

De la vis impresa de Hiparco a la cantidad de movimiento de Newton

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM
josel.alvarezgarcia@gmail.com

Resumen

La explicación que Aristóteles (384-322 a.n.e.) daba al fenómeno del lanzamiento de proyectiles nunca convenció a los expertos. Hiparco de Nicea, en el siglo II a.n.e., plantea el concepto de *vis impresa* para explicarlo. Los eruditos del medioevo, los pensadores árabes y, más tarde, filósofos de las universidades de Oxford y París, continuaron los estudios para la explicación de este fenómeno desarrollando el concepto planteado por Hiparco hasta llegar al concepto de cantidad de movimiento expuesto en *Los Principia* de Newton, que es uno de los grandes logros en la historia del pensamiento científico y ahí Newton introduce el concepto de *masa*. No obstante los espectaculares éxitos de la física newtoniana, una de las más sorprendentes características de la historia de la física es la confusión que rodea a la definición de masa, que es el término clave de la dinámica.

Introducción

En este trabajo se presenta una historia sobre el episodio de la ciencia que trata de las explicaciones sobre el fenómeno del lanzamiento de proyectiles. Para narrar esta historia se utiliza, en lo general, el modelo

de desarrollo de la ciencia planteado por T. S. Kuhn en su libro *La estructura de las revoluciones científicas* [1].

Dentro del modelo de Thomas S. Kuhn sobre el desarrollo del conocimiento científico se plantea la secuencia ciencia normal-crisis-revolución-nueva ciencia normal. Este patrón o estructura general comienza con una etapa “preparadigmática” o “pre-ciencia”, en donde aparecen coexistiendo las variadas “escuelas” que se disputan entre sí el dominio en un campo particular de investigación. Este periodo de las distintas escuelas en disputa finaliza cuando el campo de investigación se unifica bajo la dirección de un marco común de supuestos básicos, que Kuhn denomina “paradigma”. El consenso acerca de un paradigma marca el inicio de una etapa de “ciencia normal”, y una vez que una ciencia específica ha quedado individualizada, como resultado precisamente de dicho consenso, pasa por la secuencia mencionada.

En términos muy generales, Kuhn distingue dos maneras principales mediante las cuales quiere emplear el término “paradigma”.

Una es como logro o realización concreta y otra es como conjunto de compromisos compartidos. El primer sentido se refiere a las soluciones exitosas y sorprendentes de ciertos problemas, las cuales son reconocidas por toda la comunidad respectiva. El segundo sentido se refiere al conjunto de supuestos o compromisos básicos que comparte la comunidad encargada de desarrollar una disciplina científica. Kuhn mismo reconoce el carácter polisémico del término y realiza un intento por clarificarlo definiéndolo como “la matriz disciplinaria” [2].

Ahora bien, ningún paradigma que proporcione una base para la investigación resuelve por completo todos sus problemas. Podemos entonces hablar de ciencia normal como una actividad de resolución de enigmas, entendidos estos como problemas que la teoría en un determinado momento no ha resuelto, pero que se espera que lo haga. Sin embargo, la investigación que se realiza en el periodo de ciencia normal, con su creciente especialización y ampliación del campo de aplicaciones, conduce, contrariamente a sus propósitos, al planteamiento de problemas que se resisten a ser resueltos con las herramientas del paradigma vigente; estamos entonces en presencia de una “anomalía”.

No obstante, surge el problema de cuándo una anomalía obligará a un cambio en los fundamentos de alguna rama de la ciencia, esto es, que constituya un auténtico contraejemplo; o bien, puede suceder que tal anomalía sea solo un enigma que será resuelto tarde o temprano dentro del paradigma prevaleciente. Cuando se considera que la anomalía es más que un simple enigma por resolver, comienza la etapa de “crisis” hacia la “ciencia extraordinaria”. Este

tipo de anomalías provocan crisis y resultan auténticos contraejemplos, que para ser resueltos es necesaria la construcción de otro marco teórico, esto es, de un nuevo paradigma que sustituya al anterior. Este tipo de anomalías conducen primero a una crisis y después a lo que Kuhn llama una “revolución científica” [3].

