caída libre o el del movimiento continuo rectilíneo. A pesar de su amplia variedad, todos ellos tienen en común que no se han llevado a cabo y, en este sentido, que no son empíricos, sino conceptuales. De la misma manera, no recogen hechos, sino pensamientos y en la mayoría de los casos ni siquiera son posibles, sino meramente concebibles. Por eso se les llama experimentos mentales o experimentos imaginarios a partir del nombre 'gedankenexperimente' que les dio E. Mach a finales del siglo XIX en sus libros *La Ciencia de la Mecánica y Conocimiento y Error*.

En un sentido general, son instrumentos de la imaginación utilizados para investigar la naturaleza siguiendo un mismo esquema: se visualiza una situación, se lleva a cabo mentalmente una operación y se ve lo que ocurriría. Lo sorprendente es que parecen enseñar algo nuevo sobre la naturaleza sin nuevos datos empíricos, sólo a partir de datos ya conocidos. En cierto modo, es como si mostraran la existencia de un paralelismo entre el pensamiento y la realidad: lo que se presenta al pensamiento como inevitable, es inevitable en la realidad. De ahí que se les relacione frecuentemente con el platonismo y el racionalismo, o que se les considere depósitos de conocimiento a priori. Por razones parecidas se pensó, al menos hasta la crisis de la geometría euclídea, que eran el tipo de experimento propio y característico de las matemáticas, dada su naturaleza intermedia entre la experimentación y la demostración. Igualmente, incluyen un elevado componente filosófico tanto acerca de los ideales de la naturaleza, como acerca de la razón humana, lo que hace que su uso haya sido también frecuente en filosofía (aunque en este caso suelen reflejar intuiciones internas y creencias más o menos asumidas sobre la realidad, por lo que se les considera experimentos mentales puros para distinguirlos de los experimentos imaginarios de la ciencia). En cual-



quier caso, su influencia e importancia para la ciencia es muy grande y Mach llega a considerarlos necesarios y previos a los experimentos físicos (una condición previa para el diseño de experimentos). Otros, como Kuhn, los consideran fundamentales en los procesos de cambio científico, porque permiten enfocar los problemas desde nuevos puntos de vista generando anomalías a la teoría dominante y ayudan a reconceptualizar el mundo de una manera diferente partiendo de datos ya conocidos y familiares. No obstante, las posiciones dominantes respecto a la naturaleza de los experimentos imaginarios se reparten entre cuatro grandes puntos de vista:

- a. No son experimentos estrictos, sino argumentos disfrazados que parten de premisas basadas en la experiencia y siguen reglas de inferencia inductiva o deductiva para llegar a la conclusión. En este sentido, no difieren más que en la forma de otros tipos de argumentación y nunca van más allá de la experiencia, ni proporcionan información acerca del mundo. Pueden tener, eso sí, valor de convicción o fuerza retórica, e incluso pueden ser útiles para mostrar la consistencia interna de la teoría, pero son redundantes en lo que a la naturaleza de la realidad se refiere.
- b. Son casos límite de experimentos ordinarios en el sentido de que alcanzan sus objetivos sin ser ejecutados. Estos objetivos pueden ser, según el experimento imaginario de que se trate, ‘destructivos’, es decir, de ataque a una teoría rival o dominante, ‘ejemplificadores’ de alguna consecuencia o implicación de una teoría, o ‘heurísticos’. En los tres casos no difieren sustancialmente de los experimentos ordinarios salvo en su contundencia lógica. En el mismo sentido, puesto que todo experimento pretende ser una simulación simplificada de la naturaleza e incluye idealizaciones de los fenómenos, un experimento imaginario es sólo un caso de simplificación e idealización extrema.
- c. Son modelos mentales, o ejemplificaciones de modelos mentales, que reconstruyen los datos conocidos de una manera diferente. En este sentido, son constructivos y falibles y tienen gran importancia para la construcción de modelos teóricos y su aplicación.
- d. Son experimentos genuinos, aunque diferentes de los experimentos físicos reales, que permiten adquirir conocimiento a priori de la naturaleza a partir de datos viejos y ya conocidos. En este sentido, proporcionan información nueva acerca de la realidad, sus propiedades y su estructura a pesar de no ser empíricos y en este sentido son platónicos en sentido estricto.

Sea cual fuere la posición que se elija, lo cierto es que los experimentos imaginarios han jugado un papel importante en la historia de la ciencia y en especial en el desarrollo de la ciencia moderna a partir de la Revolución Científica. No en vano Galileo, junto con Einstein, fue uno de los grandes cultivadores de este tipo de experimentos, aunque también se encuentran en Descartes, Leibniz,



Hooke, Newton, etc. Pero son también uno de los elementos que conectan la ciencia moderna con el periodo inmediatamente anterior. En efecto, los experimentos imaginarios jugaron también un papel importante en la ciencia y la filosofía del siglo XIV y en el desarrollo de la cuantificación de las cualidades o la Teoría del Ímpetus. Aunque los experimentos *secundum imaginationem* utilizados por los medievales tardíos están más cerca de los experimentos mentales filosóficos que de los experimentos científicos imaginarios en sentido estricto, lo cierto es que hay relaciones evidentes entre ellos y ésta es una de las razones por las que se suele considerar a los Calculadores de Oxford o a la Escuela de París como precursores de Galileo y a las teorías que desarrollaron como un paso importante hacia la Revolución Científica pese al giro fundamental que ésta introduciría en la ciencia. Además, aunque los experimentos mentales se pueden encontrar en la Antigüedad, como en el caso de Zenón, Platón, Lucrecio o el propio Aristóteles, su utilización sistemática y a gran escala es una característica distintiva de la época medieval tardía como consecuencia de la polémica de los universales y de la disputa de la prioridad entre la filosofía y la teología.

