

En el siguiente texto analizaremos el desarrollo de las nociones de movimiento desde la época clásica griega hasta la actualidad. Comenzaremos con las obras de Aristóteles que resumen en buena medida el pensamiento antiguo.

ARISTÓTELES (384 – 322 a.C.)

Fue mejor filósofo que físico. Sus teorías basadas en muchas ideas inocentes sobre las causas del movimiento, y con más errores que aciertos, influyeron fuertemente en el pensamiento humano a lo largo de 2000 años.

La aceptación de su pensamiento como palabra indiscutida a pesar de las discrepancias de otros pensadores, probablemente se pueda asociar a:

- 1) quien fue su más famoso discípulo primero y su protector después: Alejandro Magno, que dominó Europa (336 a 322 ac).
- 2) la adaptación de las ideas paganas de Aristóteles a la visión de la Iglesia Cristiana, hecha en el siglo XIII, por el fraile italiano Tomas de Aquino. (Tierra centro del universo, movimiento regido por un motor divino, etc.)

Aristóteles formuló un concepto de la estructura del universo y una teoría del movimiento, relacionadas e interdependientes, pero sin una base matemática.* Su mayor aporte a la física sea tal vez su nombre que deriva de la palabra φυσικα que significa naturaleza.

Era sabido que la Tierra es esférica y que los cuerpos caen hacia su centro.

Por lo que *Aristóteles* pensó que *el centro del universo era el mismo centro de la Tierra* dado que "todo" parecía caer hacia allí.

El movimiento de caída vertical hacia abajo por tanto era *natural* y no requería de la acción de una fuerza. Aunque el estado *natural* de un cuerpo es: *el estado de reposo*; por supuesto *con relación a la Tierra*. Cualquier desplazamiento (excepto el de caída vertical) del cuerpo con relación a la Tierra debe tener una causa: la fuerza. *Si no hay causas para el movimiento, el cuerpo tiene que detenerse y pasar a su situación natural*. Y tal situación es el estado de reposo con relación a la Tierra.

* A diferencia de otros grandes filósofos griegos Aristóteles no tenía grandes conocimientos matemáticos.

Aristóteles sabía que esto no podía ser del todo cierto porque: ¿Qué mantiene movimiento a una piedra cuando se lanza horizontalmente? Encontró una forma ingeniosa de explicarlo, indicando que el aire al llenar el vacío dejado por la piedra al desplazarse impulsaba la piedra hacia adelante.

Creía que la velocidad de caída de los cuerpos era proporcional al peso de los mismos. Un cuerpo diez veces más pesado debía caer diez veces más rápido. Aunque a diferencia de otros pensadores de la antigüedad comprendía que el aire deformaba el movimiento de caída de los cuerpos ligeros como las plumas por lo que **en el vacío todos los cuerpos debían caer juntos**. Esta idea le parecía tan absurda, que entendió que demostraba **la no existencia del vacío**.

RESPONDE:

De acuerdo con el pensamiento de Aristóteles:

- 1) ¿Dónde estaba la Tierra? Y ¿Por qué llegó a esa conclusión?
- 2) ¿Cuál es el estado natural de un cuerpo? Y ¿cuál el movimiento natural?
- 3) ¿Por qué es natural el movimiento de caída hacia la Tierra?
- 4) ¿Cualquier movimiento debe estudiarse en relación a qué punto fijo?
- 5) ¿Cuál es la causa que mantiene a un movimiento que no sea de caída vertical?
- 6) Si un cuerpo se mueve debido a la aplicación de una fuerza ¿su movimiento es natural?
- 7) ¿Por qué no existiría el vacío?
- 8) Luigi Galvani (1737-1798) afirmó respecto al pensamiento científico:

...pues es fácil en experimentación engañarse y pensar que se ha visto y descubierto lo que deseamos ver y descubrir.

De acuerdo con lo leído ¿sucedió esto con Aristóteles?

GALILEO GALILEI (1564 - 1642)

Los aportes principales de Galileo a la ciencia se refieren a: la defensa del copernicanismo (que no ubica a la Tierra en el centro del sistema solar, sino al Sol), con toda la notoriedad y clamor que rodeó a este movimiento, y su trabajo fundamentado sobre la teoría del movimiento, más profundo y menos escandaloso.