Si bien no se puede caracterizar de manera general en qué circunstancias una anomalía provoca una crisis, o sea el brote de una serie de intentos de reajuste o modificación de los supuestos básicos del paradigma vigente, sí queda claro que las anomalías son una condición necesaria, aunque no suficiente para que esto ocurra.

Para finalizar esta sección, es preciso hacer una aclaración. El tema que es objeto de este trabajo (lanzamiento de proyectiles) proporciona un excelente ejemplo (aunque parcial) del desarrollo de la ciencia en términos del modelo kuhniano. Es un ejemplo parcial, porque la revolución científica de los siglos XVI y XVII se produjo en dos frentes del conocimiento científico: en la física del movimiento y en la cosmología.

El paradigma aristotélico

El estudio sistemático y racional del fenómeno del cambio o movimiento en la naturaleza tiene sus orígenes en las ricas colonias jonias de las costas mediterráneas del Asia Menor. En el siglo VI a.n.e. existía el viejo axioma filosófico “Ignoratio motu, ignoratur natura”. Cualquier filosofía que aspirara a ser considerada verdadera debía explicar el fenómeno del cambio o movimiento. Todos los filósofos naturales dieron distintas respuestas, ya sea para explicar cómo está hecho el mundo o para tratar de explicar el cambio o movimiento en la naturaleza [4].



Cambio y movimiento en la naturaleza

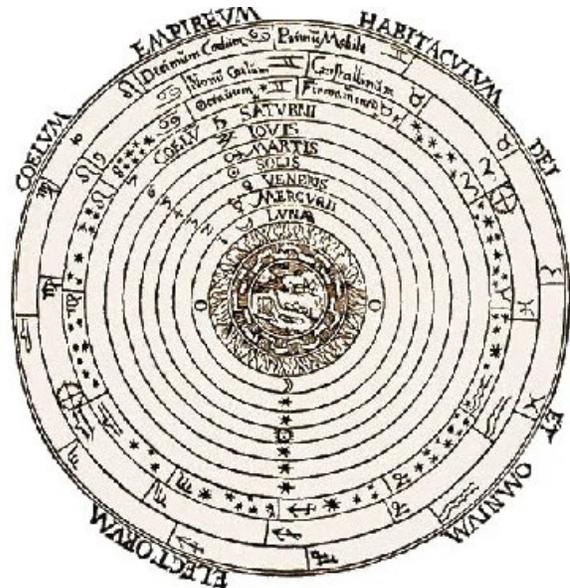


Las colonias jónicas y los antiguos filósofos griegos

Aristóteles realiza la primera síntesis en la historia sobre el conocimiento del mundo natural en el siglo IV a.n.e. Sintetiza el conocimiento de los filósofos naturales anteriores y los de su época, y hace sus propias aportaciones. En particular, divide el Universo en dos regiones: la región sublunar, que es la región del cambio, para satisfacer las exigencias de la filosofía de Heráclito (540-480 a.n.e.), que fue el primer filósofo que abordó directamente el problema del cambio en la naturaleza y que dictaba que lo fundamental en ella era el cambio y que este constituía la auténtica realidad en el mundo natural; por el otro lado, para satisfacer la filosofía de Parménides (c525-470 a.n.e.), estaba la región supralunar o celeste, externa y rodeando a la anterior, y era la región de la perfección y la inmutabilidad y donde nunca existía el cambio [5].



Aristóteles



El universo aristotélico

El paradigma aristotélico posee las siguientes características:

En el terreno cosmológico: la noción de una Tierra inmóvil en el centro de un Universo finito dividido en las dos grandes regiones mencionadas anteriormente; preeminencia de las figuras circular y esférica como formas perfectas que sigue la naturaleza. El *plenum* aristotélico, que consiste en que el Universo está lleno y no admite el vacío, en la región

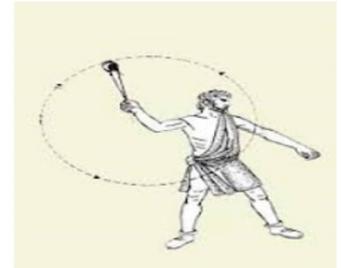
sublunar están los elementos graves (agua y tierra) y los elementos leves (aire y fuego), la región supralunar o celeste está llena de una quinta esencia muy sutil llamada éter; el *horror vacui*, la naturaleza tiene horror al vacío y no permite que este se forme.