### **LA POLÉMICA DE LOS UNIVERSALES Y EL DESARROLLO DEL NOMINALISMO**

El origen de la disputa de los universales se encuentra en unos comentarios de Boecio acerca de los planteamientos de Aristóteles sobre la naturaleza y el status ontológico de los nombres comunes y las ideas universales abstractas. En el análisis de Boecio el problema consiste en determinar la relación de estas ideas o formas universales con los objetos individuales, los números y la mente del sujeto que conoce. Las posiciones clásicas ante el problema eran tres:

- a. Las ideas universales son ideas eternas separadas de las cosas particulares y con el mismo tipo de existencia real que éstas (salvo que no son directamente observables). Más aún, las cosas concretas son como son porque participan de esas ideas universales, que serían ontológicamente previas. Se llamaban en este caso *universalia ante rem*. Esta posición, atribuida tradicionalmente a Platón, fue modificada por S. Agustín para adaptarla al cristianismo. Así las consideraba ideas eternas en la mente divina, siendo los objetos concretos, y en general la materia, simples sombras de esas ideas. Esta posición fue la dominante hasta la irrupción del aristotelismo en el siglo XII y continuó posteriormente con modificaciones en las propuestas más místicas. Se la llama Realismo Fuerte.
- b. Las ideas universales existen realmente, pero de forma diferente a los objetos concretos. Subsisten en las cosas individuales y sólo en ellas, no tienen existencia separada. Pero esto no impide que sean tan reales como las cosas concretas; son formas distintas de existencia y se



accede a ellas por caminos distintos, en un caso la abstracción y la razón y en el otro la experiencia. Precisamente es la existencia de esos principios y formas en las cosas lo que las hace ser como son. Se llamaban, en este caso, *universalia in re*. Atribuida a Aristóteles se hizo popular, sobre todo, en el siglo XIII, aunque adoptó numerosas variaciones (desde el determinismo de los averroístas latinos hasta el refinado realismo de Duns Scoto, pasando por algunos planteamientos de Tomás de Aquino). Suele llamarse Realismo Moderado.

- c. Las ideas universales no tienen existencia real, sino que son conceptos, abstracciones de las cosas concretas o meros nombres. Se llaman ahora *universalia post rem* y según se eligiera una posición u otra surgían, sin embargo, dos enfoques diferentes, que suelen englobarse bajo la etiqueta de Nominalismo a pesar de sus profundas diferencias:
  - c1. Estas ideas son conceptos racionales con existencia mental que no dependen de los sujetos individuales, sino de las reglas internas de la racionalidad e incluso de la estructura racional del mundo. En cierto modo, se puede decir que son conceptos mentales o racionales que tienen su correlato en las cosas o están en ellas como propiedades, cualidades, etc. Esta posición se llama Conceptualismo y mantiene una estrecha conexión con la anterior, hasta el punto que algunos autores oscilan entre ellas (Sto. Tomás, el propio Aristóteles). Igualmente, muchos otros que se denominan Nominalistas por oposición al Realismo se sitúan también en esta posición.
  - c2. Las ideas universales son simplemente nombres sin referente o, en el mejor de los casos, simples abstracciones de semejanzas entre los objetos individuales y las usamos los sujetos para designar esas semejanzas (a modo de abreviaturas). En este sentido, su referencia son sencillamente otras palabras, no entidades reales, pues sólo existen las cosas individuales. Éste es el Nominalismo estricto, cuyo principal representante es Occam.

Planteada en estos términos, la polémica puede parecer excesivamente metafísica y poco interesante para la ciencia. Sin embargo, tras ese lenguaje retorcido y plagado de sutilezas propias de la época, se están planteando muchas cuestiones metodológicas y filosóficas referidas a la naturaleza misma de la ciencia y los conceptos científicos. Por citar sólo algunas:

- La naturaleza de la estructura del mundo, su racionalidad (y, por tanto, la posibilidad de descubrirla, comprenderla o inventarla, según el caso) y la capacidad humana de explicarla mediante la ciencia.
- El *status* de las leyes e hipótesis de la ciencia (o de los conceptos que las integran) y la mejor forma de llegar a ellos (a priori, abstracción, experiencia o experimentación).



- La naturaleza última de la Física y las Matemáticas, la prioridad entre ellas e incluso su posible conexión. En el mismo sentido, la naturaleza esencial de la geometría y el lenguaje o, por contra, su convencionalismo y la posibilidad de inventar un formalismo sin referencia que pueda usarse útilmente para la descripción y análisis de la naturaleza (de modo semejante a como usamos el lenguaje ordinario, plagado de nombres comunes, según los nominalistas sin referencia, para describir la realidad).
- La explicación y justificación de nuestras clasificaciones de la naturaleza y la posibilidad de medirlas. Igualmente, si las metrificaciones (la cuantificación de las cualidades) han de ser extensionales o intensionales. En el mismo orden de cosas, la necesidad o el posibilismo y falibilismo de los principios científicos.
- La posibilidad de encontrar un estándar de verdad para el conocimiento humano, incluyendo el científico, y distinguir lo real de lo aparente. Una parte de este problema es el papel de la autoridad en el conocimiento y la licitud de criticar, discutir y plantear alternativas al conocimiento generalmente aceptado.
- La naturaleza de la causalidad y la existencia misma de causas, así como los métodos para descubrirlas a partir de sus efectos o postularlas instrumentalmente. Igualmente, la conveniencia de que las explicaciones sean por causas esenciales, por causas eficientes inmediatas o, simplemente, descripciones acerca de cómo se producen los fenómenos (lo que ya contiene en sí mismo la explicación de por qué). En todos los casos, esto supone plantearse el papel de la experiencia y de la inducción. Aquí entra también el papel de los experimentos mentales y su posible utilidad para la ciencia.