Galileo Galilei, nació en Pisa (Italia) en 1564.

En 1581, según cuenta la leyenda, Galileo, aún estudiante de medicina, estando en misa en la catedral observó el suave balanceo de un candelabro de un lado a otro. Galileo empezó a percibir un ritmo en el suave movimiento de oscilación. A medida que el balanceo disminuía, la velocidad decrecía, pero el ritmo permanecía extrañamente invariable. Tomándose el pulso en la muñeca, pudo determinar el tiempo en que la lámpara subía y bajaba. Para su asombro, encontró que era idéntico en cada recorrido, independientemente de la longitud del arco recorrido, llevó a cabo una serie de experimentos usando bolas de diferentes pesos suspendidas de cuerdas de distinta longitud. Enseguida descubrió que *el tiempo de oscilación dependía de la longitud del péndulo, aumentando con la longitud, pero, sorprendentemente, era independiente del peso de la plomada.*

Para Galileo *la experimentación* es el primer medio de descubrir y de verificar las leyes físicas, es por ello que durante mucho tiempo mantuvo en silencio su apoyo a Copérnico, hasta que pudo construir su propio anteojo y con él hacer maravillosas observaciones, las cuales permitieron apoyar la teoría Copernicana de que la Tierra no era el centro del universo y giraba alrededor del sol como lo hacían los otros planetas.

Dentro de su aporte a la teoría del movimiento, Galileo dice que: *si se despreja la resistencia del aire, todos los cuerpos caen con la misma velocidad, independientemente de su masa.* Sin embargo, la mayor parte de los eruditos de la época seguían aferrados al modelo aristotélico. Para justificar su conjetura, Galileo argumentó sobre lo que pasaría en el vacío.

Galileo llegó a la conclusión correcta de que los cuerpos que caen aumentan su rapidez en *la forma más simple posible, es decir, con aceleración uniforme.*

Comenzó a realizar experimentos con planos inclinados. Juntó dos de ellos de los extremos, inclinando uno hacia abajo y el otro hacia arriba. Una bola que descendía por el primero rodaba cada vez más rápido hasta pasar rápidamente por el fondo; al ascender el segundo plano, empezaba a frenar hasta pararse al mismo nivel donde había sido soltada. Sin apenas depender de la inclinación del segundo plano, la bola rodaba hasta pararse prácticamente en el mismo nivel, es decir, la misma altura vertical.

Pero ¿por qué no volvía a subir hasta exactamente su altura original? Galileo estudió el tema y llegó a la conclusión de que la bola se frenaba por *rozamiento*. Después experimentó bajando el segundo plano gradualmente, de modo que la bola recorría cada vez más trayecto antes de pararse a su altura original, entonces se planteó la pregunta crucial: *¿Qué ocurriría si se hiciera el segundo plano perfectamente sin rozamiento y horizontal?* La bola, por supuesto, rodaría eternamente sin acelerar ni frenar. Se desplazaría con «un movimiento uniforme y perpetuo». Había sobrepasado los límites del experimento, pues por pequeño que fuera el rozamiento, no podía evitarlo por completo; sin embargo, supo más allá de esa limitación. Por fin se había revelado el misterio del movimiento. Había desarrollado el concepto *de inercia*.

A pesar de su brillante intuición, Galileo se perdió al cuestionarse cómo por existir un plano horizontal infinito sobre una Tierra esférica. Al final llegó a la conclusión equivocada de que este movimiento perpetuo era aplicable tan sólo a sistemas circulares. En un sentido, no obstante, estaba en lo cierto. Si su pista sin rozamiento hubiera dado la vuelta al planeta, la bola, una vez en movimiento se habría mantenido girando alrededor de la Tierra eternamente, pero solo porque la gravedad le impediría escapar. La idea le gustaba bastante, pero parecía explicar el movimiento circular orbital de los planetas, algo en lo que creía totalmente. Sin embargo, la esencia del concepto era consistente persistía: *Un cuerpo en movimiento, dejado libre, sin influencia de ninguna clase tiende a permanecer en movimiento uniforme.*

