1.3.2 LA HIPÓTESIS DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL DE NEWTON: LA LLAVE QUE HACE QUE TODO ENCAJE.

A.21 Formulad hipótesis sobre a qué puede deberse el peso de los cuerpos o la fuerza que actúa sobre la Luna.

• Aunque, a finales del siglo XVII, había varios físicos y matemáticos —como Newton, Halley, Hooke y otros— trabajando sobre esta cuestión, fue Newton quien formuló la idea* de que el peso de los cuerpos y la fuerza que actúa sobre la Luna eran debidos a que la Tierra ejercía una atracción sobre ellos, que llamó *atracción gravitatoria.* Para Newton sí había, pues, interacción, como en las situaciones que hemos analizado anteriormente, pero sin necesidad de que hubiera «contacto», ya que se trataba de una ¡interacción a distancia!

* Actualmente, todo el mundo «parece» saber que el peso de los cuerpos es debido a la atracción de la Tierra. En cambio, durante milenios se pensó que el peso era una propiedad de los objetos «pesados»: los cuerpos pesaban «porque sí», «por su propia naturaleza», como vimos en el párrafo de Aristóteles en el primer tema de este curso. La hipótesis de Newton, y todos los cálculos que realizó para ponerla a prueba, fueron geniales y revolucionarios en su época. Sin embargo, muchos científicos relevantes, como Huygens, no creyeron jamás en la gravitación universal...

A.21.1 Dibujad los pares acción/reacción del peso de un cuerpo y de la fuerza que actúa sobre la Luna.

• En efecto, admitir que existe una interacción entre la Tierra y un objeto, o entre la Tierra y la Luna, supone que —igual que cuando hay un choque entre dos monedas—, si la Tierra atrae a un objeto con una fuerza (el peso del objeto), el objeto ejercerá una fuerza igual y opuesta sobre la Tierra.

A.22 Identificad las fuerzas a que se encuentran sometidos los objetos en las diferentes situaciones siguientes:

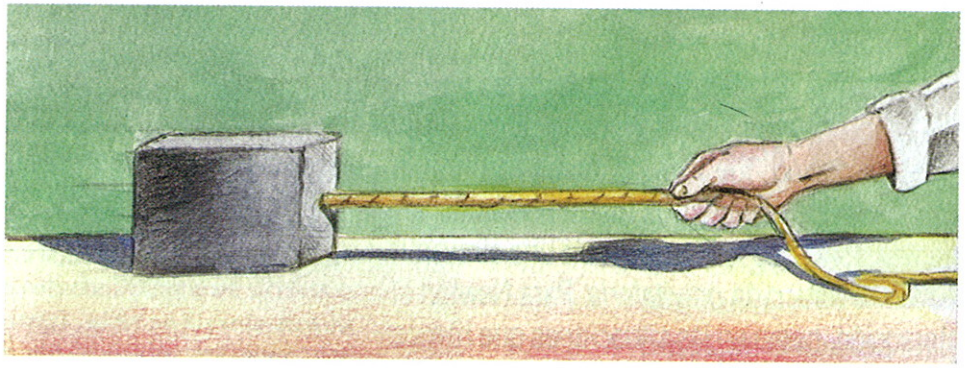
a) un objeto ha sido lanzado verticalmente hacia arriba y está subiendo;
b) ídem en el momento de llegar al punto más alto;
c) ídem y está bajando;
d) un objeto que se ha lanzado oblicuamente y está en el aire;
e) un satélite girando en órbita alrededor de la Tierra.

• A dibujar las fuerzas que actúan sobre un cuerpo o parte de un sistema, identificando todas las fuerzas que actúan sobre él, se le llama «realizar el diagrama de cuerpo-libre». Es una actividad necesaria para poder enfrentarse a la solución de problemas y requiere la comprensión de las ideas desarrolladas sobre fuerza. Puesto que sólo actuará una fuerza sobre un cuerpo si participa en una interacción con otro, es necesario identificar los «contactos» e interacciones «a distancia» en que interviene el cuerpo considerado; y será muy conveniente dibujar no sólo la fuerza que actúa sobre el cuerpo debido a la interacción, sino identificar el par acción-reacción a que pertenece dicha fuerza. Así nos aseguraremos de que no dibujamos fuerzas que no responden a interacciones.

Es decir, cuando pensemos que actúa una fuerza sobre el cuerpo, debemos preguntarnos: «¿quién ejerce esa fuerza?», o «¿a qué interacción es debida esa fuerza?». Y siempre debemos encontrar el otro cuerpo que interacciona con el que estamos estudiando y sobre el que actuará una fuerza igual y de sentido opuesto.

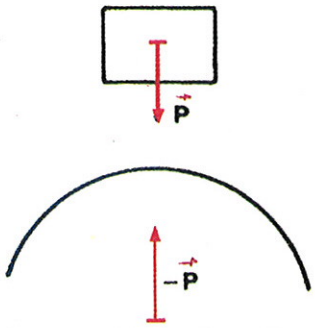
• El valor de las distintas fuerzas que actúan sobre un cuerpo se determinará de modo que se cumpla siempre $\mathbf{F}_{res} = m\,\mathbf{a}$.

• Desarrollaremos ahora, a modo de ejemplo, el siguiente caso: *un cuerpo sobre una superficie horizontal sin rozamiento que está siendo arrastrado por una cuerda de masa despreciable, de la que se tira con la mano:*

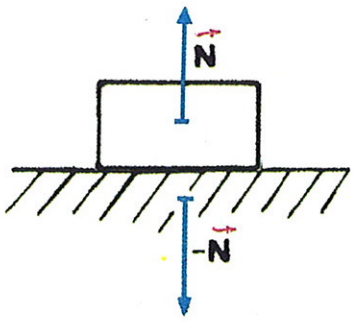


Nos encontramos en este caso con las siguientes fuerzas:

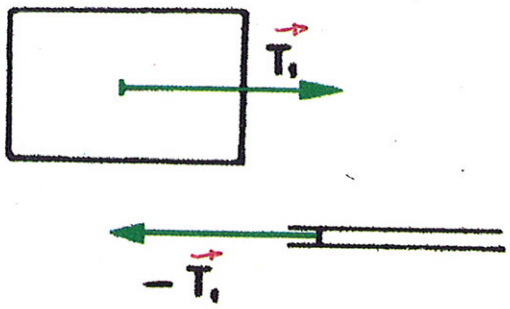
1) La fuerza peso, **P**, debida a la interacción gravitatoria con la Tierra; por tanto, su reacción estará en el centro de la Tierra.



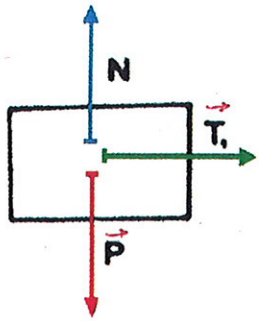
2) La fuerza **N**, que es ejercida por la superficie hacia arriba (si no fuera así, se aceleraría hacia abajo), cuya reacción está, por tanto, en la superficie:



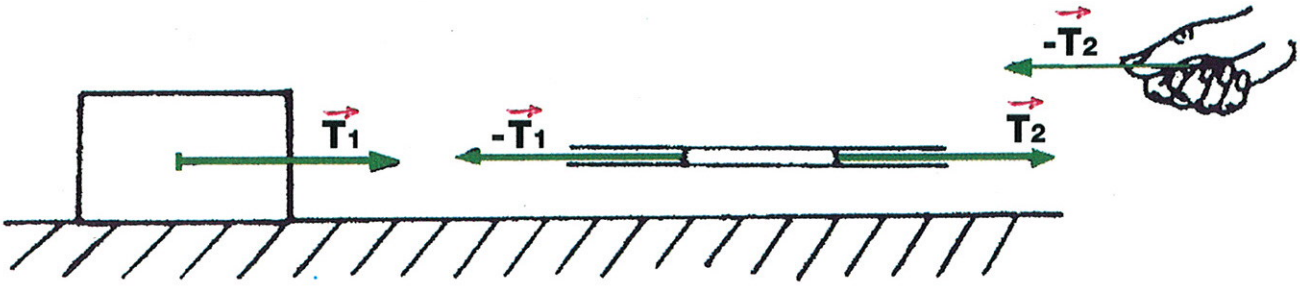
3) La fuerza $\mathbf{T}_1$, que ejerce la cuerda al cuerpo; y puesto que la cuerda le hace una fuerza, $\mathbf{T}_1$, al cuerpo, éste le ejerce a la cuerda una igual y de sentido opuesto:



En conjunto, el diagrama de cuerpo-libre del objeto considerado sería el de la siguiente figura:



Del mismo modo, sobre la cuerda (cuya masa hemos considerado despreciable) actuaría, además de la fuerza $-\mathbf{T}_1$, cuya reacción está en el cuerpo, la fuerza $\mathbf{T}_2$ que le ejerce la mano, cuya reacción, $-\mathbf{T}_2$, está en la mano:

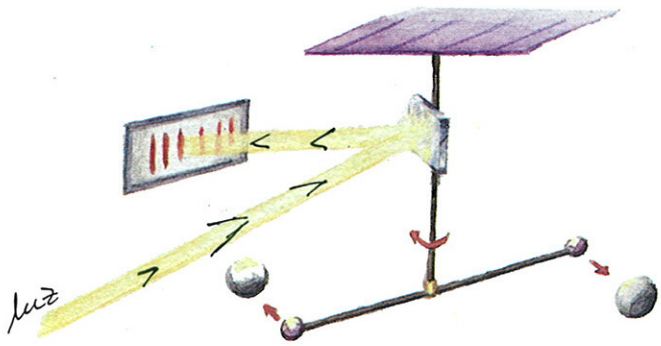


• Por supuesto, las fuerzas de un par acción-reacción actúan, cada una de ellas, sobre cuerpos diferentes (si dibujáramos las fuerzas de un par del mismo color, y cada par de un color distinto, veríamos cómo sobre un mismo cuerpo sólo podrían actuar fuerzas —flechas— de distintos colores).

• Pero ¿qué pasa entonces entre el Sol y la Tierra?; ¿y con Venus y Júpiter? Newton avanzó la idea de que la atracción gravitatoria era una propiedad general de toda la materia, debida a que los cuerpos tienen masa (al igual que las fuerzas eléctricas se deben a la carga eléctrica de los cuerpos). Según esto, la interacción gravitatoria no se ejerce sólo entre los planetas, o entre la Tierra y otros cuerpos, sino también entre dos cuerpos cualesquiera.

A.23 Formulad hipótesis sobre de qué factores dependerá la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos; y proponed posibles maneras de contrastarlas.

• La contrastación experimental de esta hipótesis fue realizada por Cavendish, utilizando una «balanza de torsión», que puede medir fuerzas pequeñísimas y cuyo esquema es el de la figura.



Un pequeño giro de la cuerda debido a las fuerzas gravitatorias sobre m *produce un cambio en el haz de luz reflejado en el espejo, que se puede leer perfectamente en la escala.*

• Se obtuvo, $|\mathbf{F}| = G\ M\,.\,m\,/\,r^2$, siendo G una constante universal cuyo valor no depende del tipo de cuerpos que interaccionan ni del medio en que se encuentran. Cuando las masas se expresan en kg, la distancia en m y la fuerza en N, su valor es de $6'672.10^{-11}$.

• Pero la verdadera contrastación fue realizada por el propio Newton mediante cálculos basados en esta hipótesis: demostró que, si la fuerza gravitatoria entre la Tierra y la Luna era $F = G\ M\,.\,m\,/\,r^2$ (directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros) e iba dirigida hacia el centro de la Tierra, la Luna debería realizar un M.C.U.; y calculó el tiempo que debería tardar en dar una vuelta a la Tierra. El resultado fue, en aquella época, de ¡27 días!, muy próximo al valor hoy medido (27'3 días).

• Lo mismo puede ponerse a prueba, también, viendo si los resultados de su aplicación concuerdan con resultados bien establecidos experimentalmente. Así, ya sabemos que la caída de los cuerpos en ausencia de rozamiento es independiente de su masa. Por ello, será posible calcular el valor de dicha aceleración utilizando la hipótesis de Newton.