Éstos, y otros problemas semejantes, se encuentran en los textos de los escolásticos como derivaciones de su discusión acerca de la naturaleza de los universales. El que los presenten como argumentaciones de segundo orden no les quita importancia, ni significa que no fueran influyentes. La propia forma de argumentación medieval y su gusto por la jerarquización de los problemas es la responsable de que no se escribieran tratados específicos sobre estos temas y que aparecieran como flecos en la polémica de los universales. La misma polémica general está subsumida en otra, mucho más importante en la época, que constituye la columna vertebral de toda la cultura medieval: la polémica sobre la filosofía y la teología. Incluso el desarrollo del Nominalismo es una derivación de esa disputa. En 1277 se condenaron las 219 tesis aristotélicas (la mayoría aristotélico-averroístas) que chocaban con el dogma cristiano. Esa condena marca toda la concepción filosófica del mundo del siglo XIV. Hasta ese momento, la influencia del aristotelismo había llevado a dos planteamientos alternativos:



- El clásico tomista, según el cual razón y fe se complementan (o la primera complementa a la segunda y no pueden entrar en conflicto si la primera se ejerce rectamente). En tal caso, el mundo tendría una estructura que puede ser racionalmente conocida y comprendida, precisamente por ser creación divina. Aunque las verdades necesarias que rigen la estructura del mundo están limitadas por la libertad de la divinidad (no puede ser obligada a nada por nada, no hay necesidad más allá de su libertad), la racionalidad constituye una de las características fundamentales de la divinidad y por tanto de su creación.
- El averroísta, para el cual en los asuntos de conocimiento lo fundamental es la racionalidad, por encima incluso de la fe. Cada una atiende a sus asuntos y en cuanto al conocimiento del mundo no hay criterio superior a la razón. La ciencia debe descubrir esas verdades necesarias, en sentido fuerte, que determinan la estructura de la realidad. De este modo, ciertas tesis aristotélicas, como la eternidad del mundo, etc, son perfectamente aceptables si se demuestran suficientemente, aunque choquen con el dogma (éste sería el irracional, en el sentido de ser independiente de factores racionales). Otra forma de decirlo era considerar que el conocimiento del mundo es competencia sólo de la razón, en el sentido de que su racionalidad no puede ser limitada ni por la voluntad, ni por la libertad humanas o divinas.

No obstante, la posición más extendida después de la condena de 1277 fue la separación tajante entre razón y fe, pero sin considerarlas en plano de igualdad, sino concediendo toda la fuerza a la segunda: la estructura del mundo no es racional, en el sentido de sometida a verdades necesarias que puedan descubrirse por la razón, ni tan siquiera está claro que el mundo posea una estructura permanente cognoscible más allá de los fenómenos empíricos, y la propia razón humana es incapaz de conocerlo completamente e incluso de discernir entre las distintas explicaciones posibles que pueden dar cuenta de los fenómenos. La razón última que se aducía para afirmación tan contundente era que la característica fundamental de la divinidad no era la racionalidad, sino la voluntad (infinitamente libre, decía Duns Scoto) o la libertad (Occam): el mundo es como es porque la divinidad así lo ha querido y si hubiera querido que fuera de otra forma, lo sería, como puede serlo y cambiar en cualquier momento, si así lo quiere. El único límite a este voluntarismo es la contradicción. De esta forma, no sólo en los asuntos teológicos y vitales se le concedía prioridad a la fe, sino que la propia uniformidad de la naturaleza en la que se fundamentan las leyes científicas estaría sustentada en último término en la libre voluntad de la divinidad.

Lo paradójico es que esta posición tajante no constituyó un freno, sino un impulso para el desarrollo de la ciencia. Primero, porque dejó sin justificación teórica al aristotelismo. Si la naturaleza de la realidad está sometida de tal forma a la voluntad divina y no hay verdades necesarias racionales, nada impide someter



a crítica la filosofía natural aristotélica, formular alternativas e incluso, en un libre juego de la imaginación, discutir y analizar cuestiones que podrían haber ocurrido (desde la pluralidad de universos al movimiento en el vacío y desde la composición del continuo o la infinitud del espacio hasta la naturaleza del tiempo). Así, no es extraño encontrarse a Alberto de Sajonia planteándose si podría existir una línea espiral infinita dentro de un cuerpo finito y a N. de Autrecourt afirmando que el tiempo no es continuo, sino que está constituido por instantes discretos indivisibles.

Segundo, porque impulsó los estudios y discusiones metodológicas (como las citadas más arriba), el análisis de la naturaleza y función del conocimiento científico y, sobre todo, el desarrollo de métodos aplicables al análisis de casos y fenómenos empíricos específicos (como la cuantificación de cualidades usada para medir la intensidad de la luz según el ángulo de incidencia y la distancia o la velocidad uniformemente acelerada, o los análisis de Occam de la causa inmediata) en lugar de la postulación tradicional de esencias o especies imponderables como causas necesarias de los fenómenos.

Tercero, y principalmente, porque desplazó el punto de atención de la filosofía natural tradicional al estudio empírico y cuantitativo de la naturaleza y favoreció el desarrollo del Nominalismo, que tuvo una positiva influencia sobre los científicos de la época (desde Bradwardine o Dumberton a Oresme y Buridán, en unos casos por su acuerdo con Occam y en otros, como Buridán, por su compromiso con el realismo como reacción a la concepción del movimiento de Occam).

En el caso de Occam, el paso al Nominalismo es muy sencillo. Si la creación y naturaleza del mundo no dependen de ideas preconcebidas o naturalezas comunes, sino de la libertad divina, entonces es innecesario suponer que existan esencias comunes que se ‘realicen’ en los individuos, sino sólo cosas individuales concretas. Dado que estos individuos son más o menos parecidos, eso nos permite formarnos conceptos universales de ellos y usar nombres generales, pero ambos sólo se refieren, en el mejor de los casos, a esas semejanzas de los objetos o incluso a otros conceptos y términos derivados de los objetos individuales. De esta forma, sólo los hechos singulares son reales, pero no su coherencia o su estructuración racional (ambas las suponemos y construimos los sujetos), y sólo pueden ser experimentados, pero no deducidos de principios necesarios. El conocimiento, por tanto, se deriva de la experiencia directa, sin conceptos, ni formas interpuestos. Sólo en un segundo paso se abstraen sus semejanzas o se establecen correlaciones, pero éstas no tienen realidad objetiva, sino que sólo son abstracciones mentales del comportamiento de los objetos individuales (por tanto, ni hay elementos al modo aristotélico, ni lugares naturales, etc). Por esta razón distingue Occam entre la ‘ciencia real’, que son proposiciones acerca de cosas particulares, y la ‘ciencia racional’, que son las teorías en las que los nombres representan abstracciones y no algo real. De aquí obtiene Occam tres principios fundamentales:



