

# Evolución histórica del concepto fuerza



J. M. Rivera-Juárez<sup>1</sup>, J. Madrigal-Melchor<sup>1</sup>, E. Cabrera-Muruato<sup>2</sup>,  
C. Mercado<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas, Calzada  
Solidaridad esq. Paseo a la Bufa s/n, CP 98060, Zacatecas, México.

<sup>2</sup>Unidad Académica Preparatoria, Universidad Autónoma de Zacatecas.

E-mail: jmadrigal.melchor@fisica.uaz.edu.mx

(Recibido el 19 de Junio de 2014, aceptado el 25 de Noviembre de 2014)

## Resumen

La fuerza es uno de los primeros conceptos no matemáticos ubicados en los libros, el concepto abstracto de fuerza fue la noción de "divinidad" planteada en el antiguo Egipto. En la ciencia Griega se esbozaron los primeros conceptos de Física, una Física más relacionada con la esencia y naturaleza de las cosas que con la descripción cuantitativa precisa. En este contexto se plantea el concepto "tradicional" de fuerza entendida como la causa del movimiento, de la velocidad de los cuerpos—las fuerzas son necesarias para mantener el movimiento, son causa del movimiento. En este trabajo se podrá apreciar la evolución del concepto fuerza desde Aristóteles pasando por Copérnico, Gilbert, Kepler hasta Galileo, esto es, en los albores de la revolución científica copernicana, pasando de la concepción tradicional de fuerza entendida como un espíritu que anima a los cuerpos, hasta la interpretación esencialmente relacional. En un segundo trabajo se continuará con los planteamientos de Descartes hasta llegar a Newton, con lo que pretendemos completar lo que se ha dado en llamar la síntesis newtoniana.

**Palabras clave:** Historia de la Ciencia, fuerza, Física.

## Abstract

Force is one of the first non-mathematical concepts located in the books, the abstract concept of force was the notion of "divinity" raised in ancient Egypt. In the Greek science outline the first concept of physics, physically more related to the essence and nature of things that the precise quantitative description. In this context the "traditional" concept of force seen as the cause of motion, speed of bodies—the forces are needed to keep moving, which are the cause of movement. In this work we will appreciate the evolution of force concept from Aristoteles passing by Copernic, Gilbert, Kepler to Galileo *i.e.*, at the dawn of the Copernican scientific revolution, moving from the traditional conception of force understood as a spirit that animates the bodies, to the essentially relational interpretation. In a second work will continue with the ideas of Descartes up to Newton, which we intend to complete what has been called the Newtonian synthesis.

**Keywords:** History of Science, force, Physics.

**PACS:** 01.65.+g, 01.40.-d

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

Recientemente existe el consenso de que la comprensión de conceptos y teorías Físicas exigen conocer no solo las definiciones actuales sino también el contexto de indagación donde se construyeron y desarrollaron [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. La estructura de la ciencia, la naturaleza de la metodología científica y la validación de los juicios de los científicos, son algunos de los aspectos en los que la historia y la filosofía de la ciencia en general, y de la Física en particular, pueden representar un componente de alta motivación en el binomio aprendizaje—enseñanza de las ciencias. Para diversos autores [8] es importante hacer un paralelismo entre las ideas históricas de fuerza y las correspondientes ideas de los alumnos, pues ello puede arrojar luz sobre diversos obstáculos epistemológicos en el aprendizaje de la mecánica clásica. Al respecto otros autores han mostrado

cómo el concepto de fuerza contribuye a fortalecer los conceptos de la Mecánica [9].

En la parte correspondiente a la enseñanza se estima que, conocer el desarrollo de las ideas que dieron lugar al modelo científico actual puede aportar información importante para el diseño de las unidades didácticas correspondientes al área [10].

Parece evidente que no se puede producir ningún cambio, movimiento o actividad en un objeto dado, sin una causa que lo genere, esto es, sin una fuerza que sea la responsable. Desde la antigüedad las personas han tratado de comprender la naturaleza y los fenómenos que en ella se observan: el paso de las estaciones, el movimiento de los cuerpos y de los astros entre otros. Las primeras explicaciones se basaron en consideraciones filosóficas y sin realizar verificaciones experimentales, concepto este inexistente en ese tiempo—los griegos destacaron en el

campo de la Física especulativa. Sin embargo, a la experimentación no le dieron tanta importancia, pues estimaban que la actividad Física era indigna de hombres libres, y sólo propia de esclavos. Por tal motivo algunas interpretaciones “falsas”, como la realizada por Ptolomeo: “La Tierra está en el centro del Universo y alrededor de ella giran los astros”, perduró cientos de años.