En el terreno de la física del movimiento: movimientos naturales y violentos, los primeros, como es el caso de la caída de los graves, se dan de manera natural y no necesitan de un “motor” para ocurrir, los segundos sí necesitan de un “motor” para poder realizarse; la noción de “lugar natural” para todos los cuerpos en el Universo; el estado natural de los cuerpos es el reposo, la permanencia del movimiento es imposible [6].

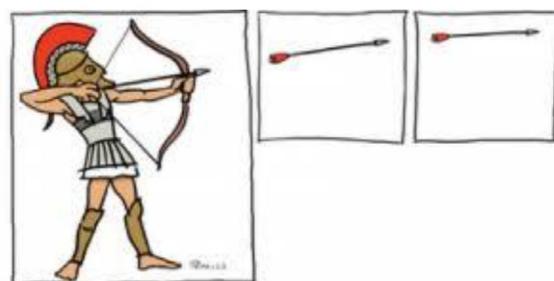
Una actitud epistemológica que es fundamental dentro del paradigma aristotélico es la estricta separación que debía haber entre matemáticas y los fenómenos de la naturaleza (física). Según Aristóteles, la física trata de objetos concretos que tienen materia y forma; las matemáticas son abstracciones. Por lo tanto, no deben ni pueden mezclarse, son géneros diferentes.

Aristóteles estudia el movimiento y el cambio como fenómenos básicos de la naturaleza. Para él existen cuatro tipos de cambio o movimiento en general: substanciales, cualitativos, cuantitativos y locales. A partir de estos cuatro tipos mencionados, al explicar el *movimiento local*, desarrolla su explicación de la caída de los graves y del lanzamiento de proyectiles [7]. Las explicaciones que Aristóteles daba para estos movimientos jamás convencieron a los especialistas; eran anomalías que a la larga constituyeron el telón de fondo que representó el derrumbamiento de la física aristotélica. Estas anomalías permanecie-

ron durante largo tiempo sin provocar una crisis; fueron realizados muchos estudios, ajustes y adecuaciones para conservar los fundamentos del paradigma aristotélico, y siempre fueron considerados dentro del estricto marco de la propia filosofía aristotélica hasta que provocaron una crisis en los siglos XVI y XVII que, junto con las anomalías que se dieron en el terreno de la cosmología, provocaron el derrumbamiento del paradigma aristotélico.



Los cuatro tipos de cambio o movimiento según Aristóteles



Tipo de cambio local

Así, los estudios sobre el *movimiento local* que desarrollaron los eruditos medievales como crítica a las teorías aristotélicas sobre la caída de los cuerpos y el lanzamiento de proyectiles, cobraron una total autonomía y son los que hereda la física clásica de Galileo y Newton, en donde aparece un nuevo paradigma que sustituirá al aristotélico [8].