- a. El principio de economía o navaja de Occam, que es un principio de simplicidad y economía de explicaciones y entidades, según el cual no hay que postular la existencia de más entidades que las estrictamente necesarias para dar una explicación y entre explicaciones alternativas siempre será preferible la más sencilla. En última instancia, es una extrapolación a todo el conocimiento de los supuestos de simplicidad y elegancia corrientes incluso en la matemática griega. Su utilización en la física medieval no sólo tuvo consecuencias devastadoras para la proliferación de imponderables y especies postuladas comúnmente, sino que ayudó a la conexión entre matemáticas y física, como veremos más adelante. Del mismo modo, su influencia posterior en el nacimiento de la ciencia moderna, en el empirismo inglés o en la eliminación de las potencias naturales en la física del XIX es incuestionable.
- b. El estudio de la causalidad y la definición de la causa inmediata. El fuerte empirismo ontológico sustentado por Occam lo llevaba a mantener una especie de infradeterminación del conocimiento, según el cual el mismo efecto puede existir por muchas causas diferentes (y, en el mismo orden de cosas, el mismo fenómeno puede tener también muchas explicaciones diferentes), por tanto las conexiones causales sólo pueden fijarse en casos concretos. Define, así, la causa inmediata como aquella que si está presente, se sigue el efecto, y si no lo está, no se produce el efecto, siendo todas las demás cosas iguales. Si aparecen otras causas alternativas, hay que eliminarlas a partir de la observación, la experimentación, etc. En cualquier caso, nunca hay evidencia de alguna relación metafísica o esencial entre causa y efecto (la única 'prueba' es la citada para la causa inmediata), sino sólo la asociación empírica entre sucesos. Por ello, no pueden probarse de ninguna forma las causas finales aristotélicas y, aunque puede hablarse de la causa total como la suma de todos los antecedentes que bastan para producir un suceso, las únicas causas reales son las inmediatas. Pese a todo, y en términos generales, las conexiones causales establecidas empíricamente a partir de esas causas inmediatas son válidas por la uniformidad de la naturaleza (recuérdese que para Occam la voluntad y libertad divinas sólo están limitadas por el principio de no contradicción y esa ausencia de contradicción es suficiente para garantizar la uniformidad natural, a lo que hay que añadir el uso de la 'navaja de Occam', que también apoya esa uniformidad). Estos análisis occamistas de la causalidad, que recuerdan los de Hume, son los precedentes de la sustitución de las causas finales por las causas efectivas que caracterizarán los orígenes de la ciencia moderna, de F. Bacon a Galileo.
- c. El probabilismo. Es una consecuencia de todo lo anterior y consiste en afirmar que la filosofía (y la ciencia, en su caso) puede ofrecer explicaciones probables, pero no necesarias. Por eso, es natural que existan distintas explicaciones del mismo fenómeno y, además, es lícito y conveniente buscar otras nuevas. De entre ellas hay que elegir siempre la más probable a la



luz de la experiencia y del principio de economía (aunque nunca será completamente cierta, sólo probable). Por eso, es importante la proliferación de alternativas para mejorar nuestras explicaciones de la naturaleza. Este probabilismo es lo que se encuentra a la base de la Teoría del Ímpetus, de los trabajos de los Calculadores de Oxford y de las discusiones de Oresme respecto a la inmovilidad de la Tierra. Pero, además, el probabilismo tiene una consecuencia metodológica importante para todas las teorías citadas: el uso de los supuestos *secundum imaginationem*, es decir, imaginar todo tipo de posibilidades sin tomar en consideración su realidad física o su posible aplicación. Esto permite analizar los fenómenos en forma hipotética y recurrir sin restricción a experimentos mentales e imaginarios, factores ambos importantes en el análisis de las variaciones de intensidad de las cualidades y los movimientos (introduciendo distinciones formales, variantes inobservables, etc, pero sin llegar a postular que las conclusiones tuvieran correspondencia física).

### ***EL PROBLEMA DE LA INTENSIFICACIÓN Y DISMINUCIÓN DE FORMAS Y CUALIDADES***

El análisis de las variaciones de intensidad de las cualidades y movimientos o, para abreviar, la cuantificación de las cualidades, es uno de los logros más importantes de la ciencia del siglo XIV y se ha considerado, tradicionalmente, como el primer paso hacia la construcción de la Física Matemática. La tarea la llevaron a cabo un grupo de matemáticos de Oxford, todos ellos sucesivos profesores del Merton College, de donde viene su nombre colectivo: Calculadores de Oxford o Mertonianos. Entre ellos se encuentran Bradwardine, Heytesbury, Swineshead, Dumbleton, etc. y centraron su trabajo en lo que llamaron '*el problema de la intensificación y disminución de formas y cualidades*'.

El origen del problema está en las críticas de Occam y los nominalistas al tratamiento aristotélico de las cualidades. Para Aristóteles cantidad y cualidad son cuestiones completamente distintas. Aunque ambas son dos formas de cambio (junto al sustancial y al movimiento local), ni pueden combinarse, ni tienen ninguna relación entre sí. La razón es que el cambio cuantitativo consiste en la adición o sustracción de partes homogéneas, sean continuas (distancia espacial), sean discontinuas (números). Por eso, no hay cambio de especie, puesto que la mayor contiene a la menor. En otras palabras, todas las partes que se añaden o se restan poseen las mismas propiedades y atributos y son idénticas entre sí; la entidad sometida al cambio (sea una distancia que aumenta, una serie creciente de números, un objeto que crece o disminuye, etc) conserva a través del proceso tanto su identidad esencial, como el conjunto de propiedades que la identifican y la hacen ser como es. El estado final del proceso, si es de aumento, contiene el estado inicial, o está contenido en él, si es de disminución.