A.24 En *cinemática* vimos que la aceleración de caída en ausencia de rozamiento, no dependía de la masa del objeto que cae; y sabemos que experimentalmente se mide un valor de 9'8 m/s^2.

Utilizad la ley de la gravitación universal para calcular dicho valor y razonad por qué es independiente de la masa del cuerpo.

• Un modo muy útil de caracterizar «el poder de atracción» de un planeta en un punto es indicar la fuerza con que atraería a 1 kg de masa si se colocara en ese punto. Su valor coincide con el de la aceleración de caída libre de los cuerpos; y se denomina, de forma análoga, *gravedad* o *intensidad de la gravedad*, y varía con la distancia. Así, el valor de la intensidad gravitatoria de la Tierra en su superficie vale 9'8 N/kg (o m/s^2); a la altura en que se termina la troposfera (aproximadamente 10 km), 9'7 N/kg; a 500 km, su valor es de 8'4 N/kg; y a 36.000 km de la superficie terrestre, 0'2 N/kg.

Intensidad de la atracción gravitatoria en la superficie de diversos planetas

Planetas	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón
Gravedad (N/kg)(m/s^2)	3'78	8'60	9'78	3'72	22'88	9'05	7'77	11'00	(4'3)

E.7 Hallad el peso de una persona de 70 kg que se encontrara en la superficie de la Tierra, a 500 km y a 36.000 km; y la aceleración que tendría si estuviera en caída libre. ($G = 6'672.\ 10^{-11}$, si las masas se ponen en kg y la distancia en m; $M_T = 5'98.\ 10^{24}$ kg; $R_T = 6380$ km).

• Con todo, lo más sorprendente de la hipótesis de la gravitación universal (después *Ley*, tras ser contrastada positivamente) es que anulaba las diferencias entre el movimiento de los cuerpos terrestres y el de los celestes: *no hay ninguna diferencia entre el peso de un cuerpo y la fuerza que hace posible que la Luna gire alrededor de la Tierra.*

Es el momento, pues, de que contestemos a algunas cuestiones que nos planteamos a principio de curso:

Joaquín Martínez Torregrosa

A.25

a) Si la Tierra atrae tanto a una piedra que se lanza al aire como a la Luna, ¿por qué no cae la Luna sobre la Tierra igual que le ocurre a la piedra?

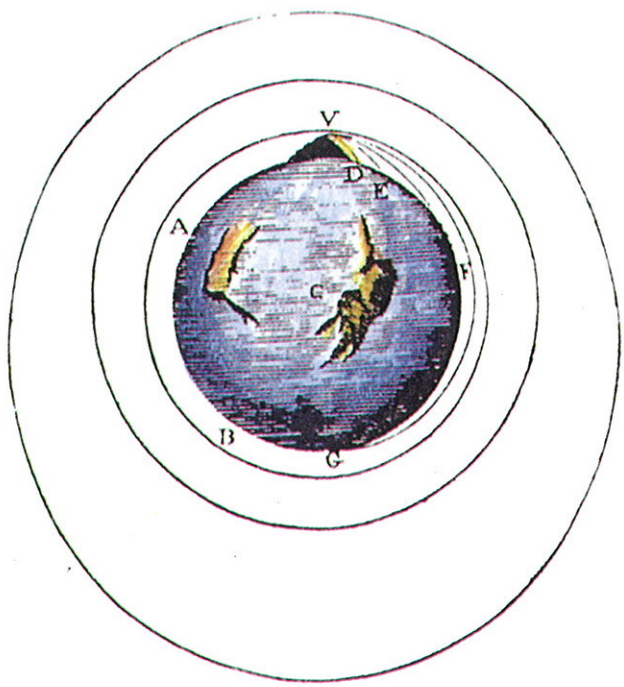
b) Señalad semejanzas y diferencias entre el movimiento de una persona que se lanza desde un avión y el de un astronauta en órbita alrededor de la Tierra, fuera de su nave.

c) ¿Qué haría falta para que una piedra describiera órbitas alrededor de la Tierra?

d) Ya hemos visto en cursos anteriores que los gases tienen masa, y, por tanto, serán atraídos por la Tierra; es decir, *pesan*. ¿En qué condiciones podría un globo de gas caer como una piedra?

El que los planetas puedan ser retenidos en sus órbitas es algo que podemos comprender fácilmente si consideramos los movimientos de los proyectiles. En efecto, una piedra arrojada horizontalmente sobre la superficie terrestre, por su propio peso, se ve forzada a abandonar la trayectoria rectilínea, viéndose obligada a describir una línea curva en el aire, y merced a este camino torcido se ve finalmente llevada al suelo. Cuanto mayor sea la velocidad con que se proyecta, más lejos va antes de caer a tierra.

Podemos suponer, por tanto, que si la velocidad se incrementa de tal modo que describa un arco de muchas millas antes de llegar a la tierra, finalmente excediendo los límites de la tierra, pasará totalmente sin tocarla, pudiendo girar alrededor de ella.



El párrafo y el dibujo de Newton expresan la conexión que estableció la Ley de gravitación universal *entre los movimientos de objetos en la Tierra y el movimiento de objetos celestes, como la Luna.*

E.8 Calculad el peso de la Luna (es decir, la fuerza con que la Tierra atrae a la Luna); y explicad por qué no cae, igual como hace una piedra. ($G = 6'672 \cdot 10^{-11}$ si las masas se ponen en kg y la distancia en m; $M_T = 5'98 \cdot 10^{24}$ kg; $M_L = 7'35 \cdot 10^{22}$ kg; distancia Tierra-Luna = $3'84 \cdot 10^8$ m).

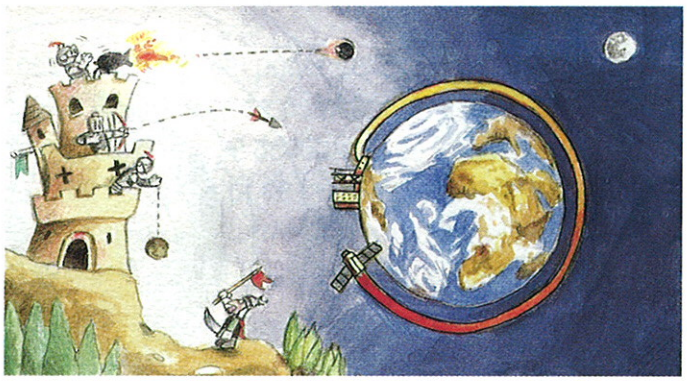
A.26 Recapitulad todo lo hecho con la hipótesis de la gravitación universal de Newton, y argumentad por qué se la considera la «pieza» que hace posible una explicación universal, unitaria, común, del movimiento de todas las cosas.

• La teoría de la gravitación universal tiene hoy una sólida base experimental, entre la que se cuenta la colocación de satélites artificiales alrededor de la Tierra o la precisión alcanzada en el envío de naves a otros planetas. Por otra parte, como toda teoría fecunda, no se limitó a explicar los hechos conocidos, sino que resultó ser, de inmediato, enormemente útil para resolver numerosos problemas astronómicos:

—Los cometas, cuerpos celestes que aparecen periódicamente en el firmamento, pasan cerca del Sol y vuelven a desaparecer a velocidades enormes.

—Las perturbaciones en las órbitas de los planetas, cometas y satélites pueden explicarse por la influencia gravitatoria de los demás cuerpos que forman el sistema solar.

—Las mareas no habían tenido una explicación satisfactoria hasta el advenimiento de la teoría de la gravitación universal. Newton explica las mareas mediante la acción gravitatoria conjunta del Sol y de la Luna sobre la superficie terrestre, lo que produce deformaciones apreciables en la superficie del mar.



2. PUESTA A PRUEBA DE LA EXPLICACIÓN INVENTADA.

• Aunque, a lo largo del desarrollo realizado hasta aquí, hemos puesto a prueba la validez de las hipótesis inventadas mediante su aplicación a casos sencillos e importantes, *vamos a completar esta constrastación de varias maneras:*

a) Verificando experimentalmente que la relación entre la fuerza resultante que actúa sobre un cuerpo y la aceleración de su movimiento es siempre constante.

b) Utilizando la capacidad predictiva de las ideas introducidas para plantear y solucionar problemas de interés sobre el movimiento de objetos sólidos y sobre fuerzas ejercidas en fluidos (líquidos y gases).

c) Analizando situaciones cotidianas donde parece no cumplirse los principios de la *Dinámica:* como lo que sentimos cuando nos encontramos en un autobús que arranca, que frena, que toma una curva, etc.

d) Reflexionando sobre en qué medida disponemos, como planteábamos al principio de curso, de una explicación «sencilla», común, universal del movimiento de todas las cosas.

2.1 VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LA RELACIÓN ENTRE FUERZA RESULTANTE Y ACELERACIÓN PARA UN MISMO CUERPO.

A.27 Proponed alguna forma de comprobar experimentalmente que, para un cuerpo dado, se cumple que $|\mathbf{F}_{res}| / |\mathbf{a}|$ = constante. Concretad detalladamente, en dicho diseño, cómo medir las fuerzas y las aceleraciones.

• En general, se trataría de centrar nuestra atención sobre un mismo cuerpo que realice movimientos con aceleración distinta, y cuyos valores podamos medir a partir de nuestros conocimientos de Cinemática, es decir, a partir de medidas de la posición y el tiempo. Simultáneamente, debe ser posible obtener el valor de la fuerza resultante, sobre dicho cuerpo, también de forma experimental.

Una situación en que podemos tener el movimiento de un mismo cuerpo con distintas aceleraciones es el movimiento rectilíneo de bajada de una bola de acero por un plano inclinado: para una inclinación dada, la bola se moverá con una determinada aceleración (ya comprobamos que se trataba de un M.R.U.A.). Con inclinaciones distintas, podemos conseguir que la bola se mueva con aceleraciones distintas. Según nuestras ideas sobre fuerza, la fuerza resultante que actúa sobre la bola irá en la dirección y sentido de la aceleración, y podemos hallar su valor si sujetamos la bola con un dinamómetro paralelamente al plano inclinado*.

El valor de la aceleración, para cada inclinación, podemos hallarlo a partir de la ecuación del movimiento. En nuestro caso, si elegimos el SR de modo que ponemos el reloj en marcha cuando soltamos la bola, y medimos la posición a partir del punto de partida (para $t = 0$, $e = 0$ y $v = 0$, la ecuación de la posición de la bola será $e = (1/2)\, a\, t^2$. Si conocemos qué posición ocupa la bola en un instante conocido, podemos sustituir sus valores en la ecuación anterior y hallar a. Si, por ejemplo, se obtiene que la posición es $e = l$, cuando el reloj marca t^*, entonces, $l = (1/2)\, a\, t^{*2}$, de donde $a = 2\, l / t^{2}$ **.

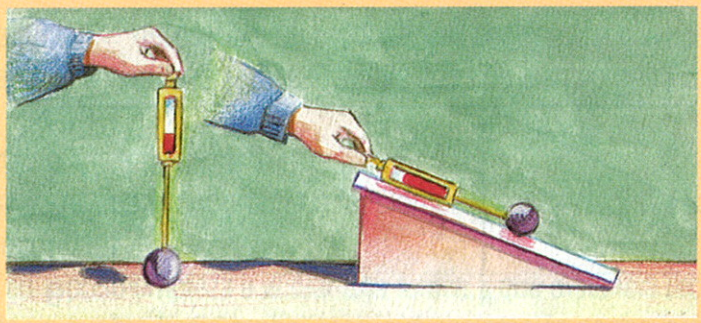
En la práctica, conviene elegir la posición lo más alejada posible del origen para poder medir el tiempo con comodidad. Podemos obtener así valores de $\mathbf{F}_{res}$ y aceleración para distintas inclinaciones y probar si existe una relación constante entre ellas *** .

* Debido a la inevitable existencia de rozamiento, debemos estirar de la esfera con el dinamómetro hasta que se mueva ligeramente hacia arriba. En ese momento la fuerza con que estira el dinamómetro de la bola será aproximadamente igual al valor de la fuerza resultante que empuja la bola hacia abajo.