La formulación correcta de la ley se resistió a varios contemporáneos de Galileo hasta que por fin fue correctamente establecida —*linealizada* finalmente— por un soldado profesional convertido en filósofo y matemático, Rene Descartes, que hizo, al parecer, con bastante independencia, no mediante experimentación, sino por conjeturas hechas sobre una indefinible concepción metafísica de Dios y

del universo. En sus *Principios de filosofía* (1644), afirmaba «que todo cuerpo que se mueve tiende a continuar su movimiento en línea recta».

En 1624 fallece el Papa y lo sucede el cardenal Barberini, amigo de Galileo, éste vuelve a Roma y obtiene la autorización de escribir un libro en el que podrá presentar las ideas de Tolomeo y de Copérnico como dos teorías posibles. Emplea 4 años en escribirlo, lo titula "Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo". A diferencia de los científicos de su época que escribían en latín, él escribe en italiano y de modo ameno para un público no especializado. Los personajes de su libro discuten muchos planteamientos relacionados con la mecánica y el origen del mundo. Entre estos se encuentra el planteamiento de cómo ocurren los diferentes fenómenos físicos en un sistema que se mueve uniformemente y en línea recta.

Una de estas formulaciones que se conoce como el principio de relatividad de Galileo dice:

«En un sistema de referencia que se mueve en línea recta y con velocidad constante los movimientos ocurren de la misma manera que en un sistema en reposo».*

El libro aparece en 1632. El Papa y su entorno entienden que Galileo se ha burlado de ellos y el libro se prohíbe. El 22 de junio de 1633 Galileo juzgado frente a una gran asamblea de religiosos es forzado a declarar que no cree que la Tierra gire en torno al Sol. Se lo condena a prisión domiciliaria, no pudiendo recibir visitas. En estas condiciones hace lo único que puede, escribir. En 1638, cuatro años antes de morir publica en Ámsterdam "Discurso sobre dos ciencias nuevas", que supone el inicio de la mecánica moderna.

Responde:

- 9) ¿Cuáles son los principales aportes de Galileo a la ciencia?
- 10) ¿Por qué si apoyaba las ideas de Copérnico demoró en hacerlo público?
- 11) ¿Qué dice el principio de relatividad de Galileo?
- 12) Según Galileo: ¿cuál es el movimiento que tendrá un cuerpo que no es acelerado ni frenado? ¿Cómo se denomina ese concepto?
- 13) ¿Qué diferenció las publicaciones de Galileo de la de los científicos hasta esa época?

(*) Por ejemplo: si viajas en un barco y dejas caer agua de una botella, esta caerá dentro del vaso tanto si el barco está en reposo como si viaja con velocidad constante. No sucedería lo mismo si el barco girará o se tambalea durante una tormenta.

NEWTON (1642 - 1727)

Físico y matemático genial. Desarrolló el teorema de Newton para la potencia de un Binomio, creó el cálculo diferencial e integral, estudió fenómenos ópticos y colores, estableció las leyes del movimiento, desarrolló el concepto gravitación universal, explicó el movimiento de la Luna, y las mareas. Todo fue una precisión matemática poco común hasta esa época. Sus aportes influyen fuertemente en el posterior desarrollo de la física.

En su obra maestra "*Principios matemáticos de filosofía natural*" formuló tres leyes que a su entender rigen el movimiento. Estas leyes válidas para movimientos a velocidades ordinarias, se alejan de la realidad para velocidades del orden de 10^7 m/s o superiores. Sin embargo reinarían sin discusión hasta 1905, año en que Einstein, elabora una teoría más amplia que describe exitosamente los movimientos, cualquiera sea su velocidad.

MASA E INERCIA

Newton entendió que el movimiento de un cuerpo no dependía solo de velocidad, y que la masa de los cuerpos incidía. El concepto de masa no claro en esa época, se manejaba intuitivamente pero nadie podía expresarlo en palabras. En el comienzo de "Principios..." define la masa junto a otras cantidades básicas.