Por el contrario, el cambio cualitativo no se debe a la adición o resta de partes homogéneas, sino a la pérdida de una especie y la ganancia de otra. Es decir, en este cambio la entidad conserva su identidad esencial, pero pierde una propiedad o atributo y la sustituye por otra diferente (aunque pueda ser muy parecida). Esto vale, por ejemplo, para el cambio de color, pero también para procesos más oscuros, como el aumento o disminución del calor, la intensidad de la luz e incluso el movimiento (si se considera que el lugar ocupado por el cuerpo determina una especie y por tanto el paso de un lugar a otro implica perder una especie y ganar otra distinta; esto no es sorprendente en Aristóteles si se tiene en cuenta que concibe el universo integrado por lugares cualitativamente diferentes –arriba, abajo, etc.). En favor de su rechazo de la homogeneidad del cambio cualitativo, Aristóteles aduce como ejemplo que el añadir un cuerpo caliente a otro no lo hace más caliente, lo que debería ocurrir si fueran partes homogéneas (añadir una distancia a otra sí la hace más grande).

Esta concepción aristotélica implicaba una multiplicación de especies y atributos que chocaba frontalmente con el Nominalismo y la navaja de Occam. De ahí que Occam lo rechazara, considerando que la intensidad de una cualidad puede ser medida en grados numéricos. En tal caso, todas las diferencias reales se reducirían a diferencias en cantidad y la intensidad de una cualidad podría medirse igual que la magnitud de una cantidad. Rechazaba el ejemplo aristotélico de los cuerpos calientes afirmando que el problema estaba en que se añaden los cuerpos; si se pudiera añadir sólo la cualidad –calor– a la otra cualidad –calor, también–, el resultado sería un cuerpo más caliente. Concluía, de ahí, que las diferencias cualitativas consistían en diferencias de la estructura geométrica, del número o del movimiento. Todo esto tenía, además, un punto de apoyo en la Óptica donde, desde Grosseteste, se había intentado probar que la diferencia en los efectos cualitativos de la luz se debían a diferencias cuantitativas (el debilitamiento de la luz blanca a la refracción, los cambios en la intensidad y el calor al ángulo de incidencia y a la concentración luminosa, etc.). Incluso, R. Bacon ya había supuesto que el calor era resultado del movimiento.

Lo que hacía falta era encontrar un método adecuado que permitiera la cuantificación de las cualidades y, de esta forma, la conexión de Matemáticas y Física, el estudio matemático de la naturaleza. Éste es el trabajo que llevan a cabo los Calculadores de Oxford y tiene dos características importantes: a) Se centran en el estudio del movimiento, lo que contribuirá al desarrollo, o a demostrar la posibilidad del desarrollo, de la Cinemática mediante la definición de algunos conceptos fundamentales (movimiento uniforme, aceleración uniforme, velocidad instantánea, etc.); b) Hacen el análisis en términos de distancia y tiempo, dos nociones cuya combinación era rechazada por Aristóteles, y a partir casi exclusivamente de experimentos imaginarios.

La base del análisis tiene, nuevamente, resonancias occamistas: supone que hay una variación concomitante entre causa y efecto, de manera que, al modo de



la causa inmediata de Occam antes citada, el efecto se explica en función de las condiciones necesarias y suficientes que lo producen y así se relacionan sus cambios. Pero lo hacen matemáticamente, considerando que la velocidad (variable dependiente) se explica en una función algebraica de distancia y tiempo (variables independientes).

El primer método utilizado es el ‘álgebra de palabras’ de Bradwardine en la que se emplean letras del alfabeto para sustituir a las cantidades de las variables, mientras las operaciones se describen con palabras. Este recurso a las letras del alfabeto permite evitar el problema aristotélico de la imposibilidad de combinar cantidades no comparables y representa uno de los primeros intentos conscientes de introducir un formalismo algebraico, aunque a niveles aún muy elementales. Esto permite a Bradwardine reformular las afirmaciones aristotélicas acerca del movimiento violento relacionando  $v$  (la velocidad) con  $f$  y  $r$  a la vez (la fuerza motriz y la resistencia).

Los restantes ‘calculadores’ perfeccionaron el método y lo utilizaron para estudiar estas proporciones en distintos campos (movimiento local, calor, luz etc.). Lo que pretenden es expresar los grados en que aumenta o disminuye una cualidad respecto a una escala que ha sido fijada previamente. Llamam **forma** a cualquier cualidad o cantidad variable en la naturaleza y suponen que la **intensio** (intensidad) de una forma es el valor numérico que hay que asignarle. A su vez, hablan de la velocidad con que cambia la *intensio* con respecto a otra forma conocida, a la que llaman **extensio** (extensión). También las llaman, respectivamente, **latitud y longitud**. P. ej., se puede fijar la *intensio* de la velocidad (y la velocidad con que esta *intensio* cambia) por referencia a la *extensio* de la distancia o el tiempo. Todo esto les permite definir una serie de conceptos fundamentales, como el movimiento uniforme y el movimiento acelerado, aunque ellos los formulan en general como formas de cambio para aplicarlos a la velocidad con que cambia una *intensio* cualquiera:

- Cambio uniforme (movimiento uniforme, en su caso): cuando se recorren distancias iguales en intervalos sucesivos de tiempo iguales o el recorrido de distancias iguales en cualquier intervalo de tiempo.
- Cambio disforme (movimiento acelerado): cuando se recorren distancias desiguales en intervalos de tiempo iguales.
- Cambio uniformemente disforme (uniformemente acelerado): movimiento en que se adquiere un incremento igual de velocidad en cualquier intervalo igual de tiempo.
- Cambio disformemente disforme: incrementos desiguales de velocidad en tiempos iguales.
- Velocidad instantánea: la distancia recorrida por un punto en movimiento si ese punto fuera impulsado uniformemente durante un periodo de tiempo con la misma velocidad que poseía en ese instante.