** Al ser un movimiento rectilíneo, el valor absoluto de a coincide con el módulo de **a**. [*Ver el tema anterior.*]

*** Es necesario, no obstante, ser conscientes de que un experimento como éste no basta para validar una hipótesis tan importante como el Segundo principio de la Dinámica. Innumerables equipos de investigadores, durante muchos años, han realizado experiencias reiteradas y precisas para contrastar dicha hipótesis. La coherencia de todos los conocimientos desarrollados a partir de ella son la mejor prueba de su validez. La experiencia que se está diseñando debe considerarse, pues, como un apoyo más en favor de esta validez.

A.28 (*Opcional*) Realizad las experiencias proyectadas y analizad los resultados.



A.28.1 (*Opcional*) Los valores obtenidos por un grupo de alumnos al realizar esta experiencia (con l = 200 cm) son los que se muestran en la tabla. En caso de no disponer de valores propios, proceded al análisis de estos resultados.

Inclinación	1	2	3	4
|**F**| (N)	0'18	0'22	0'26	0'32
t (s)	1'8	1'6	1'4	1'2

2.2 UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD PREDICTIVA DE LOS «PRINCIPIOS» PARA PLANTEAR Y RESOLVER SITUACIONES DE INTERÉS.

• A partir de la ecuación fundamental (Segundo principio), $\mathbf{F}_{res} = m\,\mathbf{a}$, que expresa de un modo cuantitativo la idea de fuerza como causa de la aceleración, podemos realizar predicciones —y ponerlas a prueba— de gran interés:

—Si se conoce la aceleración de un móvil (o lo que deseamos que valga), podemos predecir el módulo, dirección y sentido de la fuerza necesaria para que sea posible dicha aceleración.

—Inversamente, cuando se saben las fuerzas que actúan sobre un objeto, se puede conocer su aceleración. Esto, junto con la velocidad, hace posible conocer qué tipo de movimiento tendrá el móvil y prever dónde se encontrará en cualquier instante futuro deseado.

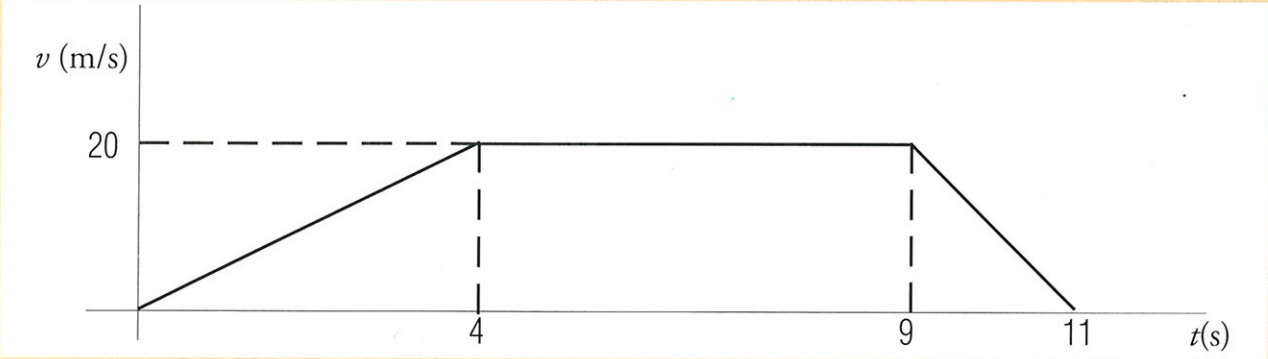
• *Vamos a concretar la capacidad predictiva y, después, exploraremos su aplicación a problemas concretos.*

2.2.1 FUERZAS SOBRE OBJETOS SÓLIDOS.

A.29 Queremos conseguir que un cuerpo de 600 kg que viaja en línea recta con v = 30 m/s se pare en 10 s. ¿Qué fuerza (módulo, dirección y sentido) deberíamos hacerle?

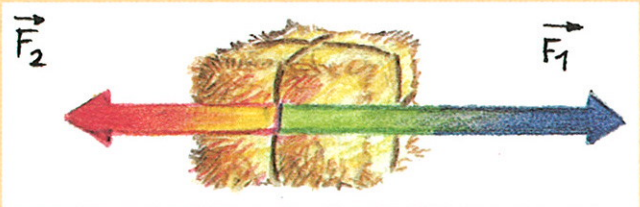
A.30 ¿Qué tensión tendrá el cable de una grúa que está elevando una carpa de 5 toneladas con velocidad constante?

A.31 La gráfica de la rapidez en función del tiempo para un móvil de masa 2 kg es la de la figura adjunta. Describid cualitativamente el movimiento y hallad el valor de la fuerza resultante en cada intervalo.



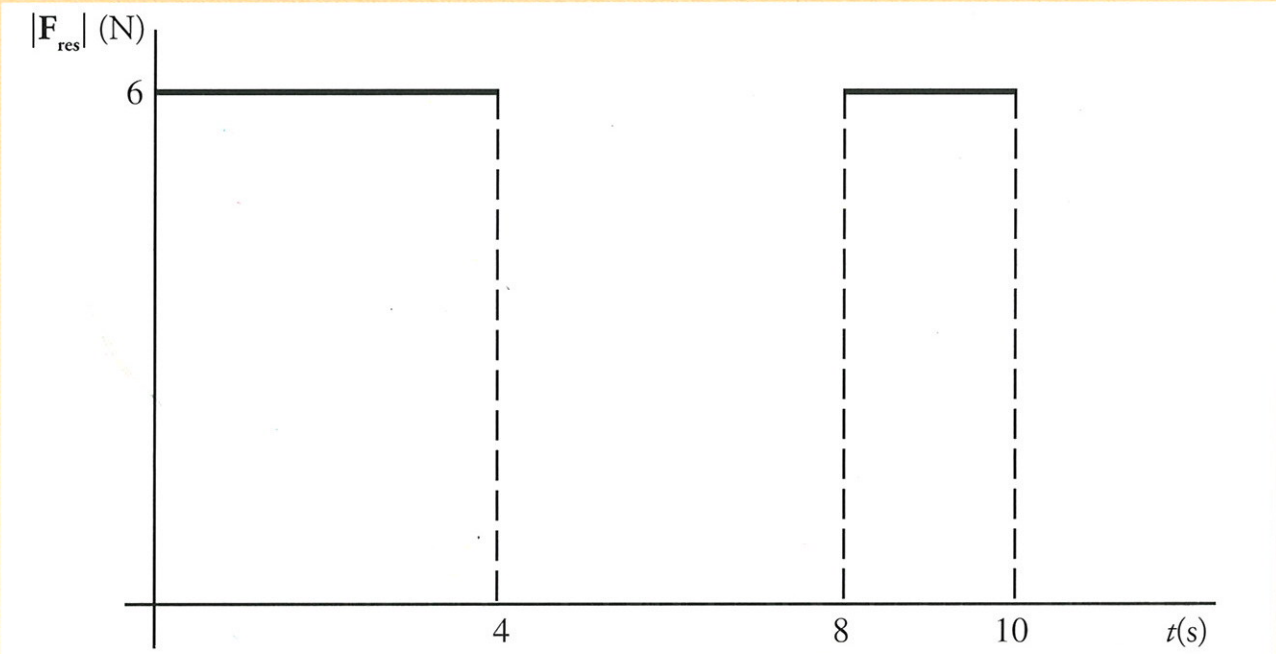
A.32 Sobre un bloque de 5 kg de masa, que se encuentra en reposo sobre una superficie sin rozamientos, comienzan a actuar a la vez dos fuerzas en sentidos contrarios $\mathbf{F}_1$ y $\mathbf{F}_2$, de 40 N y 20 N respectivamente, tal y como se observa en la figura adjunta. Se pide:

a) la aceleración adquirida por el bloque;
b) la rapidez alcanzada a los 10 s;
c) la posición al cabo de 10 s de comenzar a actuar dichas fuerzas;
d) si en ese instante cesa la fuerza $\mathbf{F}_1$, explicar qué le ocurriría al bloque a partir de ese momento.



A.33 La gráfica de la figura representa el módulo de la fuerza resultante de 6 N que actúa sobre un objeto de masa 2 kg que estaba inicialmente en reposo. En el tercer tramo, la fuerza actúa en sentido opuesto al de la velocidad.

a) Expresad cualitativamente el tipo de movimiento del cuerpo en los 10 primeros segundos y las gráficas de a y v en función del tiempo;
b) hallad la rapidez al final de cada uno de los tramos.



• El que sepamos hallar la $\mathbf{F}_{res}$ necesaria para producir una aceleración o la aceleración que adquiriría un cuerpo cuando sobre él actúan varias fuerzas, hace posible que nos planteemos situaciones problemáticas reales de interés; como:

a) ¿Podrá parar el coche antes de llegar al semáforo?
b) El cable de un ascensor puede soportar una tensión de valor limitado, ¿cuántas personas pueden subir en él con seguridad?
c) Sobre un cuerpo en reposo empieza a actuar una fuerza, ¿qué distancia recorrerá?
d) Una cuerda tira de un cuerpo hacia arriba, ¿con qué aceleración se moverá?

• *A modo de ejemplo se resuelve a continuación una de ellas* siguiendo la metodología ya expuesta en el tema anterior para problemas abiertos. La siguiente:

¿Qué distancia recorrerá un vehículo que frena, hasta pararse?

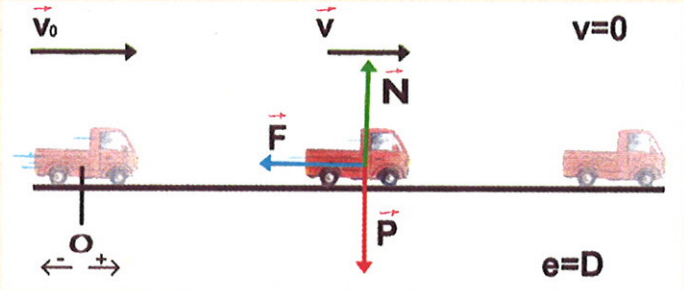
El cálculo de la distancia que recorre un móvil hasta pararse tiene un indudable interés. Por ejemplo, en el aterrizaje de los aviones o en el tráfico de vehículos en general (por carretera y ciudad), en donde interesa asegurar una distancia mínima de frenado para evitar accidentes. Ello lleva a limitar la velocidad máxima, a guardar una cierta distancia de seguridad entre vehículos, a perfeccionar los sistemas de frenos de los automóviles, a poner entre semáforos una distancia adecuada, etc.

a) Planteamiento cualitativo.

En este problema, un móvil lleva cierta velocidad inicial y frena hasta que se para, pidiéndosenos la distancia que recorre durante este proceso.

Las fuerzas que actúan sobre el móvil son tres: el peso, **P**; la fuerza normal ejercida por la carretera, **N**; y la fuerza de frenado en sentido contrario al movimiento, también ejercida por la carretera, **F**. Las dos primeras son perpendiculares a la trayectoria y se anulan entre si, mientras que **F** tiene la misma dirección que la trayectoria.

Para simplificar el problema, supondremos que la fuerza de frenado es constante, de modo que el movimiento será rectilíneo y uniformemente acelerado. Como la fuerza de frenado, **F**, tiene sentido contrario al movimiento, la rapidez inicial del móvil irá disminuyendo de manera lineal desde v_0 hasta 0.



La figura anterior representa un esquema de la situación, en donde podemos ver el punto que se toma como origen de posiciones, las fuerzas que se ejercen sobre el móvil y cómo la velocidad del mismo se va haciendo cada vez más pequeña hasta que se para.

En el problema se nos pide la distancia, D, que recorre el móvil desde que empieza a frenar hasta que se para, lo cual, si tomamos como origen de posiciones el punto O de la figura, y como sentido positivo el del movimiento, equivale a determinar el valor de la posición, e, en el instante en que la rapidez valga 0.

b) Formulación de hipótesis.

Podemos pensar que la distancia, D, va a depender de la rapidez a la que vaya el móvil en el momento en que empiece a frenar, de modo que, a igualdad de los restantes factores, cuanto mayor sea esta rapidez, mayor será la distancia que recorrerá hasta pararse.