La historia de la Física está llena de grandes científicos como Galileo, Newton o Einstein, entre otros, cuyas contribuciones han sido decisivas para el desarrollo de la ciencia en general, y de la Física en particular, pero también de un número muy grande de científicos cuyos nombres no son renombrados.

La historia misma muestra que el progreso de la Física no es el producto de la genialidad aislada que cambió el curso de la ciencia. Hay muchos ejemplos que confirman que la evolución de las ideas de la Física y la aparición de nuevas teorías no es una sucesión de obras debidas a genios pasando por alto el papel de la colectividad en su proceso.

Los conceptos y teorías científicas no emergieron milagrosamente sino que son el resultado de un proceso muy difícil de resolución de problemas y de contrastación rigurosa de hipótesis [11]. Lo más importante es mostrar a la ciencia como el resultado de una construcción colectiva humana.

Desde esta perspectiva en este trabajo vamos a recorrer a grandes pasos la historia del pensamiento, para mostrar algunos modos de caracterización de la fuerza poniendo de manifiesto en la medida de las limitaciones las dificultades de comprensión semántica de esta palabra y concepto que es fundamental para entender las interacciones en el universo.

## II. LA CONCEPCIÓN DE FUERZA EN LA ÉPOCA PREFILOSÓFICA

En la mentalidad del hombre primitivo se aprecia que el concepto fuerza tiene un uso pragmático y genuino. Para ellos, no solo la naturaleza es un conjunto de fuerzas y poderes, sino que el hechicero es capaz de modificarlas y controlar la realidad por medio de las fuerzas del hechizo.

El término fuerza sirve así, entre los pueblos primitivos, para designar tanto a los influjos invisibles como a la actividad o poderes de la naturaleza. Esta concepción la describe Casini [12] de la siguiente forma:

*“La noción de naturaleza es, en su origen, una proyección antropomórfica en la que se mezclan impulsos e instintos irracionales; es el caso de innumerables personificaciones o deificaciones de fuerzas naturales, características de las religiones primitivas, la magia, las leyendas o mitos que atribuyen el origen del mundo o un “nacimiento” o una “creación” más o menos próxima a las formas de la generación o la acción humana... La naturaleza es una fuerza creadora, animada, inventora incesante de formas”.*

## III. CONCEPCIÓN GRIEGA DEL CONCEPTO FUERZA

Fue la civilización griega la primera que dio el paso a la creación consciente de sistemas de pensamiento que presentaban una visión general del mundo, la naturaleza del hombre, la vida y el propio pensamiento. Ellos fueron los primeros en indagar sistemáticamente y crear conceptos claves para la interpretación de los fenómenos de la naturaleza.

Esta concepción del universo dotada de irregularidades, leyes factibles al descubrimiento por el pensamiento humano, es el germen de la ciencia y constituye una de las más importantes aportaciones.

En la siguiente subsección hablaremos del más grande científico de los griegos.

### A. Aristóteles

Aristóteles es el filósofo más representativo de este periodo, sus ideas dominaron aproximadamente 18 siglos el campo de las ciencias. En lo que respecta a la Física a estos juicios filosóficos se les ha denominado “Física del sentido común”, dado que coinciden en mucho con los razonamientos espontáneos que suelen realizar muchas de las personas con o sin formación académica.

La cosmovisión de Aristóteles resultó satisfactoria y fácilmente entendible para quienes vivían en una sociedad estática y fuertemente jerarquizada, lo que explica la enorme influencia y larga duración del pensamiento aristotélico durante la Edad Media y parte del Renacimiento. Una vez establecidas las condiciones que aseguraban la primacía de la Iglesia como la única fuerza política y espiritual del mundo occidental, hubo reconciliación entre la teología judeo-cristiana y las ciencias paganas transmitidas por las obras aristotélicas. La complementación fue muy adecuada, ya que Aristóteles dejó una descripción del mundo muy completa, pero sin una cosmogonía, mientras que las Santas Escrituras presentaban una cosmogonía precisa [13].

En este contexto, se planteó el concepto “tradicional” de fuerza, entendida como la causa del movimiento, de la velocidad de los cuerpos—las fuerzas son necesarias para mantener el movimiento, son causa del movimiento. Según esta concepción “*para que un cuerpo permanezca en movimiento habría que hacerle fuerza y cuando se dejara de hacer fuerza, el cuerpo se pararía*”.