Además de todo esto, hacen desarrollos concretos, el más importante de los cuales es el teorema de la velocidad media, también llamado teorema de Merton (por el Merton College, aunque también se le llama teorema de Oresme por la prueba gráfica que éste dio). En nuestros términos, el teorema es:  $S = 1/2 V_f t$ , es decir, la distancia recorrida por un cuerpo que parte del reposo con velocidad uniformemente acelerada equivale a la mitad de su velocidad final multiplicada por el tiempo. Pero es mucho más interesante verlo en su formulación. Primero, se afirma que un cuerpo que inicia la aceleración uniforme a partir del reposo recorre cierta distancia en cierto tiempo. Segundo, se postula el lema que debe ser probado: si el mismo cuerpo hubiera de estar en movimiento durante el mismo intervalo de tiempo con una velocidad uniforme igual a la velocidad instantánea en el instante intermedio de su aceleración uniforme, recorrería una distancia igual. De esta forma se equiparan un movimiento acelerado y un movimiento uniforme al expresar la distancia recorrida por el primero en términos de la recorrida por el segundo.

La prueba de este teorema la da Oresme en su libro *De las configuraciones de las cualidades* y eso nos lleva al segundo método utilizado para cuantificar cualidades. Utilizado en la Universidad de París era básicamente un método geométrico que recurría al uso de gráficas. La *extensio* se representa mediante una línea recta horizontal (longitud) y cada grado de la *intensio* se representa mediante una línea vertical de altura determinada (latitud). La línea que une los extremos de estas líneas verticales determina la velocidad y el modo del cambio de la *intensio*. Lo que se pretende con este método gráfico de ‘representación de las latitudes de formas’ (este nombre le da Oresme) es construir figuras que representen la cantidad de cualidad, de manera que las propiedades de la figura (equivalencias, etc) representen propiedades intrínsecas de la cualidad. En esto consiste su demostración del teorema de la velocidad media: como las áreas de las figuras resultantes del movimiento uniforme y del uniformemente acelerado son iguales, ambos movimientos tienen que ser equivalentes. Si el método anterior de los oxonienses recuerda al de Galileo, éste de Oresme recuerda la geometría analítica cartesiana, pero con una diferencia básica: su interés se centra en la figura, por lo que no hay una asociación sistemática de una relación algebraica con una representación gráfica.

Ambos métodos, y el intento mismo de cuantificación de las cualidades, dan una idea clara del cambio acontecido en el siglo XIV con respecto a toda la época. Su interés es el de haber sido precursores de muchos de los planteamientos que condujeron a la construcción de la ciencia moderna. Sin embargo, tienen una diferencia fundamental con los trabajos de los siglos XVI y XVII: son absolutamente teóricos. El estudio de los problemas cinemáticos en Oxford está basado en experimentos mentales y supuestos *secundum imaginationem*; en París se recurre a observaciones derivadas frecuentemente de la Teoría del Ímpetus, pero no hay ninguna referencia a experimentos que no sean imaginarios. En este sentido, aún siendo precursores de los trabajos de Galileo, los analistas de las intensidades y formas siguen siendo medievales.



## LA TEORÍA DEL ÍMPETUS

El otro gran desarrollo de la ciencia del siglo XIV es la Teoría del Ímpetus desarrollada en París, especialmente por Buridán. Aunque las repercusiones de esta teoría son inferiores a las del análisis de las cualidades, sin embargo fue muy influyente en su época y marca el comienzo de una línea que llega hasta Galileo a través de Benedetti y otros autores renacentistas. Pero antes de pasar a la exposición de la teoría conviene señalar los problemas con que se encontraba la teoría aristotélica del movimiento, los cuales constituyen el origen de la propuesta de Buridán.

Aristóteles había considerado el movimiento local como uno de los tipos de cambio y había establecido una distinción entre dos movimientos radicalmente diferentes:

- **Movimiento natural:** Es el movimiento de los cuerpos hacia su lugar natural (arriba, abajo, etc.) según su composición a partir de los cuatro elementos. Su característica básica es que está gobernado por causas finales (la tendencia natural) o, si se definen como eficientes, por causas internas (apetitos, potencias naturales, etc.). En último término, el comportamiento de cualquier objeto a este nivel viene dado por la posesión de ‘pesadez’ o de ‘ligereza’. En cuanto al comportamiento de los cuerpos en el movimiento natural, su velocidad es proporcional a su peso e inversa a la resistencia del medio y el tiempo sería proporcional a la resistencia del medio e inverso al peso. Este principio, en cualquier caso, es cualitativo (la cuantificación y las fórmulas que hoy conocemos provienen del siglo XIV).
- **Movimiento violento:** Es el comportamiento de un cuerpo resistente cuando se le aplica una fuerza impulsora exterior, es decir, cualquier movimiento distinto al natural. Se caracteriza por estar regido por causas eficientes externas (el motor, la fuerza impulsora, etc.). Está sometido a dos requisitos metodológicos importantes: a) hay una diferencia esencial entre causa y efecto, lo que las hace distinguibles en cualquier momento (precisamente porque la causa es externa); b) la causa debe permanecer en contacto con el efecto, pues en otro caso éste cesaría (dicho de otra manera, es imposible ejercer una acción a distancia). Cuando el móvil se separa del motor que proporciona la fuerza impulsora para su movimiento en el primer instante, se sigue moviendo porque el motor comunica la fuerza impulsora al aire que actúa como nuevo motor. Dada su prohibición de combinar nociones ‘incomparables’, Aristóteles se ve obligado a dar cuenta del movimiento en términos de cuatro conceptos básicos: fuerza (móvil, impulsora, etc), cuerpo resistente, distancia recorrida y tiempo, pero no usa la velocidad, que no se formula con precisión hasta los Calculadores de Oxford. A efectos de simplicidad, sin embargo, puede decirse que la velocidad en este movimiento sería proporcional a la fuerza impulsora e inversa a la ‘propia resistencia’ del cuerpo (obsérvese que no es la resistencia del medio,