Newton creía que la *inercia*, esto es *la resistencia al cambio de movimiento*, una propiedad intrínseca de la materia, una manifestación de la masa, si un cuerpo tiene más masa tiene más inercia, independientemente del ambiente que la rodea. Esta idea no es compartida por todos los científicos, algunos creen que la inercia es el resultado de la interacción de toda la materia del universo, aunque hay otras opiniones. Los físicos no han resuelto el origen de la inercia.

Newton luego define los siguientes "Axiomas o leyes del movimiento":

PRIMERA LEY O LEY DE INERCIA:

Las leyes del movimiento de los cuerpos son iguales en todos *los sistemas inerciales (en reposo o que viajan con velocidad constante)*: los cuerpos se ponen en movimiento a causa de la acción de fuerzas, se frenan debido a fuerzas, están libres de la acción de las fuerzas, se mantienen en reposo o en movimiento uniforme y rectilíneo)

En otras palabras: si ninguno de los observadores sufre aceleración, hallarán que los cuerpos libres de fuerzas están en reposo o viajan con velocidad constante y en línea recta.

Newton atribuyó a Galileo el conocimiento de sus dos primeras leyes, de él toma el concepto de aceleración e inercia.

SEGUNDA LEY DE NEWTON O LEY DE MASA:

El enunciado que estudiaremos ahora de esta ley, apareció varias décadas después en un trabajo del científico suizo Euler. El enunciado alternativo a la 2ª ley de Newton hace más sencilla su aplicación, aunque solo es válida cuando los movimientos se producen a "pequeñas" velocidades. La formulación original de la 2ª ley de Newton, en cambio, mantiene su validez dentro de la teoría de la relatividad.

Newton define a la fuerza como **agente de cambio**, es lo que altera al movimiento. ¿Pero cuánto cambia?

La aceleración que adquiere un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza neta e inversamente proporcional a su masa. (y tiene la dirección y sentido de la fuerza neta)

$$\left. \begin{array}{l} a \propto F_{\text{neta}} \\ a \propto 1/m \end{array} \right\} \begin{array}{l} \vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{neta}}}{m} \\ \vec{F}_{\text{neta}} = m \cdot \vec{a} \end{array}$$

TERCERA LEY O LEY DE ACCIÓN Y REACCIÓN

En esta ley se completa el concepto de fuerza. En la interacción entre dos cuerpos surgen dos fuerzas de igual módulo y dirección en sentidos opuestos y que actúan una en cada uno de ellos.

Estas fuerzas denominadas *par de acción y reacción* siempre son iguales y opuestas y nunca pueden actuar en el mismo cuerpo.

Si aproximamos un imán a la heladera sentirás que la heladera tira de tu mano. La heladera a su vez "sentirá" que es jalada. Si se aleja el imán el valor de las fuerzas de interacción disminuye, ¿Qué tan rápido "se enteran" del cambio en el valor de la fuerza? Newton pensaba que esa información se propagaba con una velocidad infinita.

LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL:

¿Qué sostiene a la Tierra y a los planetas? ¿Por qué se mantienen girando alrededor del Sol en determinadas órbitas?

Las leyes que describían el movimiento de la Tierra y los planetas alrededor del Sol en órbitas elípticas fueron formuladas por Kepler (1571 - 1630), sin embargo nunca pudo responder esas preguntas. A través de la teoría del movimiento gravitacional de Newton, fue posible deducir y explicar por qué se cumplen por ejemplo las leyes de Kepler, sobre el movimiento planetario. El éxito de su ley de gravitación no fue tanto, el formularla (antes de 1685 ya sabían las piezas claves de esta ley)*, sino en saber aplicarla con correcciones matemáticas, logrando por ejemplo determinar la fuerza que mantiene en órbita a la Luna.

Su enunciado dice:

La fuerza de atracción gravitatoria F_G entre dos cuerpos de masas M y m separados por una distancia r se describe por:

Los cuerpos cualquiera se atraerán mutuamente mediante fuerzas de gravedad. Estas serán directamente proporcionales al producto de sus masas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa.

$$F_G \propto \frac{m \cdot M}{r^2}$$

*¿Qué se sabía antes de la formulación de Newton?