Otro factor que ha de influir es la fuerza resultante de frenado que actúe sobre el vehículo. Parece evidente que, cuanto mayor sea dicha fuerza, menor distancia precisará para pararse (siempre a igualdad del resto de los factores).

Joaquín Martínez Torregrosa

También podemos pensar en la influencia de la masa. Algunas personas creen que, si tiene una masa muy grande, se parará antes, pero, si reflexionamos un poco, nos daremos cuenta de que sería al contrario, ya que sabemos, por ejemplo, que cuesta más parar un camión que circule a 100 km/h que una motocicleta a la misma velocidad: por tanto, cuanta mayor masa tenga, mayor será la distancia recorrida hasta parar.

Así pues, la distancia recorrida podrá expresarse en función de las magnitudes citadas:

$$D = f\ (\text{velocidad inicial } v_o,\ \text{masa } m,\ \text{fuerza de frenado } |\mathbf{F}|)$$

Además de aventurar la forma en que cabe esperar que influyan en D, podemos considerar alguna condición límite, como, por ejemplo, que si la fuerza resultante de frenado fuese nula no se pararía (es decir, la distancia D sería infinita), o que si v_o fuese cero, D tendría que valer 0 (ya que estaría parado).

c) Elaboración de estrategias.

Una posible estrategia de resolución es utilizar las ecuaciones cinemáticas y dinámicas correspondientes al movimiento del vehículo:

Al ser la trayectoria fija y conocida, podemos realizar un tratamiento escalar para resolver el problema. Si escogemos como origen de posiciones donde empieza a frenar; como origen de tiempos, el instante en que lo hace; y sentido positivo, el del movimiento, tendremos:

- Aceleración sobre la trayectoria (constante): $a = -|\mathbf{F}| / m$ [1]
- Rapidez del móvil en cualquier instante t del movimiento: $v = a\,t + v_o$ [2]
- Posición del móvil en cualquier instante t del movimiento: $e = a\,t^2/2 + v_o\,t + e_o$ [3]

La determinación de la distancia D (e en el instante en que se para) podríamos efectuarla mediante la ecuación [3] si supiéramos el instante t en que el móvil se para. Este último lo podemos hallar fácilmente haciendo $v = 0$ en la ecuación [2] y despejando t. Para ello, tendremos que calcular previamente la aceleración mediante la ecuación [1].

d) Resolución.

Siguiendo la estrategia propuesta, haciendo $v = 0$ en la ecuación [2], el tiempo, t, representará precisamente el instante en que se para:

$$0 = a\,t + v_o,$$

con lo que:

$$t = \frac{-v_o}{a}$$

Y sustituyendo ahora la aceleración, queda que:

$$t = \frac{v_o\ m}{|\mathbf{F}|}$$

Para determinar ahora D, sustituimos la expresión de t obtenida, en la ecuación [3]:

$$D = \frac{v_0^2 \cdot |\mathbf{F}|}{m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|\mathbf{F}|}{m} \cdot \frac{v_o^2 \cdot m}{|\mathbf{F}|^2}$$

De donde se llega finalmente al resultado:

$$D = \frac{m \cdot v_o^2}{2\,|\mathbf{F}|}$$

Joaquín Martínez Torregrosa

Si, por ejemplo, se tratara de un automóvil de 1.000 kg de masa que se mueve a 108 km/h frenando con una fuerza constante de 750 N, la sustitución de los datos conduciría a D = 60 m.

e) Análisis de resultados.

Si analizamos el resultado del problema que estamos resolviendo, podemos darnos cuenta, en primer lugar, de que el valor numérico obtenido (60 m) parece normal, es decir, está de acuerdo con nuestras experiencias cuando frena un automóvil. Si hubiese sido 0'6 m o 6.000 m habría que dudar y revisar el problema.

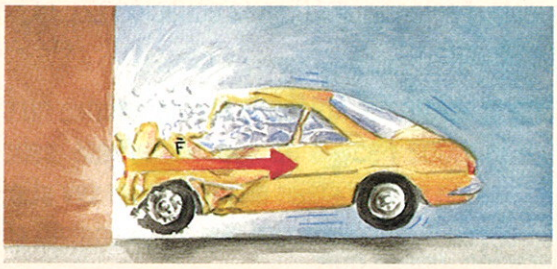
Si nos detenemos en el resultado literal,

$$D = \frac{m \cdot v_o^2}{2\,|\mathbf{F}|}$$

podemos ver que en la ecuación se contemplan las hipótesis de partida y que, cuando la masa y/o la rapidez inicial aumentan (para una cierta fuerza de frenado), la distancia, D, necesaria para pararse, también aumenta, con lo que se comprende la necesidad de limitar la velocidad máxima a la que pueden circular los vehículos, especialmente los de gran tonelaje; también es posible comprobar que, si la fuerza de frenado, $|\mathbf{F}|$, aumenta (manteniendo fijas la masa y la rapidez inicial), D disminuirá, con lo que se comprende la conveniencia de diseñar sistemas de freno eficaces; e igualmente, que si $v_o = 0$, la distancia sería 0, etc.

Además, este resultado nos permite aprender que, en contra de lo que piensan algunas personas, si la rapidez inicial con que se mueve un vehículo se duplica, la distancia que recorre hasta pararse no se hace también doble, sino *cuatro veces mayor*, ya que la rapidez inicial, en la expresión que hemos obtenido para el cálculo de D, está elevada al cuadrado, es decir, es la variable que más influye.

En el caso que estamos considerando, podemos plantearnos, a la luz del resultado obtenido, nuevos problemas de interés práctico, como por ejemplo: «¿qué fuerza se ejerce sobre un coche en un choque frontal contra un obstáculo?»



Para determinarla, basta con despejar $|\mathbf{F}|$ en la ecuación anterior, teniendo en cuenta que, si el obstáculo es fijo y grande (por ejemplo, un muro), la distancia recorrida se reduce a lo que da de sí la carrocería del vehículo al aplastarse. Así, si suponemos D = 2 m, la fuerza sería:

$$|\mathbf{F}| = \frac{m\,v_o^2}{2D} = \frac{1.000 \cdot 900}{4} = 225.000 \text{ N}$$

La fuerza ejercida sobre el coche resulta ser casi igual que el peso de 23.000 kg, lo que permite comprender las consecuencias fatales de un choque frontal a esa velocidad. El problema se agrava cuando, en lugar de chocar contra un muro, choca contra otro vehículo que circula en sentido contrario, ya que, en este caso, v_o sería la suma de los módulos de ambas velocidades.

A.34 Siguiendo esta misma metodología, resolved alguna otra de las situaciones problemáticas planteadas; por ejemplo:

El cable de un ascensor puede soportar una tensión de valor limitado, ¿cuántas personas pueden subir en él con seguridad?

• Un campo de aplicación, y de puesta a prueba, de la potencia de la dinámica newtoniana, de especial interés, es el del estudio de las fuerzas en fluidos (líquidos y gases), tanto las que ejerce un fluido sobre objetos en reposo que están en contacto con él (flotación, paredes de recipientes...),y las que ejercen objetos en movimiento respecto al fluido (navegación marítima y aérea, aerodinámica, tuberías y oleoductos, etc.), como las que se ejercen entre partes del mismo fluido (tormentas y remolinos, vientos..: meteorología). Dado que, además, somos «buzos en un mar de aire», el interés práctico de este estudio es inmenso y, actualmente, se trata de uno de los campos de la Física donde se realiza más investigación.

• Por su gran interés y extensión, *al estudio de las fuerzas en fluidos en reposo, le dedicaremos el tema siguiente.*

2.3 ANÁLISIS DE SITUACIONES COTIDIANAS DONDE NO PARECEN CUMPLIRSE LOS PRINCIPIOS DE DINÁMICA.

A.35 Interpretad la sensación que percibe un pasajero en el interior de un autobús en las situaciones siguientes:

—se está moviendo con M.R.U.;
—frena;
—aumenta su velocidad sin cambiar de dirección;
—toma una curva con rapidez constante.

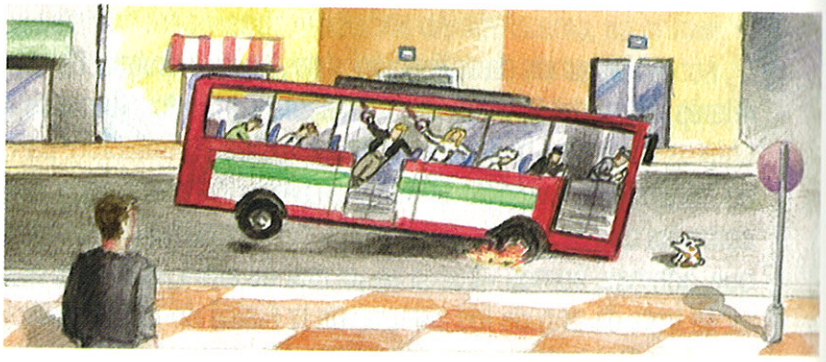
• Mientras el autobús se mueve con velocidad constante (M.R.U.), tanto el conductor como el peatón coincidirán en afirmar que al viajero no le ocurre nada: éste se mueve con la misma velocidad que el autobús, en la misma dirección y en el mismo sentido; sobre él la fuerza resultante es nula. Ahora bien:

—*¿Qué diría cada uno si, de repente, el autobús frenase?*

Si no existe fuerza de rozamiento, aunque el autobús frene, las fuerzas que actúan sobre el viajero de pie en el medio del autobús son la fuerza *peso* hacia abajo (ejercida por la Tierra) y la fuerza *normal* hacia arriba que le hace el suelo del vehículo. Ninguna de ellas cambia por el hecho

de que el autobús frene o no, y ambas se anulan entre sí. Sin embargo, el viajero, en el momento en que comienza la frenada, se desliza por el suelo del autobús hacia adelante y, si no se agarrase a algo, acabaría estrellándose contra la parte delantera.

El peatón interpreta perfectamente este hecho ya que, para él, como sobre el viajero no se ejerce ninguna fuerza resultante, de acuerdo con los principios de dinámica éste ha de seguir con la velocidad que llevaba (mismo valor, dirección y sentido) hasta que finalmente «alcanza» al conductor que, al estar amarrado al asiento, no se desliza.

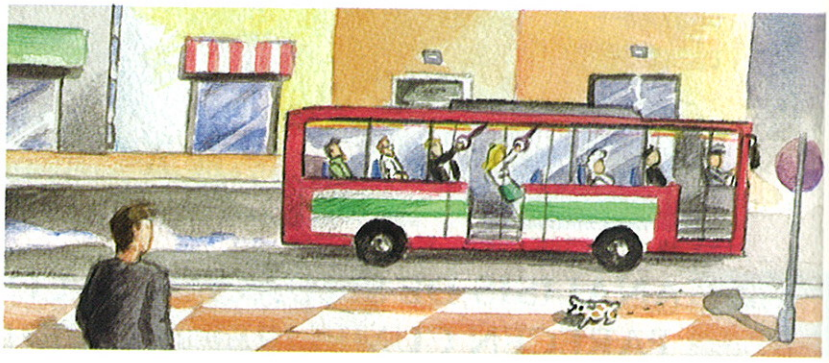


Por el contrario, si preguntamos al conductor, éste diría que el viajero primero estaba en reposo y, luego, se ha puesto en movimiento hacia él. No obstante, no sería capaz de contestar qué fuerza ha producido ese cambio de movimiento.

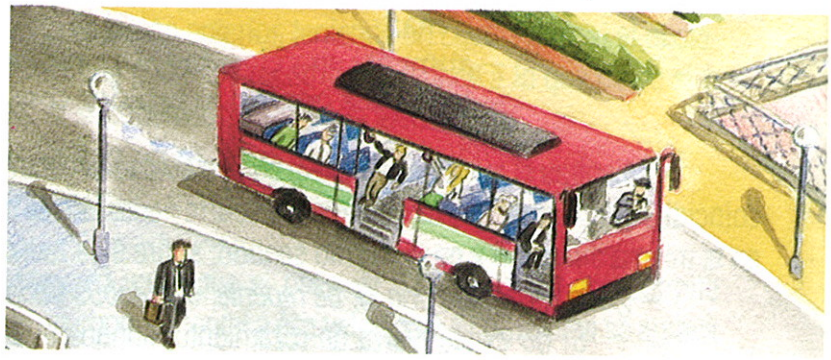
Por tanto, en el autobús frenando, no se cumplirían los principios de dinámica. Se dice entonces que se trata de *un sistema de referencia no inercial.*

—*¿Qué ocurriría si el autobús, en lugar de frenar, aumentara la velocidad?*

Mediante un razonamiento similar al anterior, de nuevo vemos que, para el peatón, el viajero se limitaría a seguir con la misma velocidad inicial, pero, como el autobús se mueve cada vez más rápido, sería ahora la parte trasera del mismo la que «alcanzaría» al viajero. Éste notaría cómo se iría hacia atrás, pero, claro está, nadie le estaría empujando.