como en el movimiento natural, sino la resistencia propia del cuerpo, aunque nunca define esta noción; en cuanto al medio, se supone que es homogéneo). Como la descripción de Aristóteles no es una ecuación cuantitativa, puede establecer una importante restricción al principio general: si la fuerza se debilitara hasta el punto de no poder impulsar al cuerpo (o a su resistencia propia), entonces el movimiento cesaría inmediatamente. Aceptada esta limitación, se puede aumentar o disminuir la velocidad, p. ej. duplicarla, aumentando la fuerza impulsora y duplicándola o reduciendo la resistencia propia a la mitad. El movimiento no es eterno porque la fuerza impulsora se 'disipa' debido a su forma de transmisión: el primer motor impulsa tanto al objeto que mueve, como al aire que se convertirá en nuevo impulsor; a su vez, la primera fracción de aire impulsa al objeto y a la siguiente fracción de aire y así sucesivamente. Como resultado de este doble trabajo, la fuerza impulsora va disminuyendo progresivamente hasta que no puede impulsar a la siguiente fracción de aire, momento en que deja de actuar la causa externa y comienza el movimiento descendente natural (curiosamente, el cambio debería ser brusco, como señalaba Autrecourt y la caída casi rectilínea, pues si ya no actúa la causa, sólo queda el movimiento natural). Pero, además de todo esto, el medio, supuestamente homogéneo en Aristóteles, actúa como un medio resistente y frena el movimiento del objeto. La razón es que, de otro modo, el movimiento sería infinito, o casi-infinito, e instantáneo, lo cual es imposible. Recuérdese que Aristóteles rechazaba la existencia del vacío (incluyendo la de intersticios vacíos en el continuo material o el atomismo) por este motivo.

El análisis detallado de esta teoría del movimiento aristotélica revelaba numerosos problemas e inadecuaciones, como ya habían señalado comentaristas grecolatinos y árabes. P. ej., Filopón, un comentarista del siglo VI, había señalado la inconsistencia de poner el aire como motor y como freno a la vez en el movimiento violento. Eso lo llevó a suponer que la causa del movimiento es una fuerza incorpórea impresa al móvil. De la misma forma, pensaba que el movimiento no puede ser inverso a la resistencia del medio o a la propia, porque en tal caso debería existir un movimiento mínimo incluso en el caso de que el peso o la fuerza impulsora fueran inferiores a la resistencia. Por eso consideraba que la resistencia era sólo un factor limitador que debía restarse al peso  $p$  o a la fuerza  $f$  (es decir,  $v = p - r$  y  $v = f - r$ ). Parecidos argumentos se encuentran en los árabes (Avempace, Averroes, etc). Así, para Avempace la ausencia de resistencia no implica velocidad infinita, como prueban los planetas moviéndose en el éter, por tanto el movimiento no es inverso a la resistencia, sino que será sólo lo que quede de movimiento 'libre' inicial una vez restada la resistencia del medio.

En todos estos casos, sin embargo, los análisis eran sólo fragmentarios y parciales. Es en el siglo XIV cuando se hace un estudio exhaustivo de los problemas y se intenta darles solución. El recurso a los supuestos *secundum imagi-*



*nationem* y experimentos mentales es importante en este proceso, al igual que el probabilismo, pues permitió plantearse el problema de las características del movimiento en el vacío (algo perfectamente imaginable, aunque siguiendo a Aristóteles negaran su existencia real). Del mismo modo, la influencia del principio de economía de Occam y sus análisis de la causalidad contribuyeron a considerar excesivos ciertos supuestos aristotélicos básicos, como la distinción tajante de dos tipos de movimiento con dos causas diferentes o la multiplicación de entidades que implicaba la postulación de un impulsor diferente en cada punto recorrido por el móvil en el movimiento violento (Occam llegaba a afirmar que estas entidades intermedias postuladas para evitar la acción a distancia y mantener el contacto entre causa y efecto eran innecesarias para dar cuenta de los fenómenos observados, porque la fuerza motriz no necesita acompañar al cuerpo; por tanto, la acción a distancia era posible, tal como ejemplificaban el imán o la luz del Sol). El resultado de todo esto fue la detección e intento de solución de algunos problemas importantes y, sobre todo, la construcción de una teoría completa –la del Ímpetus– inserta en la tradición aristotélica, pero alternativa.

Un problema del movimiento violento era la indefinición aristotélica de la noción de resistencia propia, lo que hacía casi imposible medir con una mínima precisión el movimiento del objeto. Igualmente, eran discutibles las exigencias aristotélicas de que fuera imprescindible un medio resistente para que tuviera lugar el movimiento y que ese medio actuara a la vez como motor y freno, e incluso no estaba claro el supuesto de que el movimiento en el vacío tuviera que ser infinito, sino que podía ser achacado a la formulación cualitativa aristotélica. Precisamente, analizando *secundum imaginationem* el movimiento en el vacío y basándose en su análisis cuantitativo de las cualidades, los Calculadores de Oxford enfocaron el problema de manera distinta a la aristotélica: asumían que si un cuerpo está formado por una combinación de elementos, tales elementos combinados tendrían que estar formados por partes o grados que son los que se combinan. Cada una de esas partes tiene su propia tendencia hacia arriba, hacia abajo, etc. La suma de todas ellas indicaba el predominio del peso o la ligereza y determinaba el movimiento esencial, pero cada una de las partes actuaba realmente en el movimiento afectando al resultado final. Esto los llevó a formular la noción cuantitativa de **resistencia interna**  $r_i$ . Aunque el elemento que prevalece determina el movimiento esencial, los otros también actúan funcionando como resistencia a ese movimiento esencial y modificándolo. Esta resistencia interna se podía medir recurriendo a los métodos de análisis de cualidades. Esto implicaba que ni siquiera en el vacío podía darse un movimiento infinito, porque lo impedía la resistencia interna, y que no era necesario postular un medio resistente que fuera motor y freno, sino que ambas eran cuestiones diferentes: el motor sería el aire, pero el freno era la propia resistencia interna cuantificable. Además, sus métodos semiformales les permitían considerar que el movimiento tenía que ser proporcional a la relación entre fuerza y resistencia interna o a la de peso y resistencia, y no considerarlas



cualitativamente separadas, como hacía Aristóteles. Lo fundamental era esa promorción de manera que en el movimiento natural dos cuerpos de distinto peso caerían al mismo tiempo si las proporciones entre el peso y la resistencia interna de cada uno fueran iguales (siempre que fueran homogéneos, lo hicieran en el mismo medio, etc.). De este modo la velocidad estaba regida por un factor intensional ( $f/r_i$  o  $p/r_i$ ). Incluso consideraban también el peso como la expresión de una fuerza impulsora medible, aunque interna.