Aristóteles clasifica los movimientos en “naturales” y “violentos”, los segundos se producen contradiciendo la tendencia del cuerpo a buscar su lugar natural. Qué los cuerpos “pesados” caigan “naturalmente” quiere decir que tienen en sí mismo el origen de tal movimiento; la causa eficiente y final está en ellos, por lo tanto sin que se necesite, una causa externa eficiente para moverlos; no como debe ocurrir para los movimientos forzados. Plantea que tenga o no, en sí mismo el motor (o principio) del movimiento, es siempre cierto que “todo ser que se mueve es necesariamente movido por una causa”. De este principio se deduce, según Aristóteles, la existencia de una cosa que

sea el motor. La fuerza parece residir en el interior del objeto que se mueve, es decir, esta concepción sugiere que la fuerza está en el interior del objeto o es una propiedad del mismo.

Esta concepción del concepto fuerza se ve reflejada en los planteamientos de Copérnico, Kepler, Buridan, entre otros. Por ejemplo, Copérnico plantea lo siguiente:

*“Yo creo que la gravedad no es sino una cierta tendencia natural, ínsita en las partes por la divina providencia del hacedor del universo, para conferirle la unidad e integridad, juntándose en forma de globo. Este modo de ser es también atribuible al Sol, la Luna y los demás fulgurantes entre los errantes, para que, por su eficacia, permanezcan en la redondez con la que se presentan, las cuales sin embargo, realizan sus circuitos de muchos modos diferentes”* [14].

Como consecuencia hay para Aristóteles dos tipos de fuerzas o potencias:

- 1) la fuerza inherente a la sustancia, a la que él llama *natura* (*physis*) por la que una cosa puede pasar a otro estado, capacidad de auto-actividad.
- 2) La fuerza o poder que tiene una sustancia de producir cambios o movimientos en otra.

Según Aristóteles, la acción de una fuerza sobre un cuerpo debe darse por contacto directo; no encontró la respuesta a como una acción puede ser ejercida a distancia: la experiencia de la época se refería a halar o empujar cuerpos. El enfrentarse al problema de: qué fuerza está en contacto con un cuerpo que cae libremente, le causó particular dificultades, pues no podía ser la fuerza de gravedad, como hoy la llamamos ni la atracción del lugar natural, ya que eso implicaba acción a distancia. Aristóteles concluyó que lo que le había dado origen al cuerpo, le dió también la tendencia a caer, concluyendo que la causa de la caída es intrínseca al cuerpo.

Para Aristóteles, la causa del movimiento de un cuerpo separado de su motor (movimiento de proyectiles) requiere una explicación, ya que, es difícil de entender porque continúa en movimiento después de haber sido liberado. De ahí que en la teoría aristotélica haya una argumentación muy complicada implicando movimientos del aire alrededor del proyectil, es decir, una causa que en este caso es externa al objeto.

El astrónomo Hiparco de Nicea, en desacuerdo con la dinámica aristotélica del movimiento de proyectiles, explica la situación de post-lanzamiento de un proyectil de una manera totalmente diferente a la teoría aristotélica. Para él, el movimiento se da por medio de una fuerza, transmitida, al proyectil por el proyector. Esta fuerza absorbida por el proyectil, se extingue gradualmente a medida que el proyectil se mueve, le llamó *fuerza impresa* [15].

La noción de *fuerza impresa* trae consigo un elemento nuevo en las consideraciones sobre fuerza y movimiento.

Mientras que para Aristóteles la fuerza que impulsa un proyectil proviene del propio medio, siendo por lo tanto externa a él, para Hiparco la fuerza responsable de su movimiento es una fuerza interna “almacenada” en el proyectil.

Filopón parece que fue el primero en demostrar en

oposición a Aristóteles que el medio no podía ser la causa del movimiento en el caso del proyectil. Si realmente es el aire el que transporta la piedra o la flecha, preguntábase ¿debe la mano tocar la piedra? o ¿la flecha debe colocarse en el arco? ¿Por qué el abatir violento del aire no mueve la piedra? Así, Filopón propuso como alternativa la idea original de que, el proyector imprimía poder motor no al aire, sino al mismo proyectil, es decir, argumenta a favor de una fuerza impresa al proyectil por el proyector.

Filopón intento expresar la fuerza cuantitativamente, diciendo que los cuerpos movidos por una fuerza determinada se trasladarían con velocidad inversamente proporcional a sus pesos y que los cuerpos que se movían a una velocidad determinada recorrerían, contra la resistencia del aire, distancias directamente proporcionales a sus pesos.