Críticas a las teorías aristotélicas sobre el movimiento local

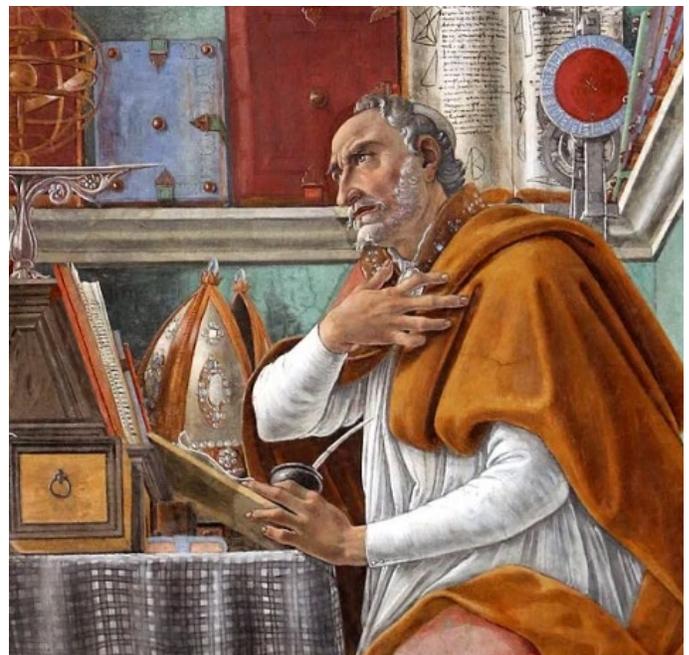
En el lanzamiento de proyectiles, una pregunta que surgía de inmediato era, ¿cómo es que el móvil continúa moviéndose aun cuando ha dejado de estar en contacto con el motor? La explicación aristotélica era que el medio actuaba de motor y era el que mantenía al móvil moviéndose; al mismo tiempo, el medio también ofrecía resistencia al movimiento. Este doble papel del medio era contradictorio y jamás convenció a los especialistas; constituía una anomalía. Y son los fenómenos del lanzamiento de proyectiles y el de la caída de los cuerpos los que fueron estudiados por parte de pensadores del periodo helenístico y los eruditos medievales y constituyeron lo que finalmente sería el derrumbamiento de la física aristotélica [9].

Hiparco (siglo II a.n.e.) introduce el concepto de *vis impressa* (fuerza impresa), según el cual un proyectil se mueve después de haber cesado el contacto con el motor por una fuerza “transmitida” al móvil. Esta fuerza absorbida por el móvil se extingue gradualmente. Algo similar a lo que ocurre al ser calentada una barra de hierro, la cual paulatinamente se enfría al ser retirada del fuego. El calor transmitido a la barra de hierro era considerado como una cualidad, ya que la física aristotélica era una física de cualidades y no era matematizable ni cuantificable. Sin embargo, una diferencia importante entre las teorías de Aristóteles e Hiparco para el movimiento de proyectiles era que para el primero la fuerza que impulsaba al proyectil provenía del propio medio siendo, por lo tanto, externa al proyectil. Para el segundo, la responsable de su movimiento era una fuerza interna “almacenada” en el proyectil.



Hiparco

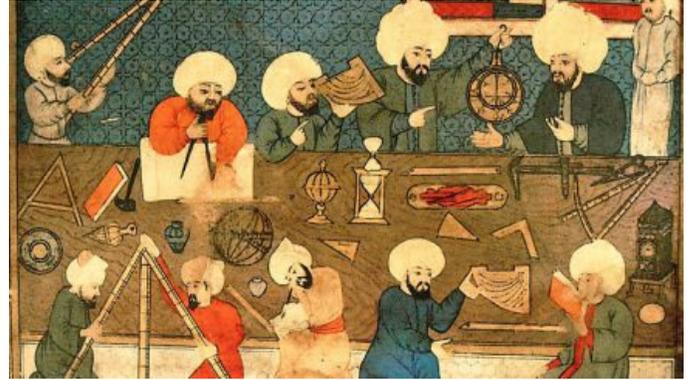
Filopón, en Alejandría, durante el siglo VI, tomó la idea de Hiparco de la *fuerza impressa*, con la diferencia de que el concepto de Hiparco tenía la cualidad de ser “autoextinguible”. La de Filopón solo podía ser “consumida” si el cuerpo se movía en un medio. De ahí se deducía la inexistencia del vacío, pues si este existía, no había nada que consumiera la fuerza que se había impreso en el móvil y este permanecería en movimiento indefinidamente. Esto era imposible, dado uno de los fundamentos del paradigma aristotélico que consideraba que todos los cuerpos tendían al reposo.