Universalidad: Afirmado por Hooke en 1670, la atracción *existe entre todos los objetos materiales*.

Producto de las masas: Gilbert creía que la fuerza que la Tierra ejerce es de origen magnético y había descubierto que estas dependían del tamaño y de la masa de los imanes naturales.

El cuadrado de la distancia: Kepler pensó que al igual que la luz, la fuerza gravitatoria disminuía proporcionalmente al cuadrado de la distancia.

100 años después de enunciada la ley de gravitación universal, en 1798 Lord Henry Cavendish logró desviar una pequeña esfera próxima a una gran masa de plomo, confirmando la universalidad de la ley de gravitación y hallando la constante de proporcionalidad denominada de gravitación universal G :

de modo que :

$$F_G = \frac{G \cdot m \cdot M}{r^2}$$

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$$

- Esta ecuación es válida cuando la separación r es mucho mayor que las dimensiones de los cuerpos y toda la masa puede considerarse agrupada en el centro del cuerpo.
- Siendo entre los cuerpos comunes las fuerzas de interacción gravitatoria despreciables, su intensidad solo se hace significativa cuando uno o los dos cuerpos tienen masas enormes, por ello la constante de gravitación universal G tiene un valor muy pequeño.

(Obsérvese que en la teoría de Newton aparece la masa como responsable de la interacción gravitatoria y como propiedad asociada a la inercia del cuerpo).

Responde:

1. Newton fue considerado ya en su época como un científico genial. ¿Cuál será la base de esa consideración?
2. Cinco estudiantes estudian el movimiento de un auto que viaja con velocidad constante de 30m/s en una ruta horizontal. Juan se mantiene en reposo respecto a la Tierra, María viaja con velocidad constante de 20m/s, Ana acelera en su bicicleta, Martín frena y Clara viaja a la misma velocidad que el auto, excepto Juan, todos viajan en el sentido del auto.
 - a) Indica cuál o cuáles serán sistemas de referencia inerciales.
 - b) Indica quienes afirman:
 - i) El auto se mueve como si sobre él no actuaran fuerzas.
 - ii) Sobre el auto debe actuar una fuerza que modifique su velocidad.
3. Fundamenta el grado de veracidad de las siguientes afirmaciones:
 - a) Newton elaboró sus teorías sin tener en cuenta el pensamiento de otros científicos.
 - b) Las definiciones y leyes enunciadas por Newton son verdaderas.

- c) La definición de algunos conceptos físicos fundamentales imprecisa.
- d) En 1798 Cavendish demostró la veracidad de la ley de gravitación universal.
- e) Una teoría es un conjunto de leyes e hipótesis mediante las cuales se pueden predecir nuevos sucesos y relaciones, que luego de probados, constituyen nuevas leyes.

EINSTEIN (1879 - 1955)

Este gran físico es reconocido como uno de las mayores inteligencias creativas de la historia de la humanidad.

Realiza sus primeros estudios en Alemania y Suiza. Abandona tres años antes de terminar la educación media, por lo que no puede asistir a la Universidad y como alternativa concurre al Instituto Politécnico de Zurich, donde se gradúa excelente en Matemáticas y Física pero no le interesaban las otras asignaturas. Desde 1933 su vida se caracteriza por los continuos viajes protegiéndose del nazismo alemán. En 1945 se retira de la docencia y trabaja hasta su muerte para tratar de integrar en una misma teoría las cuatro fuerzas de la naturaleza gravitatoria, electromagnética y las subatómicas fuerte y débil.

La teoría de la relatividad se origina en el concepto de movimiento relativo.

La primera formulación es la *teoría de la relatividad especial* (1906) y se ocupa de los sistemas que se mueven uno respecto al otro con velocidad constante. La segunda formulación es la *Teoría de la relatividad general* (1916) y se ocupa de los sistemas que se mueven con velocidad variable.