Esta concepción de *fuerza impresa* tiene un interesante desarrollo histórico. Fue un elemento fundamental en discusiones que se establecieron, principalmente a partir del siglo XII, sobre la existencia o no del vacío y de todo tipo de consecuencia que viene del posible movimiento de un proyectil en un medio sin resistencia. Parece también haberse convertido en un importante punto de referencia para la teoría del ímpetu de Buridan, en el siglo XIV.

También Galileo en sus primeros estudios sobre el movimiento de proyectiles, hizo uso del concepto de *fuerza impresa* [16].

Las ideas revolucionarias de Hiparco y Filopón se pueden considerar como los primeros esbozos de una teoría alternativa a los planteamientos aristotélicos sobre el movimiento de proyectiles, que luego fue desarrollada en otro tiempo y otro lugar.

#### IV. RENACIMIENTO

En el renacimiento las creencias en la magia, la brujería y la resurrección estuvieron más extendidas que en la edad media [17], por lo que la creencia y desarrollo de las ciencias se vio fuertemente afectada. Es debido a esto que se dice que en esta época se destruyeron la Física, la Metafísica y la ontología aristotélica, por lo cual el Renacimiento se encontró sin Física y sin ontología, es decir, sin posibilidad de decidir con anticipación si algo es posible o no.

Una vez que esta ontología es destruida y antes de que una nueva (que no se elabora hasta el siglo XVII) haya sido establecida, no hay ningún criterio que permita decidir si la información que se recibe de tal o cual “hecho” es verdadera o no. De ello, resulta una credulidad sin límites [18], por lo que se tenían una serie de contradicciones.

El hombre del renacimiento reconoce el mundo como su medio propio, y su actitud hacia él le llevará a investigar la naturaleza para alcanzar sus fines humanos. La magia, la filosofía de la naturaleza y la ciencia van a ir confluyendo a este fin, cada una desde su punto de partida y perspectiva propia.

Dentro de esta etapa existieron diferentes opositores a estas creencias, entre los que figuran Nicolas Copérnico, William Gilbert, Johannes Kepler y Galileo Galilei, entre

otros. De las contribuciones de estos cuatro al concepto de fuerza hablaremos en las siguientes subsecciones.

### A. Nicolás Copérnico

La figura de Nicolás Copérnico [19] (1473-1543) puede servir como modelo de la doble vertiente por el que se transcurre el trabajo de los científicos en el siglo XVI. Por una parte, los numerosos cálculos registrados, el método seguido y la libertad de pensamiento (al margen de las limitaciones propias en cada momento histórico), nos colocan ante la obra de un científico de acuerdo a la concepción de hacer ciencia en la esta época del pensamiento, rompiendo así el paradigma existente hasta ese entonces.

La obra de Copérnico es reducida, prácticamente consta de un tema, plasmado en un tratado capital, *De Revolutionibus orbium caelestium, libri sex* (1543) [20].

Otros pequeños escritos son resúmenes del mismo tema o poco relevantes en comparación con su magistral publicación.

Como es bien conocido, la pretensión de Copérnico consistió en asentar la hipótesis heliocéntrica como explicación del universo. La idea es sencilla, poniendo al Sol en reposo en el centro del universo y haciendo girar a la Tierra a su alrededor, junto con los restantes planetas; con esta Teoría se salvaban matemáticamente los movimientos aparentemente irregulares de los cielos.

Con Copérnico y Kepler llega una nueva era en la visión del universo que desplaza su centro de la Tierra al Sol, rompiendo así con el geocentrismo. A pesar de este cambio de rumbo, las ideas platónicas están todavía latentes en estos autores [21].

En sintonía con esa visión mística del mundo, Copérnico en *De revolutionibus* expresa lo siguiente para exponer la importancia que otorga al Sol en el universo:

*“En este bellissimo templo, ¿quién pondría a esta lámpara en una posición diferente, no mejor que aquella desde la cual puede iluminar todas las cosas al mismo tiempo? Pues no sin razón llaman algunos al Sol el faro del universo, otros su mente y otros su gobernador”* [22].

Para Copérnico el movimiento de los astros no necesitaba ninguna causa, al tratarse para él de movimientos naturales y, por ello nunca llegó a tener la necesidad de concebir que los astros se afectaran unos a otros por medio del mecanismo al que se le denominaba gravedad [23, 24].

Hasta entonces, los aristotélicos nunca habían concedido la gravedad como una acción ejercida a distancia porque creían que un cuerpo no puede ejercer ninguna influencia sobre otro si no es por contacto con él. Por ello, en vez de un efecto atractivo, prefieren explicar la gravedad como un deseo que los empuja hacia su lugar natural.

