

## EL CONCEPTO NEWTONIANO DE FUERZA

### EL CONCEPTO DE FUERZA EN LA ANTIGÜEDAD

Durante casi 18 siglos las ideas de Aristóteles conformaron el modelo dominante en el campo de las ciencias. En lo que se refiere a la física, esta forma de pensar se ha llamado "Física del sentido común", porque bastantes de sus ideas coinciden con razonamientos espontáneos de las personas. Se sustentan en un modelo geocéntrico, que desarrolló con detalle posteriormente el astrónomo Ptolomeo. Estas ideas aportaron una visión científica, filosófica y también "religiosa" del mundo.



Una característica fundamental de la física de Aristóteles fue plantear una separación radical entre dos mundos: el mundo sublunar imperfecto o terrestre y el mundo celeste o perfecto. Estas dos partes del Universo debían funcionar obedeciendo a leyes diferentes: en el perfecto mundo celeste, el Sol, la Luna y las estrellas se mueven de forma regular y permanente siguiendo círculos suaves y uniformes alrededor de la Tierra; en cambio, en el mundo imperfecto terrestre, el estado natural de los objetos es el reposo y es necesario intervenir sobre ellos para ponerlos en movimiento y para mantener dicho movimiento.

En este contexto, se planteó el concepto "tradicional" de fuerza, entendida como la causa del movimiento, de la velocidad de los cuerpos. 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.

### EL CONCEPTO DE INERCIA PLANTEADO POR GALILEO

En el periodo comprendido entre la segunda mitad del siglo XVI y la primera mitad del siglo XVII se acumuló un conjunto de contribuciones científicas que abrieron el paso a una nueva visión del mundo y de las leyes físicas que rigen los movimientos. En ese periodo, en que se estaba generando la primera revolución científica, destacamos la propuesta de Copérnico de sustituir el modelo geocéntrico del mundo por un modelo heliocéntrico, las leyes de Kepler sobre el movimiento de los planetas y, finalmente, las grandes aportaciones de Galileo (1564-1642) en varios campos (astronomía, mecánica, óptica,...)

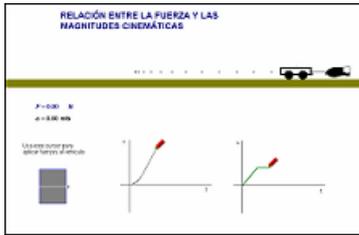
Debemos a Galileo el concepto de inercia y ligado a él, una nueva relación entre la fuerza y el movimiento. En la obra "Diálogos sobre los dos grandes sistemas del mundo, ptolemaico y copernicano" (1632) utiliza el recurso de plantear



unos diálogos entre tres personajes: Simplicio (que representa el punto de vista aristotélico), Salviati (que representa los nuevos puntos de vista de Galileo) y Sagredo (que representa al hombre de buena voluntad, no comprometido y de mentalidad abierta, ávido de aprender). A través de un fragmento de estos diálogos, Galileo nos conduce hacia un *nuevo concepto de fuerza entendida como causa de la modificación del movimiento*: para que un cuerpo permanezca en movimiento simplemente hay que dejarlo: un cuerpo que deslizará por un plano liso y perfectamente pulido, mantendría su movimiento "ad infinitum"; si este cuerpo deslizará sobre una superficie inclinada sufrirá la acción de una fuerza que le produce aceleración, bien a favor (con inclinación favorable) o en contra (con inclinación desfavorable).

De acuerdo con este concepto de fuerza de Galileo, el estado natural de los objetos no será ya exclusivamente el reposo (un reposo absoluto), sino también cualquier movimiento rectilíneo y uniforme, que, en ausencia de fuerzas, permanece

inalterable. La inercia no es, pues, una tendencia de los objetos al reposo, sino una tendencia a mantener su estado de movimiento o de reposo. Es cierto que, por ejemplo, un objeto que desliza sobre una superficie horizontal va perdiendo velocidad y acaba parándose. Pero ello es debido a que sobre el objeto se ejerce, mientras desliza, una fuerza contraria a la velocidad, en este caso, la fuerza de rozamiento.

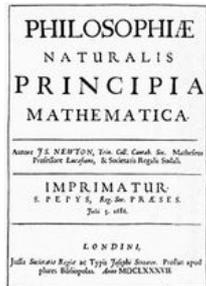


Para practicar este concepto hemos diseñado una animación *Modellus* que permite aplicar fuerzas a un objeto que deslizará sobre una superficie lisa perfectamente pulida, es decir, sin intervención del rozamiento. De acuerdo con los conceptos que planteó Galileo, necesitaremos ejercer una fuerza para dotar al objeto de aceleración y así ponerlo en movimiento. Una vez que el objeto esté deslizando, podemos dejar de ejercerle fuerza y el cuerpo mantendrá un movimiento rectilíneo y uniforme.