Relatividad especial

En 1905 Einstein publicó varios trabajos. Uno de ellos con una explicación teórica estadística sobre el movimiento browniano, otro con una interpretación efecto fotoeléctrico que se basaba en que la luz está integrada por pequeñas partículas sin masa más tarde llamadas fotones y el más importante: "Acerca la electrodinámica de los cuerpos en movimiento" donde expone la relatividad especial.

Es en este trabajo que se plantean sus dos postulados:

- 1) Todos los observadores que se mueven entre sí con velocidad constante son equivalentes para las leyes físicas. (Principio de relatividad)

sus inicios con Galileo pero en la teoría de Einstein quedan excluidos la noción de espacio y tiempo absoluto).

- 2) La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores y es independiente del movimiento relativo entre la fuente de luz y el observador (Principio de la invariabilidad de la velocidad de la luz)

El éter que se había considerado durante todo el siglo XIX como medio propagador de la luz y como la única cosa absolutamente firme del Universo, con movimiento absoluto y no determinable, *quedaba fuera de la Física*.

Presenta la equivalencia entre la masa y la energía a través de la famosa ecuación $E = m \cdot c^2$, donde aparece la velocidad de la luz como constante c .

En los aceleradores de partículas se demuestra su predicción del incremento de masa con la velocidad.

Un dato curioso es que recién en 1921 le dieron el Premio Nóbel y fue por los dos primeros trabajos mencionados.

Relatividad general

En 1916 da a conocer su teoría sobre la gravedad como un campo creado por la presencia de masa en el continuo espacio-tiempo. El principio de equivalencia dice que los efectos producidos por un campo gravitacional equivalen a los de un movimiento acelerado. El tiempo debe transcurrir más lentamente cuanto más fuerte sea el campo gravitatorio en que se mida.

Esta teoría explicaba la discrepancia en la órbita de Mercurio entre lo observado y lo calculado con las leyes de Newton como una consecuencia del espacio intensamente curvado en las inmediaciones del sol.

En un eclipse de Sol en 1919 se confirmaron las predicciones sobre la curvatura de la luz en presencia de un campo gravitatorio. Una masa deforma el espacio-tiempo a su alrededor y Einstein proporciona la matemática que permite calcular punto a punto la "geometría" en la vecindad de una masa..

La revolucionaria hipótesis tomada por Einstein fue provocada por el hecho de que la teoría de la relatividad especial, basada en la constancia de la velocidad de la luz no concuerda con la teoría de la gravitación newtoniana: si la fuerza con que dos cuerpos se atraen depende de la distancia entre ellos, al moverse uno, tendría que cambiar al instante la fuerza sentida por el otro, es decir, la interacción tendría una velocidad de propagación infinita, violando la teoría especial.

El cambio de posición de una partícula, por ejemplo de un electrón carga empieza a afectar a otras cargas sólo después de cierto tiempo, necesario para que la interacción que se efectúa a través del campo electromagnético alcance a propagarse de una región del espacio a otra. Es lógico pensar que las interacciones fundamentales, tales como las interacciones gravitacionales, electromagnética, que se propagan con esta velocidad c .

Es necesario decir que cada nueva teoría física no desecha las teorías anteriores como incorrectas, sino que las incluye como casos particulares que son ciertos solamente en determinadas regiones de los fenómenos, y al mismo tiempo traza los límites de su aplicación. Así ocurrió con la teoría especial de relatividad de Einstein que incluyó la mecánica de Newton en calidad de buena aproximación a la realidad en los casos cuando las velocidades de cuerpos en movimiento son pequeñas en comparación con la velocidad de la luz.

Responde:

- 1) ¿Existe algún límite en la física newtoniana para la máxima velocidad a la que puede desplazarse una cosa?. Mencione un ejemplo.
- 2) ¿Fue la idea de que todo movimiento es relativo concebida por vez primera por Einstein?
- 3) ¿Bajo qué condiciones podemos esperar que la mecánica newtoniana no difiera sustancialmente de la relatividad?
- 4) ¿Por qué no puede usarse la noción de cantidad de materia como un sinónimo de masa en la teoría de la relatividad? Explique.
- 5) De acuerdo con Einstein ¿A qué es equivalente un campo gravitatorio intenso? ¿Qué sucede allí con el tiempo?