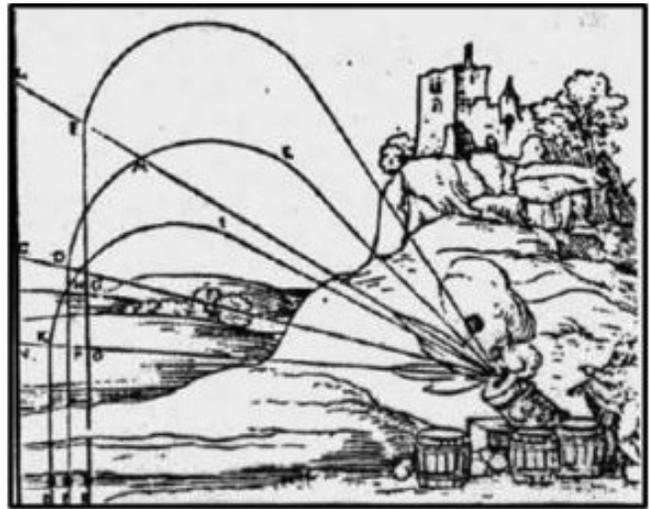
Filopón

Con la caída del Imperio Romano de Occidente en el siglo V, todo el tesoro del conocimiento clásico se traslada a Oriente. Y es en los centros de cultura del mundo musulmán donde se preservó y desarrolló dicho conocimiento, para retornar a Europa alrededor del siglo X. Es con Avicena (980-1037), en Bagdad, donde reaparece el concepto de la *vis impressa* con sus características de ser una cualidad que el motor imprime al móvil y que se extinguirá debido al medio en el cual el cuerpo se mueve, reforzándose la idea de la inexistencia del vacío. Así, por ejemplo, la trayectoria de un proyectil primero seguirá una línea recta ascendente y, después de haber perdido la *fuerza impressa* que le fue transmitida por el motor, describirá una circunferencia, que es la forma perfecta que siguen todos los movimientos de manera natural, para finalmente caer verticalmente debido a la cualidad de pesantez que caracteriza a los cuerpos graves. Durante todo este periodo de la historia, los estudios fueron hechos dentro del estricto marco del paradigma aristotélico y así continuarían hasta la revolución científica de los siglos XVI y XVII.

Continuadores de la obra de Avicena son Avempace (1085-1138) y Averroes (1126-1198) en la España musulmana. Es la época en que el saber de la Antigüedad clásica, conservado y desarrollado por la cultura árabe, comienza a ser recuperado por el Occidente europeo. Aparecen las escuelas catedráticas, que son el antecedente inmediato de las primeras universidades. Una característica de este proceso es que reaparece un interés por el estudio de las matemáticas y los fenómenos de la naturaleza. Comienza a debilitarse la estricta separación que dictaba la filosofía aristotélica de no mezclar los géneros de las matemáticas y la física.



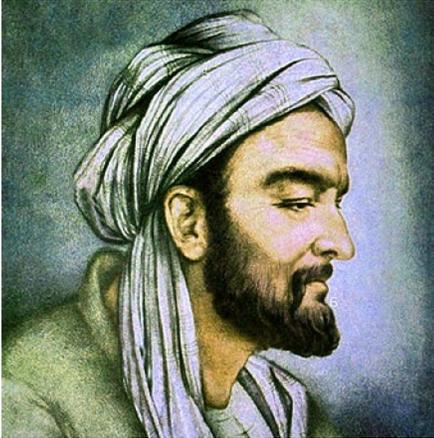
Eruditos musulmanes



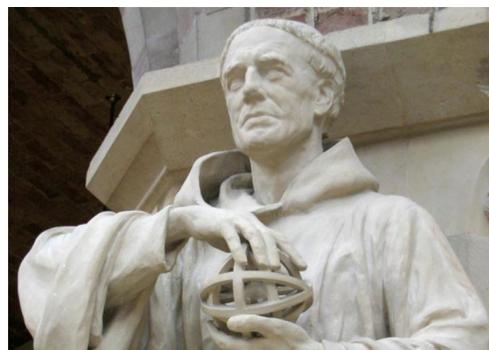
Trayectoria de un proyectil

En la Universidad de Oxford están Robert Grosseteste (1175-1253), Roger Bacon (1214-1294) y William de Ockham (1287-1347). En esta misma tradición hay que ubicar a los eruditos del Merton College, también en la Universidad de Oxford, así como a pensadores de la Universidad de París, como Jean Buridan (1300-1358), Alberto Magno (1316-1390) y Nicole de Oresme (1323-1382). Aquí, se continuará con la actitud epistemológica de ir disolviendo las barreras entre la física y las matemáticas impuestas por la filosofía aristotélica [10].