## PRINCIPIOS DE LA DINÁMICA DE NEWTON

En 1687 Newton publica el libro "*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*", posiblemente el libro más famoso de la historia de la ciencia. Después de una introducción en la que establece un conjunto de definiciones sobre magnitudes fundamentales (masa, tiempo, cantidad de movimiento, inercia, fuerza,..) y define los conceptos del espacio y el tiempo, Newton enuncia sus famosos tres principios del movimiento o postulados fundamentales de la Dinámica.

En el lenguaje actual, podemos expresar los principios de la dinámica de Newton así:



*I. Todo cuerpo material persiste en su estado de reposo o movimiento uniforme (no acelerado) en línea recta, si y solo si no actúa sobre él una fuerza resultante (no equilibrada)*

*II. La fuerza exterior resultante (no equilibrada) que actúa sobre un cuerpo material, es directamente proporcional a, y de igual dirección que, su aceleración.  $\mathbf{F}_{res} = m \cdot \mathbf{a}$  (\*)*

*III. Siempre que dos cuerpos A y B interactúan de tal modo que el cuerpo A experimenta una fuerza (por contacto, por interacción gravitatoria, magnética o cualquier otra) el cuerpo B experimenta simultáneamente una fuerza de igual magnitud y dirección, pero de sentido contrario.*

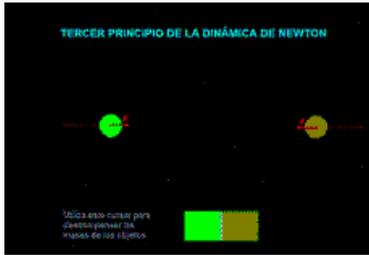
(\*) El enunciado de Newton se corresponde mejor con la expresión  $\mathbf{F}_{res} = d(m \cdot \mathbf{v})/dt$ . Teniendo en cuenta que la masa es una cantidad constante, Leonard Euler introdujo en el año 1752 la versión más usual de la ley, es decir:  $\mathbf{F}_{res} = m \cdot \mathbf{a}$ .

Los dos primeros principios recogen la aportación de Galileo, estableciendo una relación matemática precisa entre la fuerza resultante que puede ejercerse sobre un objeto y la modificación del movimiento de éste, representada por la aceleración. La constante de proporcionalidad entre estas magnitudes,  $m$ , es una propiedad del cuerpo que llamamos masa inercial. La masa inercial de un objeto representa su "resistencia o pereza" a cambiar su estado de movimiento: sometidos ambos a la misma fuerza, un objeto de masa inercial grande adquiere una aceleración menor que otro de masa inercial pequeña.

La aportación original más importante de Newton al enunciar los principios es el concepto de interacción entre los objetos, especificado en el tercer principio. Para Newton, las fuerzas son acciones mutuas entre cada dos cuerpos, iguales y de sentido opuesto (la fuerza que hace un cuerpo A sobre otro B es igual y opuesta a la que hace el cuerpo B sobre el cuerpo A).

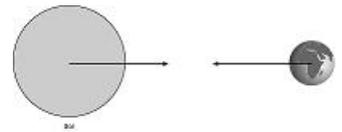
Finalmente, Newton completa los tres principios estableciendo una relación precisa entre la fuerza resultante que se ejerce sobre un objeto (causante de su aceleración) y las interacciones que tenga dicho objeto con otros: La fuerza resultante sobre un cuerpo tiene que ser igual a la suma de todas las fuerzas que los demás ejercen sobre él.

Es frecuente que haya dificultad para entender por qué, siendo las fuerzas de interacción entre cada dos objetos iguales y opuestas (tercer principio), hay fuerza resultante y, por tanto, aceleración. También cuesta comprender que, aunque las fuerzas de interacción entre cada dos objetos son iguales, cada uno tiene una aceleración distinta. Para trabajar estos aspectos hemos diseñado una animación que aplica los principios de Newton en una situación de atracción gravitatoria entre dos objetos celestes. El usuario puede modificar el valor relativo de las masas de los cuerpos y ver cómo afecta a su aceleración.



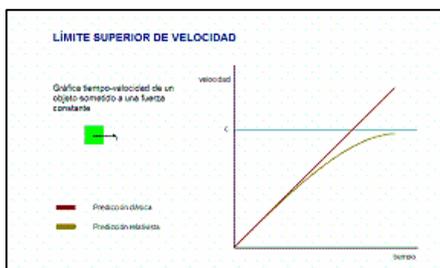
## DIFICULTADES DEL CONCEPTO NEWTONIANO DE FUERZA

Aceptar el tercer principio de la dinámica newtoniana equivale a admitir que entre dos objetos colocados a una cierta distancia, entre los que puede no haber nada, se ejerce una interacción. Esto plantea un problema, que el propio Newton reconoció: ¿Cómo es posible que se ejerzan fuerzas dos objetos, no habiendo nada entre ellos? Es decir, ¿cuál puede ser el mecanismo de la interacción?