—*En el caso del autobús que toma una curva,* para el peatón, en el momento en que el vehículo toma la curva, lleva una velocidad tangente a la misma y en el sentido del movimiento. El pasajero, que está dentro del vehículo, lleva esa misma velocidad. Sin embargo, al girar el volante, debido al rozamiento con el suelo, sobre el vehículo se ejerce una fuerza que hace que su velocidad cambie de dirección y que permite tomar la curva sin salirse de ella. Si el pasajero no se halla sujeto, seguirá, no obstante, con la misma velocidad que llevaba al entrar en la curva, hasta que la pared del vehículo se lo impida.



2.4 ¿DISPONEMOS DE UNA EXPLICACIÓN UNITARIA, UNIVERSAL, DEL MOVIMIENTO DE TODAS LAS COSAS?

• Una vez probada la enorme potencia de las ideas introducidas para plantear y resolver problemas de interés con objetos sólidos y fluidos, *vamos a recapitular todo lo avanzado hasta aquí, para analizar en qué medida hemos construido lo que deseábamos: una explicación universal para el movimiento de todos las cosas.*

A.36 Revisad el tema «Qué vamos a estudiar y por qué», y resolved las actividades **A.2** y **A.3** del mismo.

Comparad lo que se piensa ahora con las respuestas que, en su día, se dieron a las mismas actividades por las personas encuestadas y por la clase. Valorad el cambio producido.

• Como vimos en dicho tema, la inmensa mayoría de las personas piensan espontáneamente que existen diferencias insalvables entre los movimientos de objetos tan distintos como la Luna, una piedra o un globo de hidrógeno. Sin embargo, a lo largo de este curso, hemos intentado, yendo en contra de lo que parece evidente, elaborar una explicación del movimiento que fuera común para cualquier objeto.

• Para ello, nos propusimos, en primer lugar, caracterizar y diferenciar unos movimientos de otros mediante magnitudes que no dependieran en absoluto de la naturaleza de los cuerpos que se mueven.

Una vez identificado cualquier movimiento de esta manera, nos planteamos la cuestión de qué es lo que hacía que un movimiento fuera de un tipo determinado y no de otro. Es decir, qué hacía falta para que el movimiento de un cuerpo sea de una forma determinada.

Para encontrar una respuesta común a todos los objetos, hemos debido:

a) inventar la idea de fuerza como causa de la aceleración (en contra de la asociación fuerza/velocidad que parece «obvia» desde nuestras experiencias espontáneas);

b) superar la idea de que hay cuerpos que pueden acelerarse a sí mismos y otros que no, introduciendo la hipótesis de que, para que haya aceleración, para que actúe una fuerza sobre cualquier cuer-

po, es necesario que interaccione con otro. Esto nos «ha obligado» —para explicar el movimiento con aceleración de cuerpos sobre los que no veíamos «contactos» directos— a formular la hipótesis, revolucionaria en su momento, de la existencia de una interacción universal —la atracción gravitatoria— entre dos cuerpos cualesquiera, que es la causante de las fuerzas que hacen que los movimientos de satélites, cometas y planetas sean como son (la causante, en fin, del funcionamiento de la «máquina celeste») o de que un cuerpo lanzado al aire caiga como lo hace.

• Todo ello nos ha permitido interpretar el movimiento de cualquier objeto basándonos en los mismos conceptos y principios

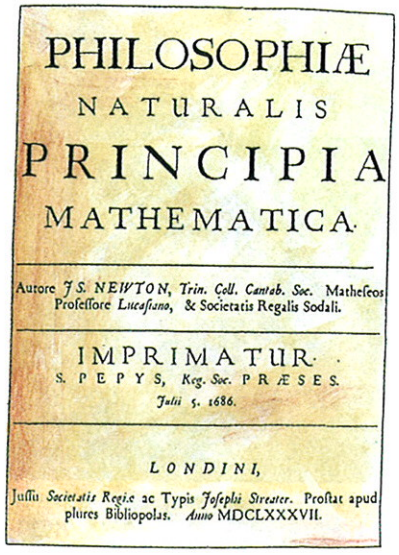
A.37

a) Explicad por qué los movimientos de un globo de hidrógeno y una piedra, cuando se sueltan de la mano, son diferentes. ¿Cómo podría conseguirse que el globo cayera como una piedra?

b) ¿Por qué no caen al suelo la Luna o un astronauta, como ocurre con una piedra que lanzamos al aire o con un paracaidista? ¿Cómo podría conseguirse que un trozo de acero estuviera en órbita alrededor de la Tierra, como la Luna?

• La «síntesis newtoniana», supuso, pues, un edificio intelectual impresionante, considerándose, durante más de dos siglos, que el mundo, tanto el terrestre como el celeste, era una máquina cuyo funcionamiento se basaba en los principios newtonianos. Su éxito en la aplicación a problemas prácticos fue también enorme: aún, hoy día, los cálculos para construir puentes, carreteras, edificios, presas, oleoductos, barcos o aviones se basan en la mecánica. Al mismo tiempo, se utiliza también para planificar y predecir los movimientos de las naves espaciales que viajan por el Sistema Solar.

No es de extrañar, pues, que los siglos XVIII y XIX tuvieran una gran influencia en la evolución del modo de pensar de la sociedad occidental. No en vano (como señala B. Cohen), hasta la publicación de los *Principia* de Newton, en 1687, los cometas, por ejemplo, habían sido considerados como sucesos extraordinarios, portentos o signos de un dios enojado; pero Newton señaló que eran como los planetas y que muchos de ellos se moverían en órbitas elípticas, por lo que debían volver, a intervalos regulares y predecibles de tiempo, desde las regiones del espacio exterior al centro del Sistema Solar.


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

• Halley utilizó la teoría newtoniana para predecir el paso del cometa al que, posteriormente, se le dio su nombre (tiene un periodo de 75 años) y ¡«se presentó» en la fecha prevista! En su momento, la concepción newtoniana del mundo supuso, en buena medida, la victoria del racionalismo sobre la superstición.

A.38 Señalad problemas abiertos e indicad situaciones en las que la mecánica newtoniana pueda tener limitaciones.

• En este curso, para poder avanzar hemos realizado simplificaciones que dan lugar a problemas abiertos para un estudio posterior: no hemos considerado objetos extensos, con posibilidad de girar, ni el movimiento de sólidos en fluidos... El propio «mecanismo» (es decir, cómo se transmite) de las interacciones «a distancia», como la gravitatoria o la eléctrica, es un gran problema abierto.

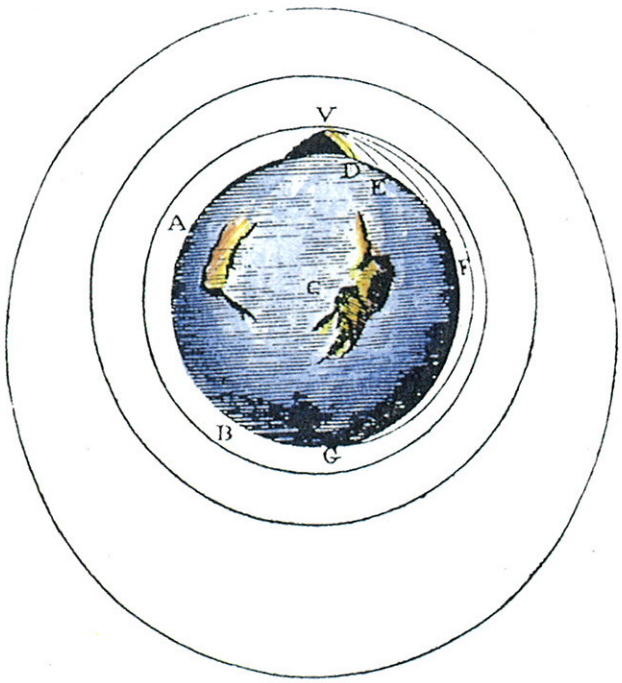
• La mecánica newtoniana, como toda teoría física, tiene sus límites de validez, que se hicieron evidentes a finales del siglo XIX, en las escalas de «lo muy grande» y «lo muy pequeño». En efecto, en el interior de los átomos y en las regiones del Universo donde las fuerzas gravitatorias alcanzan intensidades gigantescas y se suceden los grandes cataclismos cósmicos (generación de nuevas estrellas, supernovas, agujeros negros, origen del Universo, etc.), las ideas newtonianas no son aplicables o conducen a resultados que difieren mucho de los obtenidos experimentalmente. No se refiere, tampoco, a la luz, ondas electromagnéticas (radio, T.V.,) o dispositivos electrónicos.

• Hay que mencionar, nada más, que, a escala del Universo y de las grandes velocidades, la mecánica newtoniana ha sido sustituida por la mecánica relativista de Einstein; y que, para explicar el comportamiento atómico, ha sido necesario inventar una nueva mecánica, la mecánica cuántica.

Ambas teorías suponen una ruptura drástica con las ideas en que se había basado la física hasta principios del siglo XX, pero se construyeron a partir, o en contra, de la mecánica newtoniana.

Y los avances actuales en amplios campos de la física se basan en el desarrollo de dichas teorías.

• No obstante, a pesar de sus limitaciones, dentro de su amplísimo campo de validez (que hemos relatado escuetamente), la mecánica newtoniana sigue «funcionando» perfectamente.



Este dibujo ilustra la superación de la barrera entre el movimiento de los cuerpos celestes y el de los objetos en la superficie terrestre. Es un símbolo, pues, de una de las finalidades de la ciencia moderna: la de encontrar explicaciones cada vez más universales y unitarias del mundo. En este sentido, la mecánica newtoniana, es el primer gran ejemplo de teoría científica moderna.

Joaquín Martínez Torregrosa

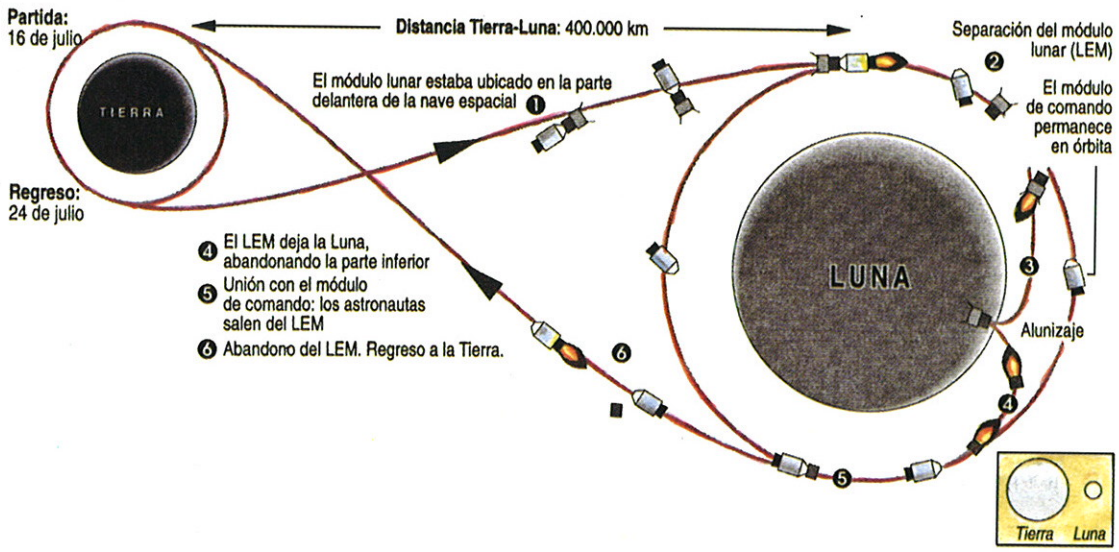
3. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS.