Uno de los argumentos a la hora de combatir la teoría heliocéntrica de Copérnico se basaba en la visión aristotélica del movimiento. Según esta visión, el estado natural de los cuerpos era el reposo.

En los planteamientos anteriores se puede apreciar en Copérnico la influencia de la concepción tradicional de la fuerza, puede decirse que a diferencia de Kepler (como se

describe más adelante), Copérnico no traspasa los límites entre la ciencia escolástica y la moderna.

### B. William Gilbert

Gilbert fue un partidario entusiasta del sistema copernicano del mundo y esperaba que las fuerzas que mantienen a los planetas en su movimiento orbital en torno al Sol pudieran ser explicadas como el resultado de la atracción magnética.

Ya en 1600, Gilbert, seguido muy pronto por Kepler, reduce la pesantés a la atracción. Y Galileo, sin duda, comparte esta convicción. Pero la atracción gilbertiana es un alma; y la de Kepler después de haber dejado de ser una alma, sigue siendo una fuerza dirigida hacia el objeto, es decir, algo más misterioso todavía.

Sin embargo, Galileo no adoptará nunca las teorías de Gilbert; ni intentará nunca utilizar la noción gilbertiana de atracción para formular la teoría de la caída de los cuerpos.

Esto tiene fácil explicación: la Física de Gilbert es animista, es decir, no es matemática ni matematizable, y nadie antes de Newton, ni siquiera Kepler, sabrá matematizar la atracción.

Es muy importante resaltar que la contribución más importante de Gilbert del concepto de fuerza la realizó en los fenómenos magnéticos y eléctricos, lo que le permitió definir el término fuerza eléctrica, relacionándolo con el fenómeno de atracción que se producía al frotar ciertas distancias [25].

La obra de Gilbert, *De Magnete* [26], que hacía de la Tierra un imán, y explicaba la caída por la atracción terrestre, tuvo gran repercusión, y desempeñó un papel de primer orden en la evolución y transformación de las concepciones Físicas. Por ello será muy alabado por Galileo, y seguido por Kepler, Gassendi y Newton. Sin duda, la concepción que Gilbert tenía de la atracción (fuerza maravillosa y comparable al alma, que tenía su fuente en el éter) era contraria al espíritu de la nueva ciencia, y por lo tanto, inutilizable por Galileo y Descartes. Pero justamente a eso se encaminarán los esfuerzos de Gassendi y Newton: a transformar la atracción gilbertiana en una fuerza no dirigida hacia su objeto.

En el *“De Magnete”* 1 cual es publicado en 1600, y a pesar de ser el primer tratado científico importante en la historia inglesa, que a vez es un hito decisivo en la revolución científica, Gilbert no logra distanciarse de la mentalidad renacentista.

### C. Johannes Kepler

Puede decirse que con Kepler el concepto de fuerza traspasa el límite que separa la ciencia renacentista de la moderna.

En su *“Mysterium cosmographicum”*, publicado en 1596, se aprecia su adherencia a la concepción tradicional de la fuerza entendida como un espíritu que anima los cuerpos celestes y dirige sus movimientos [27].

En 1605 concibe la naturaleza universal de la fuerza gravitacional y habla de la gravedad como una “posibilidad” más que como una actividad, acercándose así a una concepción más funcional de esta noción [28].

En 1608 describe claramente la fuerza de atracción ejercida por la Tierra sobre una piedra como una línea o cadena magnética [29], coincidiendo con la concepción de gravedad como emanación magnética expuesta por Gilbert.

En la “*Astronomia Nova*” de 1609, que es el primer gran tratado revolucionario sobre astronomía después del “*De Revolutionibus*” de Copérnico, uno de los principales problemas es la búsqueda de una explicación dinámica del movimiento planetario. La fuerza es aún para Kepler una “facultad animadora” según sus propias palabras, ya que no dispone de un término más apropiado para expresar la inmaterialidad de su esencia.

Kepler propone dos innovaciones radicales.

Primeramente afirma que los planetas se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol; y en segundo lugar constata que la velocidad de los planetas alrededor de sus órbitas no es uniforme. Con estas dos contribuciones Kepler, se ve en la necesidad de proponer la existencia de una fuerza reguladora que explique la variación del valor de la velocidad.