En relación con este problema Descartes (1596-1650) había elaborado una hipótesis, llamada de los vórtices o torbellinos de materia, según la cual la materia llenaría todo el espacio y, mediante torbellinos, transmitiría la interacción entre los cuerpos. En la formulación de esta hipótesis para explicar las interacciones tuvo mucho que ver el "horror al vacío", una tendencia espontánea a no admitir que entre los objetos no exista nada material. Pero había otra razón que apoyaba esta hipótesis: una lógica reticencia a aceptar que puedan existir fuerzas que actúen a distancia e instantáneamente. Esta reticencia ha sido casi siempre compartida por la mayoría de los físicos y, también, en la época de asentamiento de la mecánica de Newton. Sin embargo, no fue motivo suficiente para afectar a la esencia de dicha mecánica en su época de esplendor. Fue bastante después, concretamente durante el siglo XIX, cuando se elaboró el concepto de campo, que rivalizó con la noción tradicional de fuerza y empezó a desplazarla.

Con el establecimiento de la Relatividad, el concepto newtoniano de fuerza tropezó con nuevas dificultades, que se derivan del hecho de que existe un límite superior de velocidades, inalcanzable para cualquier objeto material. Tal como muestra una animación que hemos elaborado sobre este concepto, al aplicar los principios de la dinámica, se deduce que un objeto, inicialmente en reposo, sobre el cual actúe solamente una fuerza constante, debería tener un



movimiento de aceleración constante, es decir, rectilíneo y uniformemente acelerado. Por lo tanto, su velocidad,  $v$ , debería aumentar de una forma lineal y progresiva con el tiempo (un tiempo absoluto). La relatividad especial, en cambio, tiene en cuenta que existe un límite superior de velocidades,  $c$ . De tal forma que, al representar la gráfica de la relación de la velocidad con el tiempo,  $v=f(t)$ , en el marco relativista, se obtiene una curva (ver figura adjunta).

William Bertozzi realizó en 1964 un experimento, cuyos resultados concordaron plenamente la predicción relativista poniendo en evidencia la existencia del límite superior de velocidades que también imposibilita de un modo rotundo la hipótesis de Newton de considerar a las fuerzas como "acciones a distancia e instantáneas", no sólo por la dificultad para explicar el mecanismo de la interacción entre los objetos, sino además, porque mantener dicha hipótesis exige

atribuir una velocidad infinita a la propagación de la información: ¿cómo si no podrá una partícula responder de manera inmediata a la acción atractiva o repulsiva de otra?

## EXPERIMENTOS

Con la ayuda de dinamómetros y de sensores de fuerza, realizamos en clase y en el laboratorio bastantes experimentos,



cualitativos y cuantitativos, en los que se ponen a prueba aspectos de los principios de la dinámica newtoniana. La imagen adjunta corresponde a la filmación de uno de estos experimentos en el que el profesor hace oscilar en clase un péndulo que cuelga de un dinamómetro. Los estudiantes realizan previamente un análisis cualitativo de la situación, aplicando la esencia de los principios de la Dinámica, de tal forma que se espera que la tensión del hilo que produce el movimiento pendular oscile entre un valor máximo, superior al peso de la bola (en la posición más baja del movimiento), y un valor mínimo inferior a dicho peso (en las posiciones extremas, cuando la velocidad de la bola es nula). El experimento corrobora la predicción.

Los sensores de fuerza son mucho más sensibles que los dinamómetros y resultan muy útiles para complementar los experimentos realizados con dinamómetros con otros bastante más precisos. Se obtienen resultados bastante interesantes, como, por ejemplo, el que muestra el gráfico adjunto, que corresponde a la misma práctica filmada en el video, pero esta vez realizada por un grupo de estudiantes usando en el laboratorio un sensor de fuerza.



El profesor Mikel Etxaniz, de la Ikastola "Pasaia-Lezo" en Guipúzcoa, nos envió experimentos muy interesantes para verificar con precisión el principio de inercia de Galileo o, lo que es lo mismo, la relación entre la fuerza resultante y el tipo de movimiento que predicen los dos primeros principios de la dinámica newtoniana. Uno de los montajes utiliza un ventilador programable con el que se puede aplicar (o dejar de hacerlo) a un carrito rodante una fuerza constante. El objetivo en este caso es comprobar que mientras la fuerza aplicada es constante, el movimiento es uniformemente acelerado y cuando la fuerza resultante es nula, el carro permanece en reposo o mantiene un movimiento uniforme. Para verificar el tipo de movimiento se usa un sensor de posición.

Otro experimento muy interesante, enviado también por Mikel Etxaniz, utiliza de forma combinada el sensor de fuerza y el sensor de posición para verificar específicamente el segundo principio de la Dinámica ( $F_{res} = m \cdot a$ ). Aquí también se utiliza un carro rodante y un dispositivo experimental semejante a una máquina de Atwood en la que se sustituye uno de los pesos que deberían colgar de la polea por el carrito rodante encima de una mesa de laboratorio. Se usa un sensor de fuerza para medir directamente la tensión que tira del carro y un sensor de posición para obtener la aceleración correspondiente. Tras refinar el diseño (solventando problemas hábilmente observados en los primeros ensayos) se logran unos resultados excelentes en la verificación de la segunda ley de Newton.