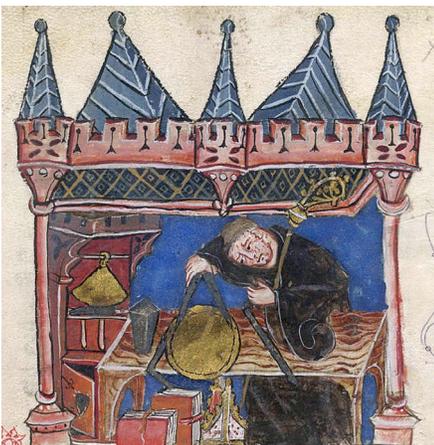
En la Universidad de París adoptan la teoría de la *vis impressa*, pero ahora con el nombre de *virtus motiva* o *impetus*. Esta tiene una naturaleza permanente y es proporcional a



Avicena, Avempace y Averroes



Grosseteste, Bacon y Ockham



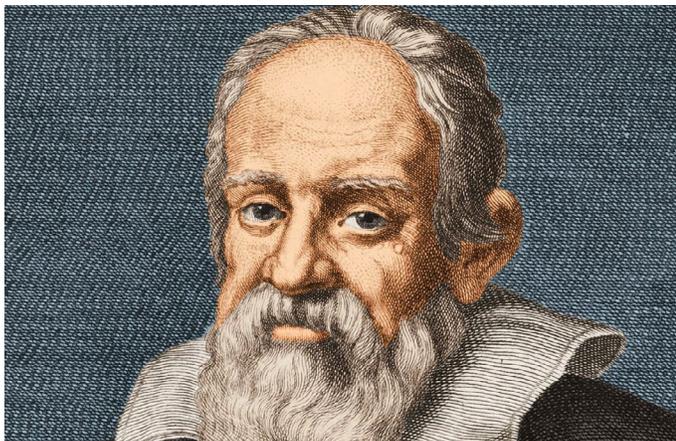
Los Calculadores
del Merton College

la cantidad de materia del cuerpo (a través de la cualidad aristotélica de gravedad) y a la velocidad que adquiere su movimiento (siempre en términos cualitativos, todavía no hay una cuantificación). Una piedra lanzada adquirirá más *impetus* que una hoja y viajará más lejos. (Aquí se tiene el origen de lo que en la física newtoniana será la cantidad de movimiento, $p=mv$).

Al final del siglo XIV, una versión de la teoría del *impetus*, similar a la expuesta por Buridan y Oresme, había reemplazado a la defectuosa explicación aristotélica del lanzamiento de proyectiles en prácticamente todas las obras científicas medievales. Galileo (1564-1642) la aprendió en Pisa de su maestro Bonamico y en sus primeros estudios adopta la teoría del *impetus* dentro de un marco aristotélico de *cualidades*, llegando a un callejón sin salida, y sale de él utilizando la hidrostática arquimediana, que es una física *cuantitativa*. Galileo se percata de la asombrosa concordancia que existe entre las matemáticas y los fenómenos de la naturaleza y funda la epistemología de la física moderna al aplicar todos los estudios sobre el movimiento, que eran *ejercicios lógicos* realizados por los eruditos de Oxford y París, a fenómenos que ocurren en la naturaleza como la caída libre y el