En una segunda edición del “*Mysterium cosmographicum*” en 1621, se va a señalar claramente en una nota la necesidad de sustituir la palabra “alma” por la palabra “fuerza” para entender los principios constitutivos de la Física celeste, la cual textualmente dice lo siguiente:

*“En una ocasión yo creía firmemente que la fuerza origen de un planeta residía en el alma. Sin embargo cuando reflexione que esta causa del movimiento disminuía en proporción a la distancia, del mismo modo que la luz del Sol disminuye en proporción a la distancia de este astro, llegué a la conclusión de que esta fuerza debe ser sustancial; no en el sentido literal, sino... de la misma manera que decimos que la luz es algo sustancial significando que es una entidad “no espiritual” que emana de un cuerpo sustancial” [27].*

Como se puede apreciar con Kepler el concepto de fuerza empieza a ser un concepto relacional. Como se explicita en el párrafo anterior, relaciona la variación de la distancia con la variación de la velocidad.

Esta nueva concepción del concepto fuerza, Cassirer [30], la expresa de la siguiente forma:

*“Este criterio de la relatividad viene a desplazar y desarraigar definitivamente la idea del animismo. Desaparecen las fuerzas “interiores” de la Metafísica: ninguna fuerza corresponde ya a un solo “sujeto” de por sí, sino que todas ellas contienen ya, por definición, la relación necesaria con un segundo elemento “externo”. El concepto de relación obliga al concepto de fuerza, por decirlo así, a salir de sí mismo y a engendrarse en una proporción matemática pura. Esto hace que el problema y el interés se desplacen del concepto de fuerza a la ley de fuerza: se plantea aquí por primera vez el problema de encontrar la regla numérica según la cual varía la gravedad con la distancia del centro” [30].*

Así, al iniciarse el Siglo XVII con Kepler, se pasa de una concepción fundamentalmente platónica del concepto de fuerza, a una interpretación esencialmente relacional.

Durante la primera mitad del Siglo XVII, la concepción kepleriana de la mutua fuerza de atracción entre los cuerpos

celestes se difundió lentamente por Europa. Mersenne fue el primero en aceptar la idea, después lo hicieron Pascal, Roberval y Fermat.

## **D. Galileo Galilei**

Galileo es un personaje clave en la historia de la ciencia, y por ello muchos conceptos y contenidos teóricos tienen en él especial significación y trascendencia. El concepto de fuerza es sin duda uno de ellos.

No hay duda de que en Galileo, al igual que en muchos otros, se da una confluencia entre la tradición platónica y la tradición aristotélica. Esto, entre otras razones, hace que la nomenclatura con la que Galileo intenta controlar esa realidad tan escurridiza y a la vez tan patente de lo que entendemos como fuerza sea, vaga, ambigua y múltiple.

Dugan [31], historiador de la ciencia, señala que Galileo ha sido primeramente influenciado por la escolástica, llevando sus primeras obras indiscutiblemente esta huella.

Debido a esta influencia la fuerza es entendida en la primera etapa del pensamiento de Galileo (periodo aristotélico) como una presión o una transición que mueve al cuerpo en la dirección contraria a aquella en que se movería por el movimiento natural.

En unos manuscritos bajo el nombre de “*De motu antiquiora*” [32] fruto de las investigaciones mecánicas realizadas por Galileo entre 1589 y 1592, se refleja claramente la influencia de la obra “*Diversarum speculatioarum mathematicarum et physicarum liber*” de Benedetti; lo que lo lleva a formalizar matemáticamente sus concepciones. La importancia del elemento matemático que capta de esta obra, unido a la influencia de la lectura de Arquímedes, lo obligan a una constante revisión de sus ideas conceptuales del universo.

En una segunda etapa de su pensamiento (periodo de aceptación de la teoría del ímpetu) Galileo se esfuerza en desarrollar de manera coherente y completa una dinámica de la *fuerza impresa* (o del ímpetu) al modo como lo había desarrollado Benedetti en sus diferentes tratados. En los trabajos desarrollados en esta segunda etapa se encuentran una vez más los tradicionales argumentos de sus precursores parisienses aunque condensados, sistematizados y un poco más claros. Desde esta perspectiva Galileo se muestra decididamente como un pensador anti-aristotélico.

Así en este periodo la fuerza es concebida por Galileo a imagen de las *fuerzas cualidades* de la Física aristotélica, como el calor y el sonido. Cualidades sustanciales, al menos en el sentido de que pueden separarse de su fuente y ser transferidas a otros cuerpos. Al igual que la cualidad sonora impresa e introducida por el golpe en la campana, la cualidad es introducida por el motor en el lanzamiento de la piedra. La noción de cualidad o *fuerza motriz* permite dar una explicación completa del fenómeno del lanzamiento sin necesidad de acudir a la acción del medio argumentada por Aristóteles.