La contribución esencial, sin embargo, es la Teoría del Ímpetus de Buridán y Oresme. Dispuestos a eliminar la multiplicación de causas movientes necesarias para explicar el movimiento violento en la teoría aristotélica, supusieron que la causa del movimiento de un objeto una vez separado del motor impulsor era solamente una que se mantenía a lo largo del movimiento. Esta fuerza impulsora, a la que llamaron **ímpetus** se transmitía del impulsor al cuerpo en movimiento y quedaba impresa en el móvil actuando como causa de su movimiento, de tal manera que incluso en el vacío el movimiento sólo era posible mientras persistiera ese ímpetus. Aunque tal ímpetus (como toda *virtus impressa*) sólo podía medirse *ex post facto*, la velocidad del cuerpo y su cantidad de materia determinaban la potencia del ímpetus transmitido. Si entendemos peso como cantidad de materia, entonces (ímpetus = peso x velocidad). De esta forma, si un cuerpo más denso y pesado era impulsado con la misma velocidad que otro más ligero, el primero recorrería más distancia porque podía recibir más ímpetus y retenerlo más tiempo.

Este ímpetus se desgasta y corrompe por la resistencia del medio, lo que hace que el móvil acabe cayendo, pero duraría indefinidamente si no hubiera resistencia (la resistencia incluye tanto la del medio, como la tendencia natural del objeto). Además, el ímpetus es la misma entidad a lo largo de todo el movimiento: no hay ímpetus adicionales en ausencia de alguna causa identificable. Por tanto, si se eliminara toda resistencia, el cuerpo se movería indefinidamente en la misma dirección y con velocidad constante. Esto, sin embargo, no lo consideraba posible por la finitud del universo y la inexistencia real del vacío y de elementos puros, es sólo un supuesto *secundum imaginationem*.

Sin embargo, el movimiento circular indefinido de los planetas sí se debe realmente al ímpetus: al comienzo del universo se aplica una cantidad fija de ímpetus a cada planeta y el movimiento continúa ya indefinidamente porque no hay resistencia. De este modo, la teoría del ímpetus establece la primera conexión entre los dos mundos aristotélicos: el movimiento en ambos es producido por la misma causa, el ímpetus.

Pero, además, el ímpetus permite explicar otro gran problema de la teoría aristotélica: el de la aceleración en el movimiento natural. Era un hecho conocido por observación que los objetos que caen se aceleran en su caída. Aunque Aristóteles no había tomado en cuenta el problema y se había limitado a considerar este movimiento como uniforme o promediable, los comentaristas medievales comprendieron que se necesitaba una causa que diera cuenta de esta aceleración. Así, postula-



ron la 'excitación de la tendencia' con la proximidad al lugar natural (lo que relacionaría, en nuestra terminología, la aceleración con la distancia recorrida), la rarefacción del aire producida por el calor generado por el cuerpo al caer o la disminución de la resistencia del aire en función de la distancia recorrida (como si aumentara la penetración del objeto). Pero en todos los casos eran causas que no tenían conexión con la fuerza móvil, en este caso el peso. Buridán daba otra explicación. La causa de la caída de un cuerpo es su cantidad de materia, a la que llamaba **gravitas**. Esta *gravitas* es quien determina la caída uniforme natural. Pero, como en el caso anterior de la fuerza móvil, al iniciar el movimiento la *gravitas* genera un ímpetus (o *gravitas* accidental) que se añade al cuerpo e incrementa su velocidad. Este proceso es continuo, generándose a cada nuevo instante incrementos sucesivos de ímpetus que dan lugar a incrementos de velocidad y eso explica la aceleración de la caída. En el movimiento natural intervienen, pues, tres elementos, la *gravitas*, el ímpetus y la velocidad, el movimiento observado es resultado de la combinación de los tres. A pesar de que suponga un avance sobre la teoría aristotélica y, en cierto modo, un precedente para la dinámica galileana, la Teoría del Ímpetus recurre a imponderables, como el concepto mismo de *ímpetus*. Esta teoría está basada exclusivamente en observaciones y experimentos mentales y sigue siendo básicamente cualitativa. Su gran mérito es que es el primer intento de subsumir bajo la misma teoría todos los movimientos, terrestres y celestes, naturales y violentos, precisamente como consecuencia del libre recurso a experimentos *secundum imaginationem*.

## BIBLIOGRAFÍA

- Brown, J. R. *The Laboratory of the Mind*. Routledge.
- Claggett, M. *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. U. Wisconsin P.
- Crombie, A. C. *Historia de la Ciencia: de S. Agustín a Galileo*. 2 vols. Alianza.
- Dales, D. C. *The Scientific Achievements of the Middle Ages*. U. Pennsylvania P.
- Giere, R. N. (ed.) *Cognitive Models of Science*. U. Minnesota P.
- Grant, E. *La Ciencia Física en la Edad Media*. FCE.
- Grant, E. *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages*. CUP.
- Goddu, A. *The Physics of W. of Ockham*. Brill.
- Gooding, D.; Pinch, T. and Schaffer, S. (eds.) *The Uses of Experiment*. CUP.
- Koyre, A. *Estudios de Historia del Pensamiento Científico. Siglo XXI*.
- Kuhn, T. S. *La Tensión Esencial*. FCE.
- Lindberg, D. C. (ed.) *Science in the Middle Ages*. U. Chicago P.
- Mach, E. *Conocimiento y Error*. Espasa Calpe.
- Mach, E. *The Science of Mechanics*. Open Court.
- Maier, A. *On the Threshold of Exact Science*. U. Pennsylvania P.
- Sorensen, R. A. *Thought Experiments*. OUP.
- Wallace, W. A. *Causality and Scientific Explanation*. Vol. 1. U. Michigan P.
- Wallace, W. A. *Prelude to Galileo*. Reidel.
- Weisheipl, J. A. *Nature and Motion in the Middle Ages*. Catholic Univ. of America P.