A.39 Haced un seguimiento de noticias de la prensa relacionadas con la gravitación (viajes espaciales...), e identificad posibles errores que se cometan.

A.40 Comentad el texto que describe un viaje a la Luna».

Imagina el cohete Saturno saliendo de la rampa de lanzamiento en el Centro de Vuelos Espaciales Kennedy, en Cabo Cañaveral, EE.UU. Asciende sobre la Tierra, pasa a través de la atmósfera y se aleja.

Sucesivos fragmentos del cohete se desprenden, dejando una cápsula viajando a través del espacio prácticamente vacío. Aproximadamente 65 horas después del despegue, la cápsula llega a su destino a 384.000 km de distancia, rodea la Luna y desciende hasta el centro del cráter lunar Copérnico.



EL PAÍS

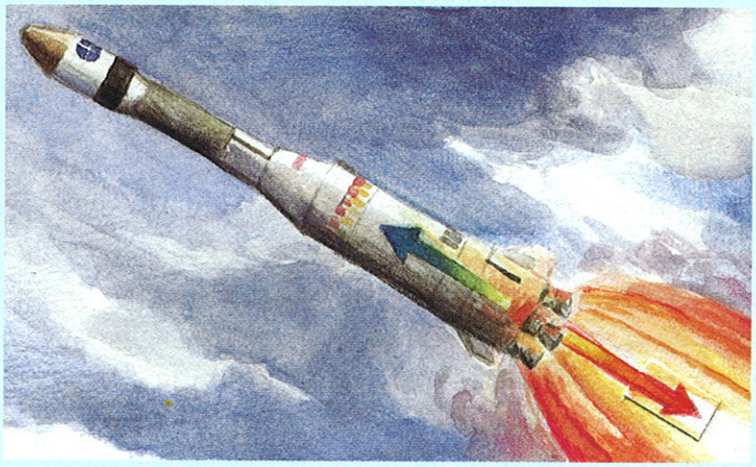
La complejidad de un viaje de estas características es enorme. Para dirigir y guiar el vuelo, se han de tener en cuenta una gran cantidad de factores. El rozamiento con la atmósfera durante la primera parte del vuelo depende de la velocidad del cohete y de la altitud. El empuje del motor varía con el tiempo. Las fuerzas gravitatorias del Sol, de la Tierra y de la Luna cambian según la cápsula varía su posición relativa a ellos. La masa del cohete varía según se va quemando el combustible.

Además, se lanza desde una Tierra que está girando sobre sí misma, y que, a la vez, da vueltas alrededor del Sol. Mientras tanto, la Luna se mueve alrededor de la Tierra a una velocidad de unos 1.000 m/s respecto a la Tierra.

A pesar de ello, como cualquier movimiento complejo, el viaje espacial se puede descomponer en pequeñas partes, cada una de las cuales es relativamente simple.

De manera simplificada, el viaje Tierra-Luna se puede descomponer en ocho partes o pasos:

1. El cohete acelera verticalmente hacia arriba desde la superficie de la Tierra. La fuerza que actúa sobre el cohete no es realmente constante, y la masa del cohete disminuye mientras se quema el combustible. Se puede valorar la aceleración en cualquier instante utilizando la segunda ley de Newton. El valor viene dado por la razón entre la fuerza resultante (el empuje que producen los gases menos el peso) en ese instante y la masa en el mismo instante.



2. El cohete, aún acelerando, sigue una trayectoria curvilínea mientras se va incorporando a una órbita alrededor de la Tierra.

3. En una órbita a 185 km sobre la superficie de la Tierra, la cápsula se mueve según una línea aproximadamente circular. Su velocidad es constante y tiene un valor de 7.769 m/s.

4. Los motores del cohete se conectan de nuevo, aumentando la velocidad de la cápsula, de forma que sigue una trayectoria en el espacio con curvatura mucho menor. La velocidad mínima necesaria para escapar de la Tierra completamente es de 11.027 m/s.

5. En el viaje entre la Tierra y la Luna, el rumbo se mantiene con precisión mediante pequeñas explosiones ocasionales de los cohetes de la cápsula. En los intervalos entre estas fuerzas correctivas, la cápsula se mueve bajo la influencia de las fuerzas gravitatorias de la Tierra, la Luna y el Sol. Sabemos, por la primera ley de Newton, que, sin estas fuerzas, la cápsula se movería con velocidad constante en línea recta.

6. Al acercarse a la Luna, los motores se conectan de nuevo para proporcionar a la cápsula la velocidad adecuada que le permita «entrar» en una órbita circular alrededor de la Luna.

7. La cápsula se mueve a velocidad constante, en una trayectoria aproximadamente circular, a 80 km de la superficie lunar.

8. Los motores del cohete se encienden en la dirección del movimiento para reducir la velocidad. La cápsula, entonces, acelera en sentido descendente mientras cae hacia la superficie de la Luna. Sigue una trayectoria curva hacia el lugar elegido de alunizaje. Justo antes del impacto, los motores del cohete se encienden por última vez para reducir la velocidad de caída y evitar un alunizaje brusco.

El éxito de este viaje es una prueba más de la validez de la mecánica newtoniana.

A.41 Comentad el texto adjunto que describe el funcionamiento del *airbag* de los coches.

El airbag es una especie de globo empaquetado en una pequeña caja instalada en el centro del volante. Cuando se produce la colisión, la bolsa se infla y forma un cojín de aire entre el pecho y cabeza del conductor y el volante. El inflado debe ser, y es, muy rápido. El gas, aunque llamado aire, es nitrógeno, y del mismo se producen unos 27 litros por la descomposición explosiva de un compuesto: azida de sodio.

Cuando hay una repentina aceleración, de unos 100 m/s^2, o más, se conecta un dispositivo eléctrico (en la parte anterior del vehículo) que origina una detonación en la cápsula donde está la azida de sodio. Su combustión explosiva produce el gas, y la bolsa queda completamente inflada unos 0'04 segundos después de que la parte delantera del coche golpee un obstáculo. Esto puede parecer extremadamente rápido, y lo es, pero, teniendo en cuenta el tiempo total de duración del choque, veremos cómo no resulta serlo tanto.

Si reflexionamos, nos daremos cuenta de que el *airbag* sólo tiene una función: repartir la fuerza sobre el pecho y la cabeza de la persona. Y sólo eso aumenta las posibilidades de supervivencia. Pero, además, al diseñar el sistema completo, las compañías automovilísticas prestan atención, por lo menos, a dos factores adicionales que pueden reducir las lesiones de la persona.

Uno de ellos es la distancia que recorre la persona mientras se produce la aceleración, que ha de ser la mayor posible. Así, cuanto mayor sea la distancia para un determinado cambio de velocidad, menor será la fuerza.

El otro consistirá en evitar los máximos en el valor de la fuerza sobre la persona, que pueden ser especialmente perjudiciales. Se trata, por tanto, de conseguir que la aceleración de frenado de la persona sea lo más uniforme posible.

Una de las formas de conseguir aumentar la distancia hasta que se detiene la persona (además de las que tienen en cuenta el diseño de la parte frontal del vehículo, que se ha de aplastar, y lo que se puede acortar la barra de sujeción del volante) es el vaciado del *airbag*. Completamente lleno, tiene un espesor de unos 30 cm entre el cuerpo y el volante, mientras que, después del vaciado que se produce durante el proceso de aceleración, quedan sólo 8 cm, lo que supone una distancia adicional.

No obstante, la mayor distancia de frenado así conseguida puede no ser suficiente para evitar el golpe de la cabeza de la persona contra el cristal delantero. Por esto, se completa el sistema de seguridad con un panel deformable, montado bajo el salpicadero, que, mientras se deforma unos 15 cm, presiona sobre las rodillas e impide que la persona alcance el cristal.

Se pueden hacer estimaciones a partir de los valores obtenidos con pruebas hechas con simuladores:

En una colisión a 48 km/h (13'41 m/s) contra una barrera de cemento, equivalente a la de dos coches de igual masa viajando a esa velocidad, el aplastamiento de la parte frontal del vehículo podría ser de unos 0'70 m. Con estos datos se obtiene que la aceleración del coche durante el golpe es de 128 m/s^2, siendo, por tanto, 0'10 segundos el tiempo total en que se puede estimar la duración del choque.

En los primeros 0'04 s en que acaba de inflarse el *airbag* (fases *a* a *b* de la figura), la persona ya ha reducido su distancia al volante desde unos 0'36 m iniciales hasta 0'26 m, puesto que el coche ha empezado a aplastarse y la persona todavía continúa su movimiento a la velocidad inicial (13'41 m/s). A partir de este momento, se produce el movimiento de frenado de la persona (fases *b* a *c* de la figura), durante el cual el *airbag* va desinflándose, la barra del volante se acorta, y el coche completa su deformación. Todo ello supone para la persona un recorrido de unos 0'65 m, con una aceleración de 138 m/s^2, y una fuerza de 5.540 N, calculada suponiendo su masa de 40 kg.

[Texto basado en *The Air Bag: An Exercise in Newton's Laws*. The Physics Teacher.]

COLCHÓN DE AIRE

Se puede construir un colchón de aire, como el que aparece en las fotografías de la página 75, en que una alumna se desliza sin apenas rozamiento, siguiendo las siguientes especificaciones técnicas:

Materiales:

—Tablero circular de conglomerado de 90 cm de diámetro y 1'8 cm de espesor.

—Lámina de plástico flexible de 2 o 3 mm de espesor (puede utilizarse el plástico que se pone como suelo sintético). Será necesario, al menos, un cuadrado de 1 m^2.

—Tubo rígido de PVC (del que se utiliza para cañerías de desagüe) de 10 cm de longitud y 4 cm de diámetro insertado en una base plana hembra, también de PVC, que se pega al tablero de conglomerado.

—Cubiertas de rueda de bicicleta de longitud suficiente (unos 3 m) para rodear el tablero de conglomerado.

—Tornillos, grapas, pegamento, etc.

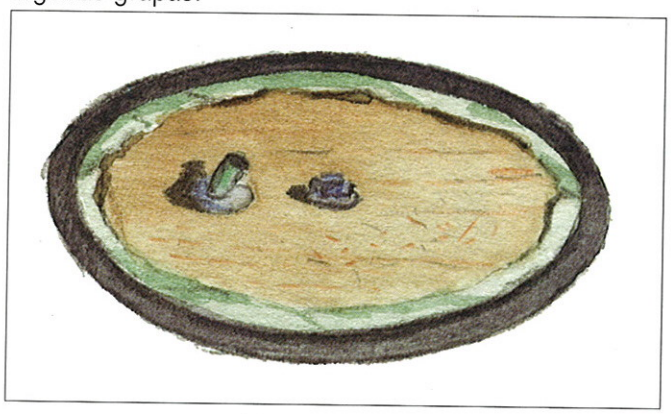
—Soplador de aire que posea, al menos, las siguientes prestaciones: un caudal de aire de 2'8 m^3/min, y una presión equivalente a la de una columna de agua de 560 mm. Este tipo de sopladores son turbinas que alcanzan las 16.000 r.p.m. y se utilizan, por ejemplo, para la limpieza de radiadores. Pueden encontrarse en buenas ferreterías.

Instrucciones de montaje:

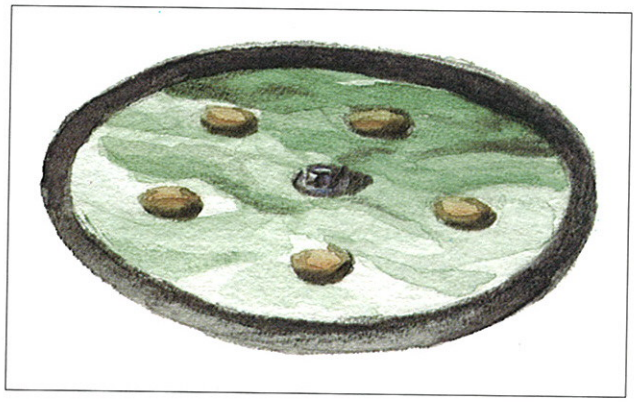
La lámina de plástico cubrirá la cara inferior del tablero y el sobrante se doblará sobre la cara superior fijándolo con grapas y pegamento. A esta lámina se le recortarán cinco círculos de 12 cm, tal y como aparecen en la figura, y la lámina se fijará, por su parte central, al tablero con un tornillo que quede embutido en una arandela de plástico o similar.