Al comprobarse las consecuencias teóricas de la dinámica del ímpetu, la teoría llega a un callejón sin salida, y será necesario que Galileo la abandone para lograr nuevas

metas. Esto lo señala Gaymont en el libro titulado Galileo Galilei de la siguiente manera [33]:

*“Sobre todo la exigencia de matematizar la Física le haría advertir que el ambiguo concepto de “ímpetu” era insostenible y le convencería de la necesidad de constituir una nueva mecánica liberada tanto de los esquemas aristotélicos como de los de la Física parisina”.*

En la tercera y última etapa de su pensamiento (periodo de maduración de la Física moderna en su época), Galileo supera la Física de Aristóteles y también la Física del ímpetu, y se eleva al nivel de la Física matemática, en la que se va a manifestar su genialidad creadora, y también el nuevo rumbo de la ciencia.

En la obra de Galileo se encuentra para designar el concepto de fuerza varios sinónimos: fuerza, potencia, virtud, impulso, tendencia, energía, entre otros [34]. De ellos los más utilizados son ímpetu y momento.

Al abandonar la noción de ímpetu como causa interna del movimiento, él continúa usando el vocablo pero su significado será completamente transformado [35]; de causa de movimiento, el ímpetus pasa a ser su efecto. El término ímpetus que era entendido como causa del movimiento que anima el móvil, se transforma en momento, es decir, producto de la velocidad por la masa, lo que es igual a la cantidad de movimiento lineal. Se emplean los mismos términos tradicionales, pero su significado se va transformando, y esto es una de sus grandes contribuciones al concepto de fuerza y a sus consecuencias conceptuales en la mecánica.

Galileo no sólo reconoce su ignorancia acerca de cuál es la causa o principio de movimiento de los cuerpos celestes, sino que manifiesta también que la gravedad no es más que un nombre. Un término que se usa y es familiar y que oculta la naturaleza y esencia de un fenómeno tan manifiesto. Con respecto a la fuerza plantea lo siguiente: *“somos conscientes de que no conocemos nada de la naturaleza íntima o esencial de la fuerza. Solo conocemos sus efectos cuantitativos en términos de movimiento”.* En un estudio de las mareas, critica a Kepler por haber explicado la influencia de la Luna sobre las mareas en términos que recuerdan las cualidades ocultas de los escolásticos, juzgando que era preferible pronunciar esa sentencia sabia, ingeniosa y modesta: *“No lo sé”*, que a tolerar que se escapen de sus bocas y de sus plumas todo género de extravagancias [36].

Para la ciencia moderna de la época la acción de una fuerza no produce un movimiento, sino una aceleración. Por ello, Galileo reduce la acción de una fuerza a un gradual aumento de la velocidad, al acumularse los incrementos de la velocidad misma. La fuerza es entonces una secuencia continua de impulsos instantáneos que se añaden unos a otro.

## X. COMENTARIOS FINALES

No cabe duda de la importancia histórica del concepto de fuerza en el desarrollo de la mecánica, desde su formulación por Aristóteles hasta su maduración como concepto de la Física moderna con Galileo.

Este desarrollo posibilita que profesores y alumnos tomen conciencia, y exploren las semejanzas entre los conceptos alternativos de estos autores, y las visiones que fueron históricamente construidas y superadas.

Consideramos que la incorporación de esta historia en los materiales curriculares podría llevar a los profesores a prestar más atención a los conceptos alternativos de sus alumnos. Podría también ayudar a los alumnos a que vean el valor de sus ideas, mostrando al mismo tiempo como nociones semejantes evolucionaron en el curso de la historia, colaborando así a reconstruir sus conceptos.

La evolución histórica de este concepto mostrada en este trabajo abarca las épocas que solo muestran la fase inicial del surgimiento de un concepto fundamental en la Física, como es la fuerza. En un siguiente trabajo hablaremos de esto concepto desde Descartes hasta Newton.