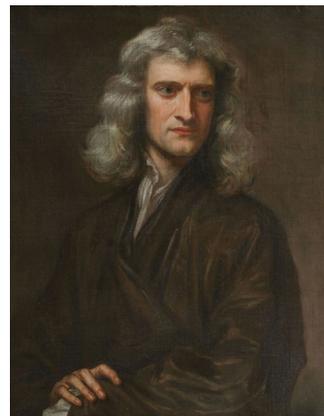
Buridan, Alberto Magno y Oresme



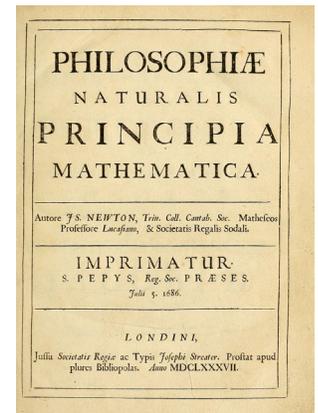
Galileo

lanzamiento de proyectiles. La Revolución Científica de los siglos XVI y XVII culmina con la gran obra de Newton (1642-1727), donde el paradigma aristotélico ha sido substituido por el newtoniano. Como resultado de este periodo crucial en la historia del conocimiento científico se sustituye el modelo cosmológico geocéntrico por el heliocéntrico, la física aristotélica es sustituida por la física galileana, que más tarde alcanzará su culminación con la gran síntesis newtoniana. Además, el espacio físico (cualquier cosa que esto sea) es substituido por el espacio euclidiano; se construyó el principio de inercia; los cuerpos físicos fueron substituidos por los objetos geométricos y se cumplió el sueño pitagórico de encontrar regularidades matemáticas en la naturaleza. Sueño que había sido continuado por

Platón y Arquímedes y fue interrumpido por la doctrina aristotélica de no mezclar la física con las matemáticas.



Newton y Los Principia



La cantidad de movimiento de Newton

Es en su obra *Philosophia naturalis principia mathematica*, conocida como Los Principia, donde Newton define los conceptos de cantidad de materia, cantidad de movimiento y fuerza ínsita, y enuncia sus tres leyes del movimiento, pilares de la física clásica [11]:

“La cantidad de materia es la medida de la misma originada de su densidad y volumen conjuntamente”.

“La cantidad de movimiento es la medida del mismo obtenida de la velocidad y de la cantidad de materia conjuntamente”.

“La fuerza ínsita de la materia es una capacidad de resistir por la que cualquier cuerpo, por cuanto de él depende, persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo”.

“El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime”.

Ya no es el concepto de *vis impressa* propuesto por Hiparco como una *qualidad* transmitida al móvil por el motor y que era autoextinguible, ni tampoco una *qualidad* que era consumida si el móvil se movía en un medio. Ahora existe el vacío y el movimiento se puede conservar indefinidamente, el movimiento mismo ya no es un proceso, sino un estado y la cantidad de movimiento está perfectamente matematisada. Incluso en la segunda ley de Newton aparece el carácter vectorial de la cantidad de movimiento ($F=dp/dt$).

Ahora bien, hay un gran paso entre el *impetus* medieval, que todavía se maneja a finales del siglo XVI y principios del XVII y la cantidad de movimiento de *Los Principia* de Newton que se publica en 1687. La cantidad de movimiento es el producto de la masa m por la velocidad v . Así, se tiene el concepto moderno de cantidad de movimiento, momento lineal o ímpetu ($p=mv$).

La física newtoniana es una de las grandes obras del pensamiento científico y sus logros son impresionantes. Sin embargo, una de las más sorprendentes características de la historia de la física es la confusión que rodea a la definición de la masa, que es el término clave de la dinámica moderna.

Newton introduce, al inicio de los *Principia*, la antigua noción de “cantidad de materia” para referirse a la masa. Incluso, en su definición de “cantidad de materia”, se ha señalado la circularidad entre “masa”, “densidad” y “volumen”. Más adelante, también en los *Principia*, Newton define la masa como la *vis insita* o inercia, que es “una capacidad de resistir por la que cualquier cuerpo, por cuanto de él depende, persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo”.

Los términos “cantidad de materia” y “masa” permanecen, en general, como sinónimos desde los tiempos de Newton hasta finales del siglo XIX. No obstante, “cantidad de materia” representaba tres significados completamente diferentes en la física del siglo XVIII. Euler (1707-1783) identificó masa (y cantidad de materia) con “cantidad de inercia”. Luego se tiene la masa gravitacional, que tiene que ver con la acción gravitacional de un cuerpo con otros, que para propósitos puramente instrumentales se plantea la equivalencia entre los dos conceptos, masa inercial y masa gravitacional, pero eso no resuelve el problema sobre la definición fundamental del concepto de masa. Es una característica puramente accidental que dos *qualidades* diferentes de materia, inercia y carga gravitacional, conduzcan a la misma “cuantificación”.