En el tablero se abrirá un orificio de 4 cm de diámetro y, alrededor de él, se fijará la base plana con los 10 cm de PVC por donde entrará el aire del soplador. Este orificio deberá quedar situado entre dos de los círculos recortados en la lámina de plástico.

Las cámaras de rueda de bicicleta se insertarán rodeando el tablero con la lámina de plástico. Si quedarán muy sueltas y existiera la posibilidad de desprenderse, se pueden fijar por la parte superior con algunas grapas.



Vista superior



Vista inferior

PON A PRUEBA

P.1 Analizad las proposiciones siguientes:

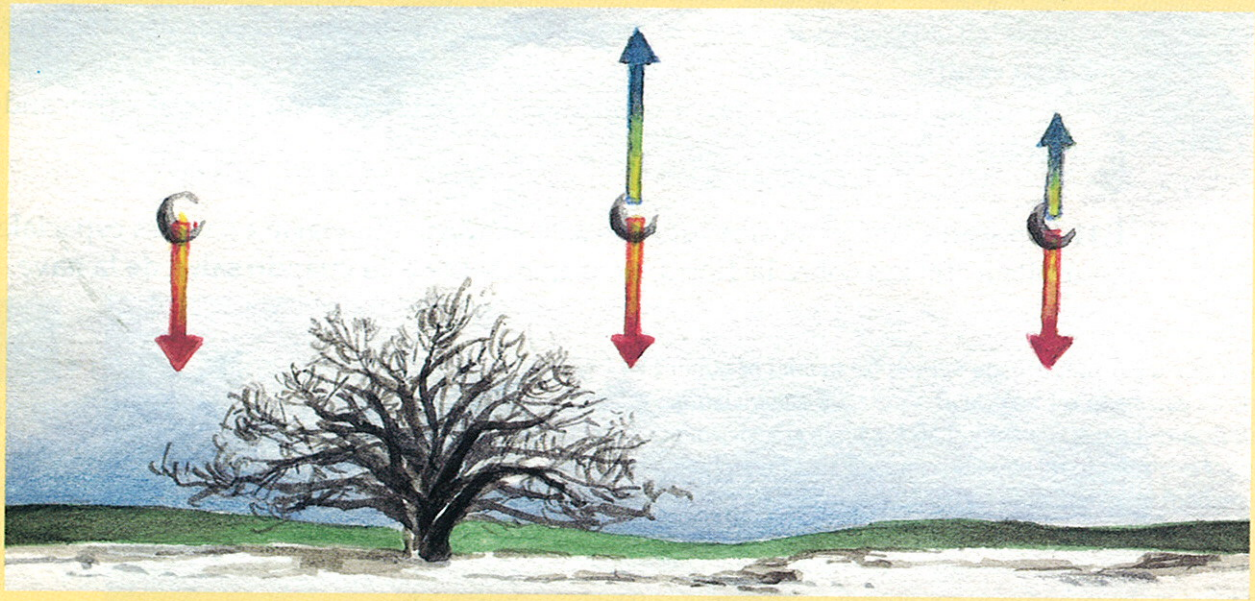
a) «Si fuera cierto que, para que un cuerpo se mueva en línea recta y con velocidad constante, no es necesaria ninguna fuerza, los cuerpos no se pararían nunca después de dejar de empujarlos o de lanzarlos sobre una superficie horizontal. Por el contrario, sabemos que se paran. En consecuencia, no se puede admitir, ni siquiera como hipótesis, la concepción anterior».

b) «Para conseguir que un cuerpo se mueva con velocidad constante por el suelo del aula se ha de aplicar, continuamente, una fuerza».

P.2 ¿Podríamos aceptar la siguiente idea: «Cuánto más rápido es el movimiento de un cuerpo, mayor es la fuerza que debe estar actuando sobre él»?

P.3 Interpretad detenidamente el hecho de que g no depende de la masa del cuerpo que cae. ¿Quiere esto decir que la Tierra (o, mejor, que la fuerza entre la Tierra y cualquier cuerpo) atrae con la misma fuerza a todos los cuerpos independientemente de su masa?

P.4 Se lanza una piedra desde el suelo verticalmente hacia arriba. Considerando nulo el rozamiento, señalad con una cruz cuál de los siguientes esquemas representa correctamente las fuerzas que actúan sobre ella poco antes de que alcance su máxima altura.



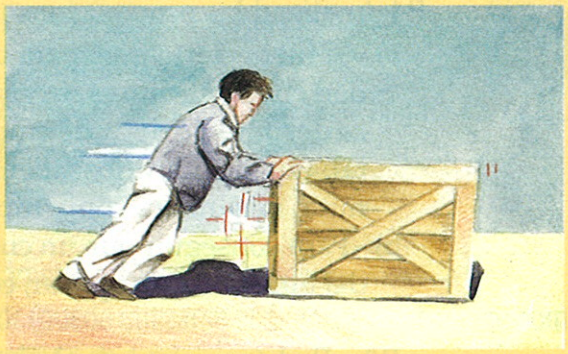
P.5 Dad argumentos, basados en la concepción de fuerza que hemos elaborado, que permitan rechazar la idea de que los cuerpos sobre los que no actúa ninguna fuerza acaban parando.

P.6 Indicad cómo habría que actuar sobre un objeto, para, sin cambiar la rapidez de su movimiento, conseguir que describiera una trayectoria circular.

P.7 Para poder mover el bloque de la figura, que se encuentra en reposo sobre el suelo, es necesario hacer una fuerza paralela a la superficie de, como mínimo, 400 N.

Un alumno empuja dicho bloque con una fuerza constante de 500 N, tal y como se muestra en la figura adjunta. Podemos afirmar, entonces, que la fuerza que hará el bloque sobre el alumno, mientras éste siga empujando, será:

a) menor de 500 N;
b) igual a 500 N;
c) mayor de 500 N.



P.8 Imaginad cuál sería el comportamiento de los cuerpos en la Tierra si no existiera rozamiento.

P.9 Sabiendo que la Tierra se encuentra en movimiento, intentad explicar por qué, cuando lanzamos verticalmente hacia arriba una piedra, vuelve a nuestra mano.

P.10 Cuando se deja caer un pequeño objeto, como una barra de tiza, al suelo, se observa que se mueve hacia abajo, y, sin embargo, no parece que la Tierra se mueva en absoluto hacia arriba. Este ejemplo constituye una excepción al principio de acción y reacción, según el cual la fuerza con que la tiza atrae a la Tierra hacia arriba debería tener el mismo valor que la fuerza con que la Tierra atrae a la tiza hacia su centro.

Señalad si se está a favor o en contra de la afirmación anterior explicando las razones.

P.11 Explicad cómo es posible que los astronautas, que viajan en naves espaciales en órbita a 500 km sobre la Tierra, no caigan sobre ésta cuando salen de la nave.

TEMA 3: ¿QUÉ ES LO QUE HACE QUE UN MOVIMIENTO SEA DE UN TIPO U OTRO? ¿CÓMO CONSEGUIR QUE CUALQUIER OBJETO REALICE UN MOVIMIENTO DESEADO? (*DINÁMICA.*)

E.1

$F_{resultante}$ (N)			200	
masa (kg)				20
aceleración (m/s²)	10	20		

Del análisis de los anteriores resultados hay que destacar que:

—Cuando la fuerza resultante es la misma, si la masa es mayor la aceleración es menor.

—Cuando la aceleración es la misma, si la masa es mayor la fuerza resultante es mayor.

—Cuando la masa es la misma, si la aceleración es mayor la fuerza resultante es mayor.

E.2 $|F| = 200$ N

E.3 $|F_{ROZ}| = 300$ N

E.4 En los casos *a), b)* y *c)* se moverá verticalmente con M.R.U.A.: cada vez más aprisa en *a)* y *b)*; y cada vez más despacio en *c)*. En el caso *d)* dará lugar a un movimiento con trayectoria curvilínea, de forma que en el instante inicial sólo variará la dirección de la velocidad y, después, se moverá cada vez más deprisa. En el caso *e)* dará lugar a un movimiento con trayectoria curvilínea, de forma que primero ascenderá cada vez más despacio y luego bajará cada vez más aprisa.

E.5 $|F| = 120$ N

E.6 *a)* F_{AB} y F_{BA} serán iguales en módulo y dirección, pero tendrán sentido opuesto; *b)* $|a_B| = 0{,}4$ m/s²; *c)* $|F_{AB}| = |F_{BA}| = 0{,}04$ N.

E.7 686,1 N; 590,0 N, 15,6 N, 9,8 m/s², 8,43 m/s² y 0,22 m/s².

E.8 *a)* 2.10^{20} N, es decir, de 200 trillones de N; *b)* Esta fuerza tan grande le produce una aceleración muy baja hacia el centro de la Tierra, 0,0027 m/s². No obstante, si estuviera parada, caería en línea recta hacia nosotros, de la misma forma que lo hace una piedra cuando la soltamos de la mano. Pero la Luna no está parada —aunque, como está tan lejos, nos puede dar esa impresión—. El valor de su velocidad es de unos 1.000 m/s respecto al centro de la Tierra, y esa velocidad es la necesaria para estar en órbita a la distancia que se encuentra de la Tierra. La situación es la misma que planteó Newton al analizar el movimiento de los proyectiles lanzados con distinta velocidad: cuando la velocidad del proyectil adquiere un determinado valor, ya no chocará con la superficie terrestre y estará en órbita. Si la fuerza gravitatoria y la velocidad son perpendiculares en todo momento, como pasa en el caso de la Luna, la órbita será circular.

Muchas personas, que no han comprendido el concepto de fuerza o que piensan que la Luna está parada, creen que ha de haber una fuerza sobre la Luna, en dirección radial hacia fuera, que anule la fuerza que hace la Tierra. Si en realidad existiera esa fuerza, la resultante sobre la Luna sería nula, y su movimiento sería rectilíneo con velocidad constante. Por el contrario, para que un cuerpo tenga M.C.U. es necesario que la fuerza resultante sea siempre perpendicular a la velocidad y vaya dirigida hacia el centro de la trayectoria.

P.1 De acuerdo con la nueva concepción de fuerza, lo que ocurre en las dos situaciones anteriores es que está actuando sobre el cuerpo una fuerza que se opone al movimiento y que es la que hace que disminuya la velocidad hasta pararse. En el primer caso, es precisamente la fuerza de rozamiento la que impide que el cuerpo se mueva con velocidad constante, de manera que, si no hubiese rozamiento, el objeto seguiría, con la velocidad que se le ha comunicado, en la misma dirección y sentido indefinidamente.

En el segundo caso, la proposición es cierta, ya que, en efecto, hay que aplicar una fuerza igual a la de rozamiento para que la fuerza resultante sea nula; de ese modo, si el objeto se encontraba moviéndose, seguirá haciéndolo con velocidad constante, ya que no habrá ninguna fuerza que lo frene ni que lo empuje.

P.2 A la luz del concepto de fuerza construido en este tema, esta frase se reformularía de la siguiente manera: «Cuanto más rápidamente cambia el movimiento de un cuerpo, más fuerza actúa sobre él o durante más tiempo ha tenido que estar actuando; pero la fuerza resultante para mantenerlo a la velocidad determinada debe ser nula».

P.3 Al distinguir entre la masa como propiedad por la cual los cuerpos se atraen gravitatoriamente (masa gravitatoria) y la masa como medida de la inercia, puedes apreciar (p.e., colgando dos cuerpos de masa distinta de sendos dinamómetros) que la Tierra atrae con mayor fuerza a los cuerpos de mayor masa (inercial), que adquieren una aceleración menor sometidos a la misma fuerza.