## REFERENCIAS

- [1] Acevedo-Díaz, J. A., Vázquez-Alonso, A. Manassero-Mas, M.A. & Acevedo-Romero, P., *Consensos sobre la naturaleza de la ciencia: aspectos epistemológicos*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **4**, 202-225 (2007).
- [2] Cleminson, A., *Establishing an epistemological base for science teaching in the light of contemporary notions of the nature of science and of how children learn science*, Journal in Science Teaching **27**, 429-445 (1990).
- [3] Duschl, R. A. In *improving Science Education. The contribution of Research*, (Open University Press, Buckingham, 2000).
- [4] Matthews, M. R., *Science Teaching: The role of History and Philosophy of Science* (Routledge, New York, 1994).
- [5] McComas, W. F., Clough, M. P. & Almazora, H., *The Nature of Science in Science Education*, (Kluwer Academic Publishers, NED, 2000).
- [6] Rudge, D. & Home, E., *Incorporating history into the science classroom*, The Science Teacher **71**, (2004).
- [7] Wandersee, J. H., *The historicity of cognition: Implications for science education research*, Journal of Research in Science Teaching **29**, 423-434 (1992).
- [8] Solano I., Jiménez E. & Marín E., *Análisis de la metodología utilizada en la búsqueda de “lo que el alumno no sabe” sobre fuerza*, Enseñanza de las Ciencias **18**, 309-328 (2000).
- [9] Sanjay Rebelo, N., *The effect of distracters on student performance on the force concept inventory*, Am. J. Phys., **72** (2004).
- [10] Duschl, R. A., *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, (McMillan Pub., New York, 1994).
- [11] Nersseian, N. J., *Should Physicists preach what they practice? Constructive modeling in doing and learning physics*, Science Education **4**, 203-226 (1995).
- [12] Casini, P., *Naturaleza*, (Labor, Barcelona, 1977).
- [13] Moreno Corral, M. A., *La morada cósmica del hombre. Ideas e investigaciones sobre el lugar de la Tierra en el Universo*, 2a Ed. (FCE-SEP-CONACyT, México, 2003).

*Evolución histórica del concepto fuerza*

- [14] Copérnico, Nicolás, *Sobre las revoluciones de los orbes celestes*, (Nacional, Madrid, 1982).
- [15] Franklin, A., *Principle of inertia in the middle ages*, Am. J. Phys. **44**, 529-545 (1976).
- [16] Peduzzi, L. O. Q. & Zylbersztajn, A., *La Física de la fuerza impresa y sus implicaciones para la enseñanza de la mecánica*, Enseñanza de las Ciencias 15, 351-359 (1997).
- [17] Koyré, A., *Quinzieme Semaine de Synthèse: synthèse, idee-force dans l'évolution de la pensée*, (Albin Michel, Paris, 1951).
- [18] *Ibidem*, p 42.
- [19] Copérnico, N., *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes)*, (Tecnos, Madrid, 1987).
- [20] El *Commentariolus*, manuscrito de escasa difusión, redactado en el primer decenio del siglo XVI y cuyo título completo reza así: *De hypothesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*. La conocida como "Carta contra Werner" (*Epistula de octava Sphaera, contra Wernerum*), en la que critica, como carta abierta, un pequeño escrito del geógrafo y físico Johannes Werner (1468- 1522). Y un escrito que manifiesta sus tareas como administrador del obispado de Warmia, titulado "Disertación sobre la acuñación de la moneda" (*De monetarum cudendae ratione*).
- [21] Khum, T., *La revolución copernicana*, (Ariel, Barcelona, 1985).
- [22] Ferris T., *La aventura del universo*, (Crítica, Barcelona, 1990).
- [23] Hull, L. W. H., *Historia y filosofía de la ciencia*, (Ariel, Barcelona, 1981).
- [24] Mason, S. F., *Historia de las Ciencias. La revolución científica de los siglos XVI y XVII*, (Alianza, Madrid, 1990).
- [25] Burtt, E., *The metaphysical foundations of modern Physical Science*, (Sudamericana, Buenos Aires, 1960).
- [26] William G., *De Magnete*, (1600), Translated by P. Fleury Mottelay (New York, 1958).
- [27] Kepler J., *Mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium*, Eresmi Kempferi, Froncofurti, 1621).
- [28] Carta del 28 de marzo a Herwart di Hohenburg.
- [29] Carta del 10 de Noviembre a David Fabricius.
- [30] Cassirer, E., *Das Erkenntnisproblem in der Philosophie und Wissenschaft der neuen Zeit, Vol. I*, Berlín (1911), (FCE, México, 1971).
- [31] Dugan, R., *La mécanique au XVII siècle*, (VRIN, Paris, 1954).
- [32] Galilei, G., *Opere Tomo I*, (Edizione Nazionale de A. Favaro Barbèra, Firenze: ITA, 1964).
- [33] Geymonat, L., *Galileo Galilei*, (Península, Barcelona, 1969).
- [34] Galilei, G., *Opere, Tomo VIII Discorsi e dimostrazione matematiche in torno a due move scienze*.
- [35] Newton incluso lo utilizará también.
- [36] Galilei, G., *Opere, Tomo V, Discorso del flusso e refluxo del mare*.