En el siglo XVIII, el periodo de la concepción substancial de la materia, los términos “masa” y “materia” fueron prácticamente idénticos y la resistencia de la materia a la presión, su solidez e impenetrabilidad, fueron usualmente consideradas como *qualidades* sensoriales y directamente observables de “masa”.

A mediados del siglo XIX el consenso newtoniano acerca de masa había sido remplazado por muchas definiciones. Es muy criticado como inconsistente que el término “masa” signifique un cuerpo, la propiedad de un cuerpo y un número. Es muy difícil imaginar categorías tan contrastantes como los de objeto, propiedad y número. Alrededor de 1960, la masa se había fragmentado en otras direcciones, como masa inercial, masa gravitacional y masa gravitacional pasiva.

Respecto al punto de su apariencia metafísica. “La masa puede ser comparada con un actor que aparece sobre el escenario con diversos disfraces, pero nunca como su verdadero ser [...] Puede aparecer en el papel de la carga gravitacional, o en el de la inercia, o en el de la energía, pero en ninguna parte la masa se presenta a los sentidos como ella misma, sin adornos”.¹

Los modernos físicos pueden estar legítimamente orgullosos de sus espectaculares logros en la ciencia y en la tecnología. No obstante, siempre deberían estar conscientes de que los fundamentos de su imponente edificio, las nociones básicas de su disciplina, tales como el concepto de masa, presentan serias incertidumbres y perplejas dificultades que todavía no han sido resueltas. Pero esta obscuridad que rodea al concepto de masa no impide el enorme éxito de la física newtoniana. En la bibliografía se presentan varios textos en donde se discute y analiza en profundidad el problema de la definición del concepto de masa [12].

Para concluir este trabajo, y continuando con el modelo de desarrollo del conocimiento científico planteado por Thomas S. Kuhn, se tiene que, a partir de la Revolución Científica de los siglos XVI y XVII, tiene vigencia el paradigma newtoniano, el cual tiene logros impresionantes durante todo el siglo XIX, al final del cual, con el surgimiento de la mecánica cuántica y la relatividad einsteiniana, aparecen nuevos paradigmas, que, hasta el momento y de manera notable, no han sustituido al paradigma newtoniano, sino que cada uno opera en su ámbito de aplicación.

Referencias

1. T. S. Kuhn, La estructura de las revoluciones científicas, 2ª edición, Fondo de Cultura Económica, México (2004).
2. A. R. Pérez Ransanz, Kuhn y el cambio científico, Fondo de Cultura Económica, México (1999) p. 35.
3. Ibid. p. 43.
4. W.K.C. Guthrie, Los filósofos griegos. De Tales a Aristóteles, FCE, México (1982).
5. A. Koestler, Los Sonámbulos, CONACyT, México (1981).
6. Aristóteles, Física, Ed. Gredos, Madrid (2008).
7. D. Ross, Aristotle's Physics, Clarendon Press, Oxford (1979).
8. A. Beltrán Marí, Galileo, ciencia y religión, Ediciones Paidós Ibérica, Barcelona (2001).
9. A. Koyré, Estudios galileanos, Editorial Siglo XXI, México (1982).
10. J. Jolivet, Historia de la filosofía, vol. 4, Siglo XXI Editores, México (1981).
11. I. Newton, Principios matemáticos de la filosofía natural, Alianza, Madrid (1987).
12. M. Jammer, Concepts of Mass in Classical and Modern Physics, Dover Publications, Inc., New York (1997); J. Roche, “What is mass?”, European Journal of Physics, 26, 225-42 (2005); G. B. Brown, “Gravitational and inertial mass”, American Journal Physics, 28, 475-83 (1960); E. Mach, Desarrollo Histórico-Crítico de la Mecánica, Espasa Calpe Argentina, S.A., Buenos Aires (1949).

¹ Herbert L. Jackson, “Presentation of the concept of mass to beginning physics student”, American Journal of Physics, 27, 278 (1959).