P.4 Mucha gente señala, equivocadamente, con bastante rapidez y seguridad, la opción *b)* o la *c)* como respuestas correctas, en lugar de la *a)*. En general, se contesta así porque se cree que, al lanzar un cuerpo hacia arriba, se le comunica una fuerza (fuerza de impulso) mayor que el peso, fuerza que queda impresa en él, pero que poco a poco se va gastando mientras sube (ya que se emplea precisamente en subirlo), de modo que al final desaparece y el cuerpo cae de nuevo al suelo cada vez más aprisa debido a la fuerza *peso*.

¿Qué le ocurriría a la aceleración con que se mueve la piedra si esto fuese así? Como la fuerza que actuaría sobre ella conforme va subiendo iría cambiando, también lo haría la aceleración. Sin embargo, cuando se realiza experimentalmente un lanzamiento como el que se plantea en la cuestión, se comprueba que la aceleración es la misma al subir que al bajar. En ambos casos va dirigida hacia abajo y su módulo vale (al nivel del mar) 9'8 m/s^2.

¿Con qué está interaccionando la piedra desde que ha sido lanzada hasta inmediatamente antes de llegar al suelo? En realidad, la fuerza que se hace sobre la piedra (p.e., con la mano) sólo existe cuando se lanza, mientras dura la interacción piedra-mano, y es la responsable de que su velocidad cambie desde 0 a v_0 (velocidad con que sale la piedra). Una vez que se encuentra en el aire, sólo interacciona gravitatoriamente con la Tierra (fricción con el aire despreciable). En dicha interacción la piedra sola no podría cambiar su movimiento y seguiría subiendo siempre con la misma rapidez con que se lanzó y en los mismos dirección y sentido. Lo que hace, pues, P es cambiar la velocidad de la piedra haciendo que su valor vaya disminuyendo de forma regular mientras sube, para pasar momentáneamente por el valor 0 en el instante en que alcanza la máxima altura, y vuelva a aumentar después otra vez mientras vuelve al suelo (P siempre tira hacia abajo). Durante todo el proceso, P (fuerza resultante sobre la piedra) se puede considerar muy aproximadamente como constante (la altura a que sube es pequeña), y, consecuentemente, el movimiento se puede considerar uniformemente acelerado

P.5 Si se asocia a los objetos en movimiento una fuerza de impulso que se gasta, se puede argumentar que, de esa manera, habría fuerza resultante en la dirección del movimiento, y los cuerpos no sólo no pararían sino que se acelerarían en la dirección y el sentido de éste. Para que el cuerpo acabe parando, sería necesaria la existencia de alguna fuerza de sentido contrario al movimiento. Efectivamente, si se lanza un cuerpo con una velocidad sobre una mesa horizontal muy larga, tarde o temprano terminará por pararse. Esto significa que, mientras esté en movimiento, experimenta una fuerza dirigida en sentido opuesto al de su movimiento. En estos casos decimos que la mesa ejerce una fuerza de rozamiento sobre el bloque que se desliza. En realidad, siempre que la superficie de un cuerpo deslice sobre otro, debe existir una fuerza de rozamiento, que estará dirigida en el sentido opuesto al de su movimiento relativo.

P.6 Según lo que hemos visto hasta aquí, se trata de establecer que sólo sería posible actuar en la dirección perpendicular a la trayectoria y en sentido hacia el centro de la curva que se pretende describir. En Cinemática se han hallado la dirección y el sentido de la aceleración en estos casos, y es de esperar que, con la identificación *aceleración-fuerza resultante* no se presenten graves dificultades en su resolución. No obstante, el preconcepto *fuerza-velocidad* puede implicar el que algunos puedan aludir a que, si la fuerza resultante fuera la indicada como correcta —por ejemplo en el M.C.U.—, el cuerpo debería dirigirse hacia el centro. Debéis recordar que, solamente si el cuerpo está en reposo, la fuerza resultante indicará la dirección y sentido del movimiento, pero que, en general, lo que nos indica es la dirección y sentido de la aceleración.

P.7 Esta duda surge porque no se tiene en cuenta que las fuerzas que actúan sobre cuerpos distintos no pueden anularse (otra cosa sería que sobre el bloque o sobre el alumno se ejercieran dos únicas fuerzas iguales y de sentidos contrarios). Por otra parte, es preciso tener en cuenta que, p.e., sobre el alumno no sólo actuaría la fuerza que le hace el bloque (hacia la izquierda). En efecto, éste, al empujar el bloque, tira la Tierra hacia atrás, ejerce con sus pies una fuerza sobre la Tierra y, consecuentemente, la Tierra ejerce una fuerza sobre el alumno hacia la derecha. Por tanto, la fuerza resultante que actúa sobre el alumno en la dirección del movimiento será la suma de la que le hace el bloque más la que le hace la Tierra (componente horizontal). Dado que ambas son de sentido contrario, se concluye que, para que el alumno pueda comenzar a moverse, esta última tendrá que ser mayor que la que le hace el bloque. [*Ver el dibujo de esta **P.7** en la página 114.*]

P.8 Tendríamos que llegar a la conclusión de que los movimientos no tendrían fin mientras los objetos no chocaran unos contra otros, y, en este aspecto, no resultarían muy distintos de los movimientos de los cuerpos celestes. Además, muchos de los movimientos a que estamos habituados (movimiento de las personas al caminar, de los coches...) nunca se podrían observar, ya que es la fuerza de rozamiento la que los produce.

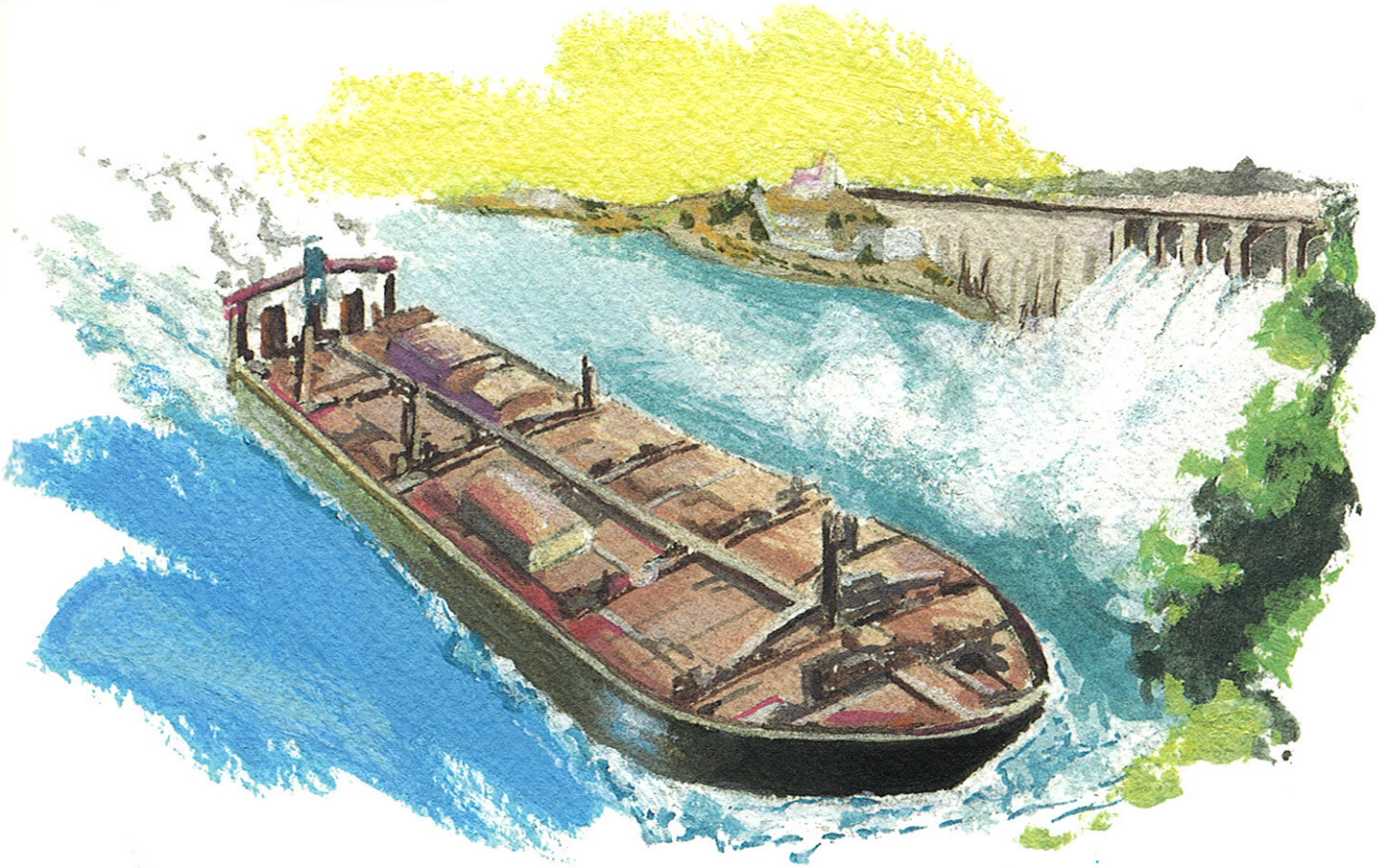
P.9 El propósito de esta actividad es abordar el gran problema que la mecánica prenewtoniana no podía explicar. Con la idea de que es necesaria una fuerza para que un objeto se mueva, la piedra asciende porque nosotros, al lanzarla, la hemos forzado a subir; pero si la piedra cae a la mano del lanzador y éste se ha movido juntamente con la Tierra durante el tiempo en que aquélla ha estado subiendo y bajando, ¿quién le ha hecho esa fuerza «horizontal»? El que nadie le haga esa fuerza era un argumento para rebatir la idea de una Tierra en movimiento.

P.10 Un manejo aceptable del concepto newtoniano de fuerza debería conducir a manifestarse en desacuerdo con la afirmación que se hace en la cuestión, explicando que ambas fuerzas son iguales; pero evidentemente no son iguales la masa de la tiza y la de la Tierra, y esto hace que la diferencia entre las aceleraciones también sea enorme.

P.11 Con esta actividad se hace uso reiterado de un aspecto conceptual tan importante como es el de la diferenciación entre *masa* y *peso*, identificando la interacción gravitatoria con el peso. La intensidad de esta interacción, disminuye con el cuadrado de la distancia, pero nunca se anula, aunque estemos en el vacío: la asociación *gravitación-atmósfera* es un frecuente error entre los alumnos. Se puede recordar que la altura sobre la superficie terrestre a la que se extiende la atmósfera es de algo más de 25 km. Puede resultar problemático explicar que los astronautas «floten». Es preciso considerar que es así, porque están siendo observados desde cámaras que están en la propia nave, y ésta participa con ellos del mismo movimiento de caída. No debe, pues, interpretarse como una falta de gravedad (como se afirma frecuentemente en los medios de comunicación: están «flotando» en lo que parecen «condiciones de ingravidez»), sino como una situación de verdadera «caída libre» compartida, que tiene la particularidad, como la de la Luna, de no acabar fatalmente contra la superficie de la Tierra.

4 Fuerzas ejercidas por fluidos.

Joaquín Martínez Torregrosa



• Un campo de aplicación, y de puesta a prueba, de la Dinámica newtoniana es el del estudio de las fuerzas que ejercen los fluidos (líquidos y gases *) sobre los cuerpos en contacto con ellos.

Por su importancia, aplicaciones y complejidad, realizamos este estudio desgajado del tema anterior, aunque puede ser considerado como una aplicación de los principios de la Dinámica.

* Los fluidos se llaman así porque pueden *fluir* (es decir, deslizarse) paralelamente a las superficies con las que están en contacto, sin resistencia alguna. Los fluidos no tienen forma definida, adaptándose a las de las superficies de los objetos con los que están en contacto. No obstante, existe una diferencia fundamental entre líquidos y gases: una determinada cantidad de un líquido tiene un volumen invariable (o variable en una pequeñísima proporción) aunque se lo someta a grandes fuerzas; el volumen de una cantidad de gas, en cambio, puede experimentar grandes variaciones.

A.1 Analizad qué interés puede tener estudiar las fuerzas que ejerce un líquido o un gas sobre objetos en contacto con cualquiera de ellos.